

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ

(Учебное пособие)

Часть II

Москва-1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ССРС
МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Барканов Н.А., Ефимов И.Е., Козырь И.Я.,
Митрофанов О.В., Самохвалов Г.К., Щер Ю.А.

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ

(Учебное пособие)

Часть II

Под редакцией проф. И.Е.Ефимова

Москва - 1971

Ч А С Т Ь П

Г л а в а I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

I. Основные понятия физики полупроводников

Известно, что электроны в изолированных атомах находятся в дискретных энергетических состояниях, определяемых четырьмя квантовыми числами. При образовании кристалла, когда атомы сближаются друг с другом, дискретные энергетические состояния атома размываются в зоны (рис. I.1).

Расщепление дискретных энергетических уровней электронов происходит вследствие возрастающего взаимодействия между ними при сближении атомов. При этом каждый дискретный уровень электрона в атоме будет расщепляться на N энергетических уровней, где N - число взаимодействующих атомов кристалла.

Этот результат соответствует известному из механики расщеплению частот N взаимодействующих тождественных осцилляторов.

Различие в энергетических диаграммах элементов определяет, как известно, различие между металлом, полупроводником и диэлектриком. Различие в ширине запрещенной зоны определяет полупроводники и диэлектрики.

При этом отдельные энергетические уровни электронов зон столь многочисленны и расположены настолько близко друг к другу, что энергетический спектр электронов в зоне можно рассматривать как квазинепрерывный.

Распределение электронов в кристалле по энергиям, как известно, подчиняется статистике Ферми-Дирака

$$f_n(\xi) = \frac{1}{1 + \exp \frac{\xi - \xi_F}{kT}}, \quad (I.1)$$

где ξ - рассматриваемый уровень энергии;

ξ_F - энергия Ферми (уровень энергии, вероятность заполнения которого 0,5);

k - постоянная Больцмана;

T - температура в $^{\circ}\text{K}$.

Очевидно, обязательно, чтобы электронные состояния, соответствующие уровню Ферми, были заняты.

На рис. I.1 показано распределение Ферми-Дирака при различных температурах.

При энергиях $\epsilon \geq 4kT \approx 0,1 \text{ эВ}$. функцию ферми можно заменить функцией распределения Больцмана (пунктирные кривые на рис. I.1).

$$f_n(\epsilon) \approx \exp\left(-\frac{\epsilon - \epsilon_F}{kT}\right) \quad \text{при } \epsilon - \epsilon_F > 0;$$

$$f_n(\epsilon) = 1 - \exp\left(-\frac{\epsilon - \epsilon_F}{kT}\right) \quad \text{при } \epsilon - \epsilon_F < 0;$$

(I.2)

$$f_p(\epsilon) = 1 - \exp\left(-\frac{\epsilon - \epsilon_F}{kT}\right) \quad \text{при } \epsilon - \epsilon_F > 0;$$

$$f_p(\epsilon) = \exp\left(-\frac{\epsilon - \epsilon_F}{kT}\right) \quad \text{при } \epsilon - \epsilon_F < 0.$$

При 0°K в собственных полупроводниках валентная зона, как известно, полностью заполнена, а зона проводимости полностью свободна (рис. I.2).

С ростом температуры появляется конечная вероятность разрушения (разрыва) ковалентных связей атомов в кристалле. Это соответствует переходу электрона из валентной зоны в зону проводимости и образования пары электрон-дырка (рис. I.2).

Концентрация носителей заряда (электронов) в собственных полупроводниках может быть определена, если известна функция распределения, определяющая вероятность заполнения энергетических уровней в зоне проводимости электронами $f(\epsilon)$, а также известен закон распределения энергетических уровней по энергии $N(\epsilon)$ в зоне проводимости. Тогда плотность электронов n в зоне проводимости (концентрация электронов) определится как

$$n = \int N(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon, \quad (\text{I.3})$$

где $N(\epsilon)$ - число энергетических уровней зоны проводимости в единице объема в единичном интервале энергии.

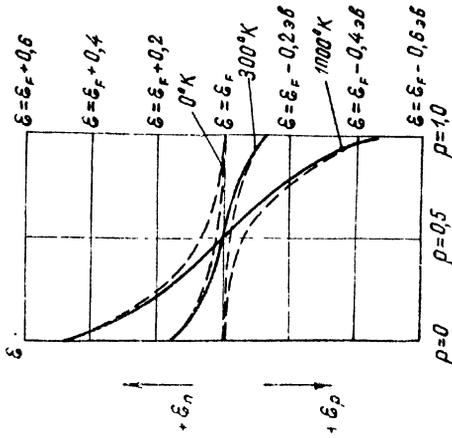


Рис. I.1. Вероятность заполнения энергетических уровней в кристалле при различных температурах

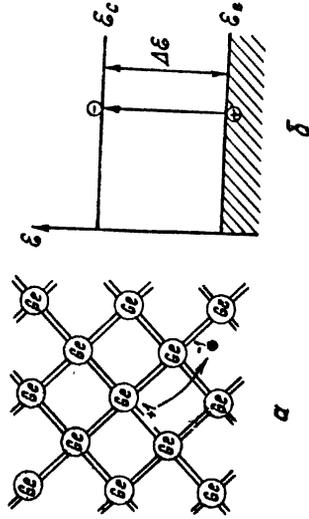


Рис. I.2. Двумерная мо. зль разрыва ковалентной связи в кристалле германия и генерация пары электрон-дырка:
 а - на двумерном изображении кристаллов; б - на зонной энергетической диаграмме

На рис.1.3 графически представлены факторы, определяющие концентрацию электронов. Интегрирование уравнения (I.3) для случая

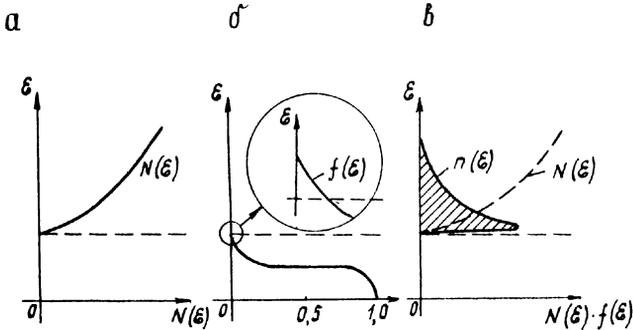


Рис.1.3. Графическое представление факторов, определяющих электронную концентрацию:
 а - функция плотности состояний в зоне проводимости; б - функция распределения Ферми;
 в - результирующая функция $n(\epsilon)$

когда $N(\epsilon) \sim \epsilon^{\frac{1}{2}}$, дает следующее выражение для концентрации электронов

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{kT} \right), \quad (I.4)$$

$$2 \left(\frac{2\pi m_n^* \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = N_c,$$

где N_c - эквивалентная плотность состояний в зоне проводимости;
 m_n^* - эффективная масса электронов.

Тогда

$$n = N_c \exp \left(-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{kT} \right). \quad (I.5)$$

Аналогично можно определить концентрацию дырок в валентной зоне собственного полупроводника

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{\epsilon_F - \epsilon_v}{kT} \right); \quad (I.6)$$

$$p = N_B \exp - \left(\frac{\epsilon_F - \epsilon_B}{kT} \right). \quad (I.7)$$

Так как в собственном полупроводнике $n = p$, то

$$np = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \cdot (m_n^* \cdot m_p^*)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left(- \frac{\epsilon_g}{kT} \right) = n_i^2.$$

Из последнего выражения видно, что произведение $n \cdot p$ представляет собой величину, не зависящую от положения уровня Ферми, и определяется только шириной запрещенной зоны ϵ_g и температурой

$$np = N_C \cdot N_B \cdot \exp \left(- \frac{\epsilon_g}{kT} \right) = n_i^2 = p_i^2, \quad (I.8)$$

где n_i - концентрация электронов (или дырок) в собственном (абсолютно чистом) полупроводнике.

Выражение $n \cdot p = n_i^2$ иногда называется законом действующих масс для полупроводников.

В собственном полупроводнике уровень Ферми проходит по середине запрещенной зоны. Действительно, так как в собственном полупроводнике общее число электронов и дырок одинаково $n = p$, то, приравняв их значения, из выражений (I.4) и (I.6) получим

$$(m_n^*)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp - \left(\frac{\epsilon_C - \epsilon_F}{kT} \right) = (m_p^*)^{\frac{3}{2}} \exp - \left(\frac{\epsilon_F - \epsilon_B}{kT} \right);$$

$$\left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{\frac{3}{2}} = \exp \left(\frac{\epsilon_F - \epsilon_B + \epsilon_C + \epsilon_F}{kT} \right) = \exp \left[\frac{2\epsilon_F - (\epsilon_C - \epsilon_B)}{kT} \right];$$

$$2\epsilon_F - (\epsilon_C - \epsilon_B) = \frac{3}{2} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right);$$

$$\epsilon_F = \frac{\epsilon_C + \epsilon_B}{2} - \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right).$$

Если считать, что $m_n^* = m_p^*$, то

$$\epsilon_F = \frac{\epsilon_C + \epsilon_B}{2},$$

т.е. в приближении равенства эффективных масс электрона и дырки уровень Ферми проходит посредине запрещенной зоны.

Выражение (I.8) справедливо также и для примесных полупроводников.

Примесные полупроводники с проводимостью n -типа образуются, как известно, при легировании германия или кремния элементами пятой группы (фосфором, сурьмой и др.).

Эти элементы образуют донорные уровни, расположенные в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости (рис. I.4), где ϵ_D - энергия активации примесной проводимости.

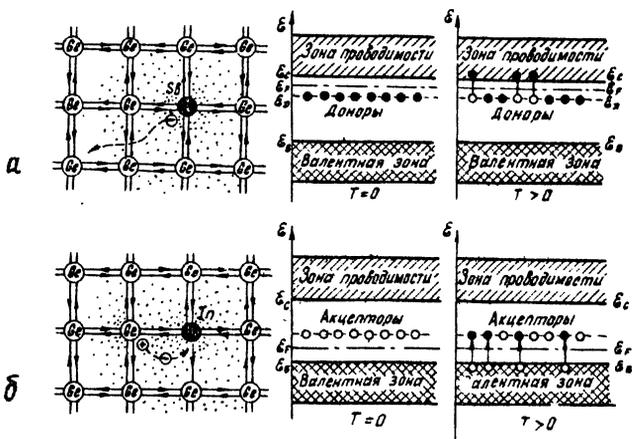


Рис. I.4. Схема образования примесных полупроводников при легировании сурьмой и индием:

а - электронного; б - дырочного

Аналогично примесный полупроводник с проводимостью p -типа образуется при легировании германия или кремния элементами третьей группы (бором, индием и др.).

Эти элементы образуют акцепторные уровни, расположенные в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны (рис. I.4), где

ϵ_A - энергия активации примесной проводимости за счет акцепторов.

В примесных полупроводниках n -типа электроны являются, как известно, основными носителями заряда, дырки - неосновными, и наоборот, в дырочных полупроводниках дырки будут основными носителями, электроны - неосновными.

Концентрация основных носителей в примесном полупроводнике n -типа определяется выражением

$$n = n_i \exp - \frac{\epsilon_i - \epsilon_F}{kT}. \quad (I.9)$$

Аналогично концентрация в дырочном полупроводнике будет

$$p = p_i \exp - \frac{\epsilon_F - \epsilon_i}{kT}. \quad (I.10)$$

Нетрудно видеть, что с ростом концентрации донорной примеси N_D уровень ферми будет смещаться от середины запрещенной зоны в направлении к дну зоны проводимости.

С ростом концентрации акцепторной примеси ϵ_F будет смещаться к потолку валентной зоны.

Если полупроводник будет легирован как донорной, так и акцепторной примесями с преобладанием одной из них, то он называется компенсированным. При $N_D = N_A$ полупроводник называется полностью компенсированным.

С ростом температуры концентрация носителей заряда в полупроводниках, как известно, возрастает.

На рис. I.5 приведена температурная зависимость концентрации основных носителей электронов в полупроводнике n -типа в функции от обратной температуры ($\frac{1}{T}$).

На участке I-2 (рис. I.5) концентрация электронов возрастает за счет ионизации доноров. Тангенс угла наклона участка I-2 пропорционален энергии активации донорной примеси ϵ_D

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{\epsilon_D}{2k} \sim \epsilon_D.$$

На участке 2-3, когда все донорные примеси уже ионизированы, а энергия для активации собственной проводимости еще недостаточна, концентрация электронов с ростом температуры не изменяется.

На участке 3-4 концентрация носителей резко возрастает за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости (собственная проводимость). При этом $\operatorname{tg} \beta$ угла наклона участка 3-4 пропорционален ширине запрещенной зоны ϵ_g

$$\operatorname{tg} \alpha' = - \frac{\epsilon_g}{2k} \sim \epsilon_g.$$

С ростом концентрации легирующей примеси N_D энергия ионизации доноров уменьшается. Это объясняется тем, что энергия активации доноров определяется их взаимодействием, а последнее зависит от расстояния между примесными атомами

$$l_{ND} \sim \frac{1}{\sqrt{N_D}}.$$

С ростом N_D на зависимости $\lg n = f\left(\frac{1}{T}\right)$ участок 2-3 исчезает и в пределе полупроводник при очень больших N_D приобретает проводимость металла (вырожденный полупроводник).

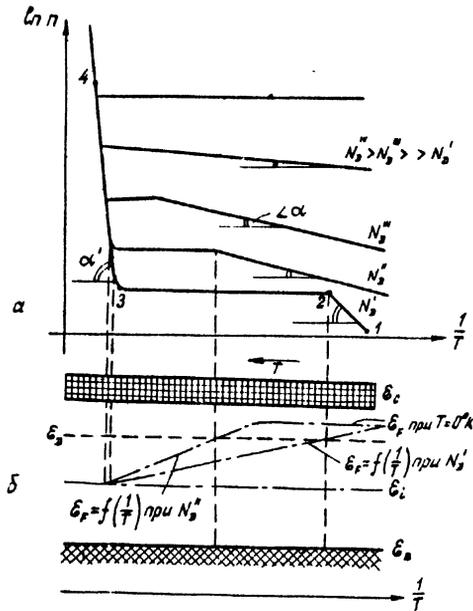


Рис.1.5. Зависимость концентрации носителей от обратной температуры при различных концентрациях примесей: $N_D \leq N_D'$, $N_D' < N_D''$ (а); положение уровня Ферми в функции от обратной температуры при концентрациях примесей N_D и N_D'' (б)

Важным параметром полупроводниковых кристаллов является подвижность носителей. Под подвижностью μ понимается отношение дрейфовой скорости к величине напряженности электрического поля

$$\mu = \frac{v}{E}. \quad (I.11)$$

Величина подвижности определяется рассеянием носителей заряда на различных неоднородностях кристаллической решетки.

Наиболее существенный вклад в снижение подвижности вносят рассеяния на тепловых колебаниях решетки и на ионах примесей.

Величина подвижности с учетом этих двух видов рассеяния в первом приближении может быть записана в виде

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_T} + \frac{1}{\mu_i},$$

где μ_T — подвижность, определяемая рассеянием на тепловых колебаниях решетки;

μ_i — подвижность, определяемая рассеянием на ионах примесей.

В первом приближении μ_T обратно пропорционально температуре, ибо, чем выше температура, тем больше амплитуда колебания атома и больше рассеяние электронных волн, взаимодействующих с колеблющимися атомами решетки. Более точно

$$\mu_T(T) \approx T^{-\frac{3}{2}}, \quad (I.12)$$

т.е. с ростом температуры дрейфовая подвижность μ_T , определяемая рассеянием на колебаниях кристаллической решетки, будет уменьшаться.

Рассеяние на ионизированных атомах примесей носит иной характер. В данном случае эффект рассеяния заключается в том, что дрейфующие в электрическом поле E носители отклоняются под действием кулоновских полей ионизированных примесей.

При этом очевидно, что отклонение под действием кулоновских полей будет тем меньше, чем больше тепловая скорость электронов (чем выше температура), т.е., чем быстрее электроны движутся мимо ионизированных атомов, тем менее они отклоняются. Поэтому μ_i

в первом приближении прямо пропорциональна температуре. Более точно

$$\mu_u(T) \cong T^{\frac{3}{2}}, \quad (I.13)$$

т.е. с ростом температуры подвижность μ_u , определяемая рассеянием на ионизированных атомах примесей, будет возрастать.

Нетрудно видеть, что μ_u будет также возрастать с понижением концентрации легирующих примесей в кристалле.

Таким образом, дрейфовая подвижность, определяемая влиянием указанных выше факторов, может быть представлена в виде

$$\frac{1}{\mu} \cong T^{-\frac{3}{2}} + T^{\frac{5}{2}} \quad (I.14)$$

На рис. I.6 приведена зависимость подвижности дырок в кремнии, легированном бором, от обратной температуры.

Из рисунка видно, что с ростом температуры подвижность вначале возрастает (участок I). В этом случае доминирующим является механизм рассеяния носителей на ионах примесей (рассеяние на колебаниях решетки незначительно). Далее, с ростом температуры, начинает возрастать рассеяние на тепловых колебаниях решетки, а рассеяние на ионах примесей уменьшаться (участок 2).

Поэтому на кривых $\mu = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (рис. I.6) наблюдаются отчетливо выраженные максимумы.

На рис. I.7 приведена зависимость дрейфовой подвижности носителей заряда от удельного сопротивления полупроводника при комнатной температуре. Из рисунка видно, что с понижением удельного сопротивления подвижность уменьшается.

Это нетрудно объяснить, если учесть, что с понижением удельного сопротивления повышается концентрация легирующих примесей, а следовательно, возрастает рассеяние носителей на ионизированных атомах легирующих примесей.

Удельная электропроводность полупроводника σ , как известно, прямо пропорциональна концентрации носителей заряда n , а также подвижности носителей μ

$$\sigma = en\mu, \quad (I.15)$$

где e - заряд электронов.

На рис. I.8 приведена зависимость удельной проводимости полупроводников от обратной температуры. На рис. I.8 зависимости

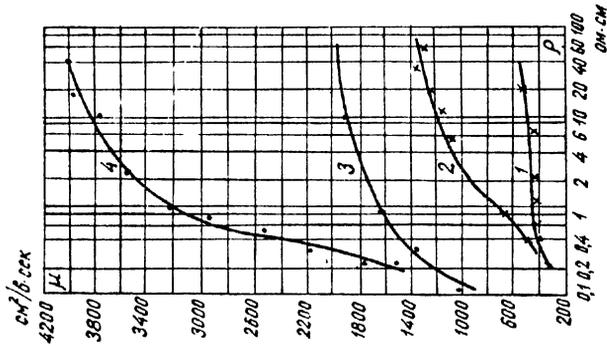


Рис. 1.7. Зависимость дрейфовой подвижности носителей заряда от удельного содержания полупроводника при комнатной температуре: 1 - дирки в кремнии; 2 - электроны в кремнии; 3 - дирки в германии; 4 - электроны в германии

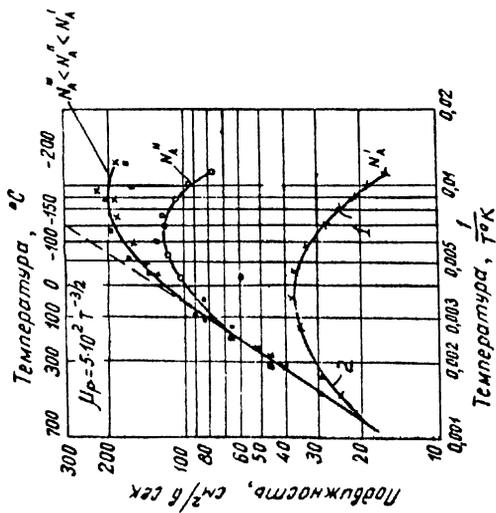


Рис. 1.6. Температурная зависимость подвижности дырок в кремнии, легированном бором

$n = f\left(\frac{1}{T}\right)$ и $\mu = f\left(\frac{1}{T}\right)$ нами рассмотрены выше, а зависимость $\ln \sigma = f(n, \mu)$ получается сложением ординат двух верхних графиков.

Из рис. I.8, в видно, что удельная электропроводимость σ в слабо легированных полупроводниках (N_D') с ростом температуры может понижаться. Это объясняется понижением дрейфовой подвижности с ростом температуры (рис. I.6).

Если в полупроводник каким-либо образом вводится избыточное количество носителей заряда (нарушается равновесная концентрация носителей), то после прекращения введения избыточных носителей последние будут рекомбинировать.

Существует прямая рекомбинация и рекомбинация на ловушках. При прямой рекомбинации (рис. I.9, а) рекомбинация электрона и дырки происходит за счет прямого перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону на имеющийся там свободный уровень или, что все равно, перехода дырки из валентной зоны на занятый электроном уровень в зоне проводимости. Такой процесс рекомбинации мало вероятен. Во-первых, для его осуществления электрон и дырка должны оказаться одновременно в одном и том же месте кристалла. Во-вторых, должен выполняться закон сохранения импульса, т.е. рекомбинация произойдет, если электрон и дырка имеют равные, но противоположно направленные импульсы.

Вероятность прямой рекомбинации очень мала. В германии, например, эта вероятность порядка $1 \cdot 10^{-4}$.

В основном неравновесные носители рекомбинируют на ловушках. Рекомбинационными ловушками могут быть различные дефекты кристаллической решетки полупроводника: примесные атомы, включения, дислоцированные атомы, вакансионные узлы, дислокации и другие несовершенства объема или поверхности кристалла.

На рис. I.9, б, в схематически показана рекомбинация электронов и дырок на ловушках. На первой стадии электрон захватывается незанятым уровнем ловушки, выходя из числа свободных носителей заряда.

Заполненная ловушка становится отрицательно заряженным ионом. В этом состоянии ловушка будет находиться до тех пор, пока к ней не подойдет дырка. После этого завершится вторая стадия рекомбинации, т.е. переход электрона на свободный уровень в валентной зоне (рис. I.9, б).

Рекомбинация дырки (рис. I.9, в) протекает аналогично. В исход-

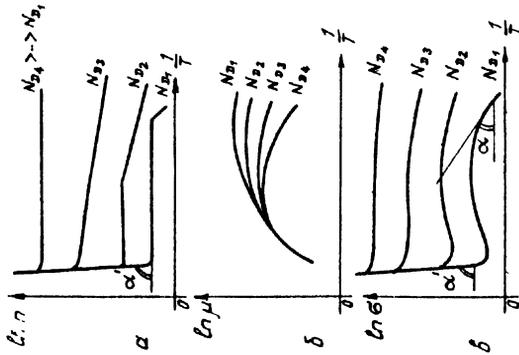


Рис.1.8. Зависимость концентрации носителей (а), подвижности (б) и удельной проводимости (в) от температуры при различных концентрациях примесей $N_{p1} < N_{p2} < N_{p3} < N_{p4}$

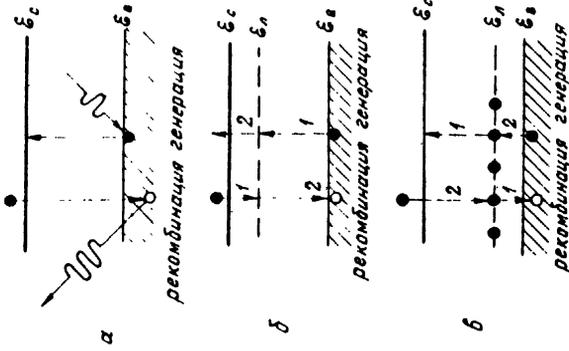


Рис.1.9. Модели основных механизмов рекомбинации и генерации носителей:
 а - прямая рекомбинация и генерация; б - рекомбинация и генерация через незаполненные уровни; в - рекомбинация и генерация через заполненные уровни

ном состоянии на ловушке находится захваченный электрон. На первой стадии электрон переходит с ловушки на свободный уровень валентной зоны. На второй стадии рекомбинации электрон переходит из зоны проводимости на незаполненную ловушку. Двухступенчатый процесс рекомбинации более вероятен, так как он не требует одновременного присутствия в данной точке электрона и дырки.

Разность импульсов электрона и дырки при этом воспринимается ловушкой, что необходимо для выполнения закона сохранения импульса.

Очевидно, при рекомбинации среднее время τ_n между двумя встречами электрона с дыркой будет тем меньше, чем больше концентрация дырок p , эффективное сечение захвата электрона дыркой S_n и скорость движения электронов v_n , т.е.

$$\tau_n = \frac{1}{S_n v_n p} . \quad (I.16)$$

Аналогично для дырок среднее время τ_p определяется выражением

$$\tau_p = \frac{1}{S_p v_p n} . \quad (I.17)$$

Величина τ_n (τ_p) является средним временем жизни носителя заряда (время с момента генерации пары электрон-дырка до момента рекомбинации пары электрон-дырка).

Если в полупроводнике, например п-типа, имеется несколько видов рекомбинационных центров с концентрациями p_k и сечением захвата S_{nk} , то число столкновений электрона с этими центрами рекомбинации в единицу времени будет

$$\sum_k S_{nk} \cdot v_{nk} \cdot p_k ,$$

а эффективное время жизни

$$\tau_n = \frac{1}{\sum_k S_{nk} \cdot v_{nk} \cdot p_k} , \quad (I.18)$$

где k - количество различных механизмов рекомбинации.

Величина $\frac{1}{\tau_n}$ имеет физический смысл среднего числа столкновений электрона с дырками в единицу времени.

Общее число электронов, рекомбинирующих в единицу времени в единице объема, можно получить, умножив $\frac{1}{\tau}$ на избыточную концентрацию Δn

$$\Delta n = n - n_0,$$

где n_0 - равновесная концентрация;

n - неравновесная концентрация.

Тогда количество носителей, рекомбинирующих в единице объема в единицу времени (скорость изменения концентрации), будет пропорционально избыточной концентрации Δn или Δp

$$-\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{\tau_n} \cdot \Delta n; \quad (I.19)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{\tau_p} \cdot \Delta p, \quad (I.20)$$

где $-\frac{\partial p}{\partial t}$ и $-\frac{\partial n}{\partial t}$ означает, что концентрация изменяется в сторону убывания. Отсюда время жизни неравновесных носителей определится как отношение избыточной концентрации носителей к скорости изменения этой концентрации

$$\tau_n = \frac{\Delta n}{\partial n / \partial t}; \quad \tau_p = \frac{\Delta p}{\partial p / \partial t}.$$

В выражения для времени жизни входят концентрации $n(p)$ или $\Delta n(\Delta p)$, которые не являются постоянными величинами, поэтому и время жизни непостоянно.

Решения уравнений (I.19) и (I.20) наиболее просто можно получить для случаев линейной и квадратичной рекомбинации.

При линейной рекомбинации введение неравновесных неосновных носителей не вызывает существенного изменения концентрации основных носителей, с которыми протекает рекомбинация. Это имеет место, например, при низком уровне инжекции неосновных носителей в базу

транзистора.

В этом случае время жизни будет постоянно, а количество носителей, рекомбинирующих в единицу времени в единице объема, пропорционально первой степени избыточной концентрации.

Пусть при $t=0$ создана избыточная концентрация Δn_0 (Δp_0), которая после прекращения действия источника избыточных носителей стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$.

Тогда уравнения (I.19), (I.20) имеют решения

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right); \quad \Delta p = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right);$$

$$\Delta n = \Delta n_0 \frac{1}{e} \quad \text{при } t = \tau_n,$$

т.е. в случае линейной рекомбинации избыточная концентрация за время жизни τ уменьшается e раз.

При квадратичной рекомбинации концентрации зарядов обоих знаков приблизительно равны. Этот случай реализуется в полупроводниках с проводимостью, близкой к собственной.

Решение уравнений (I.19) и (I.20) для случаев квадратичной рекомбинации дает не экспоненциальный ход зависимости концентрации от времени.

На рис. I.10 приведена зависимость времени жизни носителей от концентрации.

Рекомбинация реализуется в том случае, если имеется достаточное количество ловушек, способных захватывать носители и достаточное количество носителей противоположного знака для восстановления первоначального состояния ловушек. Если уровень Ферми находится выше уровня ловушек (рис. I.10, а, б), то вероятность заполнения ловушек близка к единице и практически все ловушки будут заполнены.

Ловушки будут заполнены и концентрация заполненных ловушек будет практически постоянна до тех пор, пока уровень Ферми будет находиться выше уровня ловушек.

При этом рекомбинация дырок будет проходить быстро, так как имеется много заполненных ловушек, способных захватывать дырки. После захвата дырки ловушки сразу же будут заполняться электронами из зоны проводимости. Поэтому на этой стадии рекомбинация будет протекать быстро и время жизни будет малым, и не будет изменяться с понижением уровня Ферми (с понижением концентрации основ-

них носителей) до тех пор, пока уровень Ферми не пересечет уровень ловушек. При понижении уровня Ферми ниже уровня ловушек концентрация заполненных ловушек будет уменьшаться (кривая $\ell_{ri} n_L = f(\epsilon_F)$ на рис. I.10, б). В этом случае уже не все ловушки смогут захватывать дырки и время жизни τ_p начнет возрастать (область II, рис. I.10, в).

Вторая фаза рекомбинации, т.е. заполнение ловушек электронами из зоны проводимости, будет протекать по-прежнему достаточно быстро.

При понижении ϵ_F ниже ϵ_L полупроводник становится дырочным и рекомбинировать на пустых ловушках будут уже электроны (область III, рис. I.10, в). В области III концентрация ловушек, заполненных дырками, будет постоянной, так как ϵ_F находится ниже ϵ_L и первая фаза рекомбинации (захват электрона ловушкой) будет протекать достаточно быстро.

Вторая фаза рекомбинации - заполнение ловушек, захвативших электрон, дырками из валентной зоны - будет протекать недостаточно быстро ввиду малой концентрации дырок в валентной зоне.

По мере опускания ϵ_F ниже ϵ_L вероятность второй фазы рекомбинации (захват дырки ловушкой) возрастает (τ_n снижается) и достигает постоянного значения. При этом время жизни будет постоянным τ_{no} (область IV, рис. I.10, в).

Таким образом, наибольшее время жизни достигается в полупроводниках, у которых проводимость близка к собственной.

На рис. I.11 приведена зависимость времени жизни носителей от температуры для полупроводника n-типа. Объяснение этой зависимости аналогично приведенному выше.

При температуре близкой к 0°K уровень Ферми лежит посредине между ϵ_C и ϵ_V и значительно выше ϵ_L . Все ловушки заполнены электронами и вероятность рекомбинации дырок велика. В результате время жизни мало и равно постоянной величине τ_p (область I, рис. I.11, б). При ϵ_F близком к ϵ_L концентрация заполненных электронами ловушек начинает уменьшаться и время жизни дырок очевидно возрастает (область II, рис. I.11, в).

Далее с ростом температуры (при переходе полупроводника к собственной электропроводности) время жизни снова будет падать из-за увеличения концентрации носителей в зонах, стремясь к постоянной величине, определяемой концентрацией ловушек.

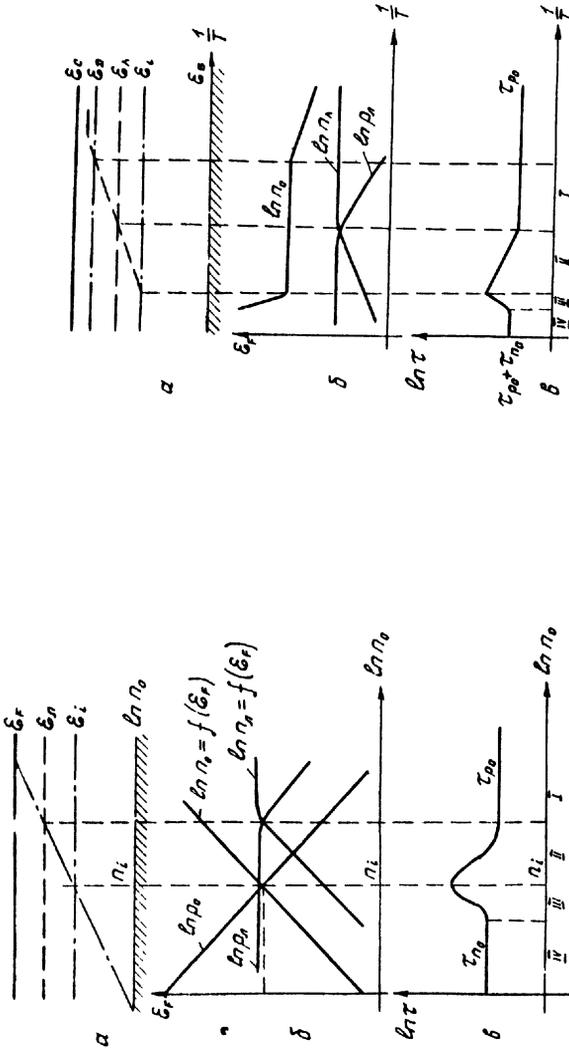


Рис. 1.10. Зависимость времени жизни носителей от концентрации противоложного типа носителей при равноволновом положении уровня Ферми; а - положение уровня Ферми; б - концентрация носителей в зонах и на ловушках; в - зависимость времени жизни от концентрации носителей

Рис. 1.11. Зависимость времени жизни носителей от температуры; а - положение уровня Ферми; б - концентрация электронов в зоне проводимости и на ловушках; в - зависимость времени жизни от температуры

С временем жизни тесно связаны такие параметры полупроводников, как длина и коэффициент диффузии.

Если в какой-либо локальной области полупроводника создана избыточная концентрация по сравнению с равновесной Δn_0 , то избыточные носители будут диффундировать вглубь полупроводника. При этом концентрация их на расстоянии x будет спадать за счет рекомбинации по экспоненциальному закону

$$\Delta n(x) = \Delta n_0 e^{-\frac{x}{L}}, \quad (1.21)$$

где L - длина диффузии неравновесных носителей.

Из (1.21) видно, что длина диффузии есть расстояние, на котором концентрация неравновесных носителей уменьшается в e раз.

Иначе, длина диффузии есть среднее расстояние, на которое неравновесные носители диффундируют за время жизни.

Диффузионная длина и время жизни связаны между собой соотношением

$$L = \sqrt{D\tau}, \quad (1.22)$$

где D - коэффициент диффузии, определяющий количество носителей, пересекающих в единицу времени единичную площадку, направленную перпендикулярно к градиенту концентрации при градиенте концентрации равном единице.

Коэффициент диффузии измеряется в $\text{м}^2/\text{сек}$ или $\text{см}^2/\text{сек}$.

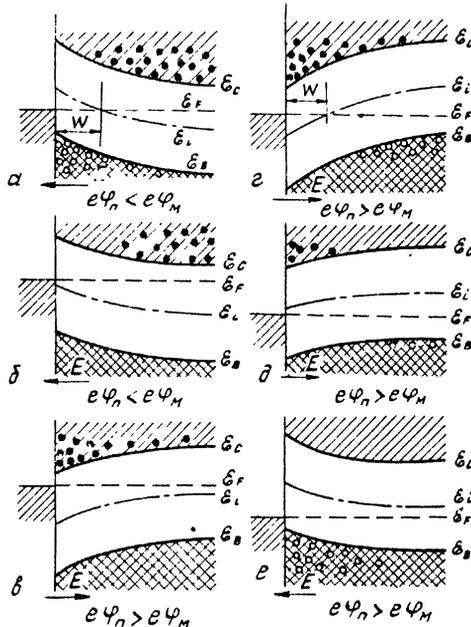
Подвижность носителей и коэффициент диффузии связаны между собой известным соотношением Эйнштейна

$$\mu = \frac{e}{kT} \cdot D. \quad (1.23)$$

2. Контактные явления в полупроводниках

Контакт металл-полупроводник. В зависимости от соотношения работ выхода металла и полупроводника в приконтактной области полупроводника может образоваться слой, обогащенный основными носителями, слой, обедненный основными носителями, и инверсный слой (слой с противоположным типом проводимости).

На рис. I.12 приведены энергетические зонные диаграммы контакта металл-полупроводник. Если работа выхода полупроводника η -типа меньше работы выхода металла $e\varphi_n < e\varphi_m$, то электроны будут переходить преимущественно из полупроводника в металл. При $e\varphi_n > e\varphi_m$ электроны будут переходить из металла в полупроводник.



Мет. *n*-полупров. Мет. *p*-полупров.

Рис. I.12. Энергетические зонные диаграммы контакта металл-полупроводник:

а-г - образование в полупроводнике инверсного слоя толщиной W ; б-д - образование в полупроводнике слоя, обедненного основными носителями; в-е - образование в полупроводнике слоя, обогащенного основными носителями

В первом случае приконтактная область полупроводника будет обедняться электронами, во втором - обогащаться.

Обеднение основными носителями заряда приконтактной области полупроводника n -типа соответствует понижению уровня Ферми.

Обогащение основными носителями приконтактной области соот-

ветствует повышению уровня Ферми. Так как в контактирующей системе металл-полупроводник уровень Ферми должен быть общим, то изменению концентрации носителей приконтактной области (изменению положения уровня Ферми) соответствует изгиб зон (рис. I.12).

Обеднение основными носителями приконтактной области и соответствующий ему изгиб зон могут быть настолько значительными, что вблизи контакта уровень Ферми опустится ниже середины запрещенной зоны. В этом случае приконтактная область толщиной λ изменит тип проводимости на противоположный.

Если при изгибе зон уровень Ферми не пересечет середину запрещенной зоны E_i , то приконтактный слой будет только обеднен основными носителями без инверсии типа проводимости.

Если $e\varphi_m$ меньше $e\varphi_n$, то электроны, переходящие преимущественно из металла в полупроводник, будут создавать в приконтактной области последний слой, обогащенный основными носителями (рис. I.12, в). Нетрудно видеть, что в результате этого перехода приконтактная область полупроводника приобретает положительный, а металл отрицательный потенциалы и внутреннее поле в приконтактной области направлено, как показано на рис. I.12, а.

При преимущественном переходе электронов из металла в полупроводник n -типа внутреннее поле будет направлено, как показано на рис. I.12, б.

Образование инверсного слоя протекает тем легче, чем больше разность работ выхода металла и полупроводника (чем больше изгиб зон), и чем слабее легирован полупроводник (чем ближе уровень Ферми расположен к середине запрещенной зоны).

Энергетические зонные диаграммы контакта металла с полупроводником p -типа приведены на рис. I.12, г, д, е. В этом случае также образуется обедненный, обогащенный и инверсный слои, образование которых объясняется аналогично приведенному выше.

В общем случае ВАХ контакта металл-полупроводник будет нелинейной и может обладать какими-то выпрямляющими свойствами. При рассмотрении выпрямления на контакте металл-полупроводник могут быть использованы диффузионная и диодная теории выпрямления.

Диффузионная теория выпрямления (теория толстого p - n -перехода) строится при следующих упрощающих предположениях.

1. Электрическое поле E в запирающем слое контакта постоянное.
2. Падение напряжения в объеме полупроводника пренебрежимо ма-

ло (все падение напряжения сосредоточено на запирающем слое).

3. Средняя длина свободного пробега носителей много меньше толщины слоя.

4. Падение потенциала в области запирающего слоя много меньше энергии ионизации примесных атомов.

5. Поверхностные состояния на границе раздела металл-полупроводник отсутствуют.

Последнее предположение означает, что движение носителей в запирающем слое может быть описано диффузионным уравнением

$$j = e \mu_n n E - e D_n \frac{dn}{dx}, \quad (1.24)$$

где $e \mu_n E$ - дрейфовая составляющая тока в запирающем слое;

$e D_n \frac{dn}{dx}$ - диффузионная составляющая.

Решение уравнения (1.24) может быть представлено в виде

$$j = e v_{gp} n_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) \right], \quad (1.25)$$

где $v_{gp} = \mu E$ - дрейфовая скорость носителей в запирающем слое;

$n_0 = n \exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right)$ - концентрация носителей в металле, имеющих энергии, достаточную для преодоления потенциального барьера на контакте металл-полупроводник;

U_k - контактная разность потенциалов.

Диффузионная теория удовлетворительно согласуется с экспериментом для полупроводников, имеющих низкую подвижность и малые концентрации основных носителей заряда.

Таковыми полупроводниками являются селен, закись меди и др. Экспериментальная проверка показала, что в селеновых и меднозакисных выпрямителях прямой участок ВАХ удовлетворительно согласуется с диффузионной теорией.

На обратном участке ВАХ сопротивление не следует (1.25), а начиная с некоторого предельного значения непрерывно уменьшается.

Диодная теория выпрямления (теория тонкого запирающего слоя).

При рассмотрении явлений в контакте металла с полупроводником, у которого носители имеют высокую подвижность, диффузионная теория не пригодна. В этом случае может быть использована диодная теория выпрямления.

В диодной теории принимается, что длина свободного пробега много больше толщины запирающего слоя. В этом случае носители проходят запирающий слой без рассеяния, как вакуумный промежуток в диоде. Отсюда название диодная теория.

Уравнение ВАХ контакта металл-полупроводник в соответствии с диодной теорией имеет вид

$$J = J_s \left[1 - \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) \right], \quad (I.26)$$

где ток насыщения

$$J_s = \frac{1}{4} e n v_0 \exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right).$$

В последнем выражении средняя тепловая скорость

$$v_0 = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

Из сравнения уравнений (I.25) и (I.26) видно, что в тонком запирающем слое ток насыщения J_s не зависит от приложенного напряжения

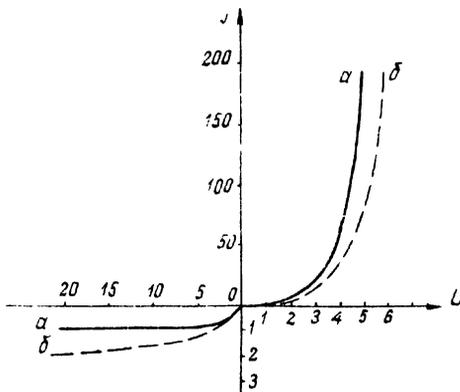


Рис. I.13. ВАХ контакта металл-полупроводник согласно диодной (а) и диффузионной (б) теории (в относительных единицах)

в отличие от обратной ветви ВАХ толстого перехода, в котором ток насыщения растет для запирающего направления и падает для пропускающего.

Ток насыщения в тонком запиорном слое больше во столько раз, во сколько тепловая скорость носителей U_0 больше их дрейфовой скорости $U_{др}$.

На рис. I.13 приведены ВАХ для тонкого и толстого запиорных слоев.

Электронно-дырочный переход. На рис. I.14 схематически приведены распределения примесей в p и n областях, распределение объемного заряда, потенциала и поля в p - n -переходе. На рис. I.15,а приведена зонная энергетическая диаграмма p - n -перехода при отсутствии внешнего смещения.

В условиях равновесия через p - n -переход идут четыре тока: два диффузионных тока дырок и электронов J_{pD} и J_{nD} и два дрейфовых тока дырок и электронов J_{pE} и J_{nE} . При отсутствии внешнего смещения результирующий ток через p - n -переход равен нулю

$$J_{pD} + J_{nD} + J_{pE} + J_{nE} = 0.$$

Диффузионные токи электронов из n -области в p и дырок из p -области в n пропорциональны градиентам их концентрации

$$J_{nD} = e D_n \text{grad } n;$$

$$J_{pD} = - e D_p \text{grad } p.$$

В результате диффузионного перемещения носителей в n -области (на границе p - n -перехода) создается положительный объемный заряд, образованный положительными ионами доноров, а в p -области отрицательный объемный заряд, образованный ионизированными акцепторами (рис. I.14,а,б,в). В результате создается запиорный слой p - n -перехода толщиной $W = W_p + W_n$ (рис. I.14,г) и n -область приобретает положительный потенциал, p -область - отрицательный потенциал. Разность потенциалов p и n -областей φ_k называется контактной разностью потенциалов и определяется, как известно, выражением

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p \cdot n_n}{n_i^2}. \quad (I.27)$$

В электрическом поле E запиорного слоя создаются дрейфовые токи электронов и дырок J_{nE} и J_{pE} . Величины этих токов пропор-

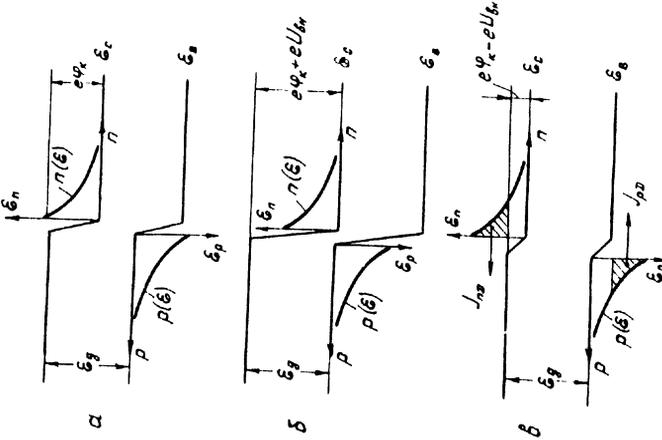


Рис.1.15. p-n-переход:

а - при внешнем смещении, равном нулю; б - при обратном смещении; в - при прямом смещении ($n(\xi)$ и $p(\xi)$ - распределение электронов и дырок в зоне проводимости и в валентной зоне n - и p -полупроводника)

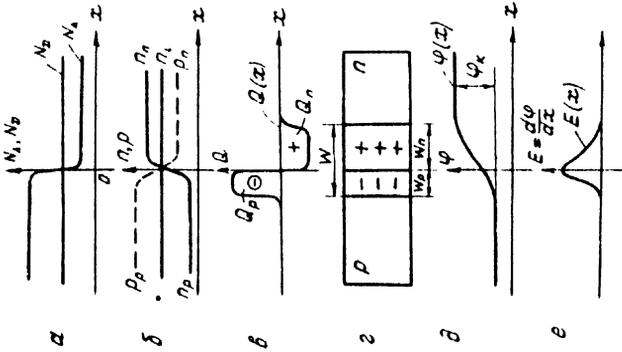


Рис.1.14. Распределение в p-n-переходе:

а - примесей; б - концентрации носителей; в - объемного заряда; д - потенциала; е - поля

по нормали к градиенту потенциалов

$$J_{nE} = e \mu_n n \operatorname{grad} \varphi ;$$

$$J_{pE} = e \mu_p p \operatorname{grad} \varphi .$$

Ход потенциалов в p-n-переходе определится из решения уравнений Пуассона, которые могут быть записаны в виде

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e^2}{\epsilon} n_n \quad \text{при } 0 < x < w_n ; \quad (\text{I.28})$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = - \frac{4\pi e^2}{\epsilon} p_p \quad \text{при } -w_p < x < 0 . \quad (\text{I.29})$$

В этих уравнениях объемные заряды записаны в виде

$$\rho = e N_D = e n_n \quad \text{при } 0 < x < w_n ;$$

$$\rho = -e(N_A - N_D) = -e p_p \quad \text{при } -w_p < x < 0 .$$

Уравнения Пуассона решаются при следующих граничных условиях

$$\text{при } x = w_n ; \quad \varphi = \varphi_k ; \quad \frac{d\varphi}{dx} = 0 ;$$

$$\text{при } x = -w_p ; \quad \varphi = 0 ; \quad \frac{d\varphi}{dx} = 0 .$$

Решения (I.28) и (I.29), удовлетворяющие этим граничным условиям, могут быть записаны

$$\varphi = \frac{2\pi e^2 n_n}{\epsilon} (w_n - x)^2 \quad \text{при } 0 < x < w_n ; \quad (\text{I.30})$$

$$\varphi = \varphi_k - \frac{2\pi e^2 p_p}{\epsilon} (w_p + x)^2 \quad \text{при } -w_p < x < 0 . \quad (\text{I.31})$$

Так как в точке $x = 0$ оба решения должны давать одни и те

те значения φ и $\frac{d\varphi}{dx}$, то, приравнявая производные $\frac{d\varphi}{dx}$ уравнений (I.30) и (I.31) при $x = 0$, получим

$$\frac{W_n}{W_p} = \frac{p_p}{n_n}.$$

Отсюда следует, что отношение W_n и W_p к полной толщине слоя объемного заряда (толщине заборного слоя) $W = W_n + W_p$ определится выражениями

$$\frac{W_n}{W} = \frac{p_p}{n_n + p_p}; \quad (I.32)$$

$$\frac{W_p}{W} = \frac{n_n}{n_n + p_p}. \quad (I.33)$$

Из (I.32) и (I.33) видно, что толщина слоя объемного заряда тем больше, чем меньше концентрация основных носителей в данной области

$$W_n = W \frac{p_p}{n_n + p_p}; \quad W_p = W \frac{n_n}{n_n + p_p}$$

и при $n_n \ll p_p$ $W_n \cong W$;

при $p_p \ll n_n$ $W_p \cong W$.

Таким образом, если одна из областей p-n-перехода легирована значительно сильнее другой, то практически весь заборный слой будет распространен в слабо легированную область.

Поле контактной разности потенциалов проникает на большую глубину в ту область, где концентрация носителей меньше. Действительно, приравнявая значения φ при $x = 0$ и преобразовывая, можно получить

$$\varphi_n = \varphi_k \cdot \frac{p_p}{n_n \cdot p_p}; \quad (I.34)$$

$$\varphi_p = \varphi_k \cdot \frac{n_n}{n_n + p_p}, \quad (I.35)$$

где $\varphi_k = \varphi_n + \varphi_p$, а φ_n и φ_p соответственно потенциалы n - и p -областей.

Из уравнений (I.34) и (I.35) видно, что если одна из областей, например n , легирована значительно меньше, чем p , т.е. $n_n \ll p_p$, то $\varphi_n \approx \varphi_k$, т.е. поле контактной разности потенциалов проникает на большую глубину в ту область, в которой меньше концентрация основных носителей.

При приложении внешнего смещения к p - n -переходу высота потенциального барьера φ_k будет изменяться: возрастать при обратном смещении (φ_k складывается с U_{ϵ_n} , как на рис. I.15, б) и уменьшаться при прямом смещении на величину $\varphi_k - U_{\epsilon_n}$ (рис. I.15, в).

В первом приближении можно считать, что концентрация основных носителей, например электронов в зоне проводимости, возрастает по экспоненциальному закону в направлении к дну зоны проводимости. Аналогично концентрация дырок возрастает по экспоненциальному закону в направлении к потолку валентной зоны (рис. I.15).

Поэтому при понижении высоты потенциального барьера p - n -перехода (прямое смещение) диффузионные составляющие токов будут также возрастать по экспоненциальному закону.

Дрейфовые составляющие токов p - n -перехода при этом будут уменьшаться ввиду уменьшения поля p - n -перехода.

При повышении высоты потенциального барьера (обратное смещение) диффузионные токи резко падают. Дрейфовые составляющие токов при этом остаются практически постоянными.

Если считать, что p - n -переход узкий и в нем отсутствует рекомбинация, концентрация основных носителей p_p и n_n значительно превышает n_i и все падение внешнего напряжения сосредоточено на запиорном слое p - n -перехода, то ВАХ p - n -перехода может быть записана в виде

$$j = e \left(\frac{D_p \cdot p_n}{L_p} + \frac{D_n \cdot n_p}{L_n} \right) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (I.36)$$

где
$$J_s = e \left(\frac{D_p \cdot p_n}{L_p} + \frac{D_n \cdot n_p}{L_n} \right). \quad (I.37)$$

J_s - ток насыщения.

Уравнение (I.36) примет вид

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (I.38)$$

Из формулы (I.37) видно, что ток насыщения J_s будет тем меньше, чем ниже концентрация неосновных носителей p_n и n_p .

Так как

$$p_n \cdot n_n = n_i^2; \quad n_p \cdot p_p = n_i^2,$$

то

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}; \quad n_p = \frac{n_i^2}{p_p}.$$

Из последних выражений видно, что для уменьшения тока насыщения необходимо увеличивать концентрацию основных носителей в p - и n -областях.

В полупроводнике, где примеси полностью ионизированы

$$p_n \sim n_p \sim n_i^2 \sim e^{-\frac{E_g}{kT}},$$

где E_g - ширина запрещенной зоны.

Обратный ток p - n -перехода J_s , величина которого пропорциональна концентрации неосновных носителей p_n и n_p , будет резко возрастать с температурой по закону

$$J_s \sim \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right).$$

Поэтому с ростом температуры выпрямляющие свойства p - n -перехода будут ухудшаться и, когда концентрация неосновных носителей приблизится к концентрации основных (обе области p и n приобретут собственную проводимость), потенциальный барьер на границе p - и n -областей исчезнет и выпрямление прекратится. Предельная температура, при которой p - n -переход теряет свои выпрямляющие свойства, будет тем выше, чем больше значения E_g , φ_k , n_n и p_p .

Нетрудно видеть, что в уравнении (I.38) при прямых смещениях можно пренебречь единицей, так как в этом случае

$$\exp \frac{eU}{kT} \gg 1 \quad \text{и} \quad J \approx J_s \exp \frac{eU}{kT}.$$

При обратных смещениях можно пренебречь экспоненциальным членом и $J \approx J_s$.

При увеличении обратного смещения область объемного заряда W и величина объемного заряда в p - и n -областях будут увеличиваться. Это изменение величины объемного заряда ΔQ при изменении напряжения на ΔU эквивалентно некоторой электрической емкости, называемой запорной или барьерной емкостью p - n -перехода

$$C_v = \frac{dQ}{dU} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta U}.$$

Изменение напряжения на p - n -переходе на ΔU приведет к изменению концентрации неравновесных носителей в p - и n -областях, т.е. к изменению заряда в p - и n -областях на величину ΔQ . Это изменение заряда в p - и n -областях (не в p - n -переходе), вызванное изменением напряжения, можно также рассматривать как действие некоторой электрической емкости, называемой диффузионной емкостью

$$C_{\text{диф.}} = \frac{dQ}{dU} = \frac{\Delta Q}{\Delta U}.$$

При повышении обратного напряжения напряженность поля в p - n -переходе будет возрастать. С ростом поля в p - n -переходе носители могут ускоряться полем до такой степени, что они будут ионизировать атомы полупроводника с образованием пар электрон-дырка. Ионизированные носители в свою очередь будут ускоряться, создавая дополнительные пары и вызывая тем самым эффект лавинного умножения носителей в p - n -переходе.

Лавинообразное умножение носителей в p - n -переходе приводит

к резкому возрастанию тока через р-п-переход (рис. I.16).

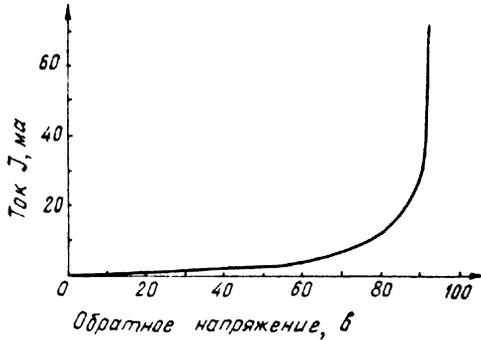


Рис. I.16. Рост тока в р-п-переходе при лавинообразном умножении носителей

Коэффициент умножения носителей $M(U)$ определяется следующим эмпирическим выражением

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{np}}\right)^n}, \quad (I.39)$$

где U_{np} — напряжение пробоя (рис. I.16);

n — показатель степени, величина которого зависит от материала полупроводника и от того, что является доминирующим в процессе ионизации: электроны или дырки.

3. Активные элементы полупроводниковых микросхем

В настоящей главе рассматриваются не только активные элементы, которые уже нашли применение в полупроводниковых микросхемах, но также и те активные элементы, которые в принципе могут быть использованы в полупроводниковых микросхемах, хотя они еще не нашли широкого применения.

Полупроводниковые диоды, применяемые в микросхемах, как правило, несимметричны. Это объясняется тем, что линейные размеры p - и n -областей резко различаются. Например, длина p -области W_p много меньше длины n -области W_n и концентрация основных носителей в p -области P_p много больше концентрации в n -области n_n . Если условно принять одну из областей, например n -область, за базовую, то диоды, для которых выполняется условие $\frac{W_n}{L_p} \gg 1$, называются диодами с длинной базой. При $\frac{W_n}{L_p} \ll 1$ диод с короткой базой. Здесь L_p - длина диффузии инжектированных в базу дырок.

Рассмотрим распределение токов в базовой области диодов с длинной базой и с короткой базой при низком и высоком уровне инжекции.

Уровень инжекции δ определится выражением

$$\delta = \frac{\Delta p(0)}{n_0},$$

где $\Delta p(0)$ - концентрация избыточных дырок на границе n -области;

n_0 - равновесная концентрация электронов в базе диода.

В условиях квазинейтральности, когда $\Delta n(x) \cong \Delta p(x)$ (рис. I.17), низкий уровень инжекции $\delta \ll 1$ означает, что $\Delta n(x) \ll n_0$, т.е. распределение электронов в базе почти не нарушено, поэтому удельная проводимость практически неизменна на всем протяжении базы и электрическое поле пренебрежимо мало, так как объемные заряды в базе, определяемые разностью $\Delta n - \Delta p$, ничтожны. Поэтому движение дырок, инжектированных в базу при низком уровне инжекции, будет чисто диффузионное.

В этих условиях ВАХ диода с достаточным приближением описывается уравнением (I.38).

При высоких уровнях инжекции, когда $\delta > 1$, в работе диода появляются следующие особенности:

1. Заметно возрастает концентрация инжектированных носителей вблизи p - n -перехода (модулированный участок), поэтому с ростом уровня инжекции повышается удельная проводимость базы.

2. Снижается коэффициент инжекции γ , который характеризует относительную величину главной составляющей тока (в рассматриваемом

случае дырочной) в общем токе через p-n-переход

$$\gamma = \frac{J_p(0)}{J(0)} = \frac{J_p(0)}{J_p(0) + J_n(0)}. \quad (I.40)$$

3. Возрастает дрейфовая составляющая дырочного тока в базе на участке $x \approx L_p$.

Рассмотрим эти особенности подробнее. На рис. I.18 приведены кривые, иллюстрирующие зависимость изменения базового сопротивления от уровня инжекции δ при различной длине базы $\frac{W_n}{L_p}$.

При низком уровне инжекции в первом приближении определяется выражением

$$\gamma = 1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \cdot \frac{W_n}{L_p}. \quad (I.41)$$

При высоких уровнях инжекции коэффициент инжекции снижается и определяется зависимостью

$$\gamma = 1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \cdot \frac{W_n}{L_p} (1 + \delta), \quad (I.42)$$

где σ_b - удельная проводимость базы n-типа;

σ_a - удельная проводимость эмиттера p-типа.

С ростом уровня инжекции объемные заряды, определяемые разностью $\Delta p - \Delta n \neq 0$, дают заметное электрическое поле, в котором дрейфуют инжектированные в базовую область дырки на участки протяженностью L_p .

Величина дрейфовой составляющей тока инжектированных в базу диода дырок J_{pE} может быть определена следующим образом.

Электронный ток J_n в базе диода вблизи p-n-перехода значительно меньше дырочного и в первом приближении можно считать $J_n = 0$

$$J_n = J_{nD} + J_{nE} = 0 \quad (\text{вблизи p-n-перехода в базе диода})$$

$$J_n = en\mu_n \cdot E + eD_n \cdot \frac{dn}{dx} = 0.$$

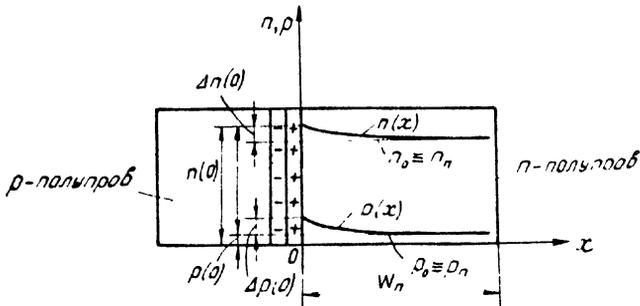


Рис. I.17. Распределение электронов и дырок в базе диода W_n в условиях квазинейтральности $\Delta n(x) = \Delta p(x)$

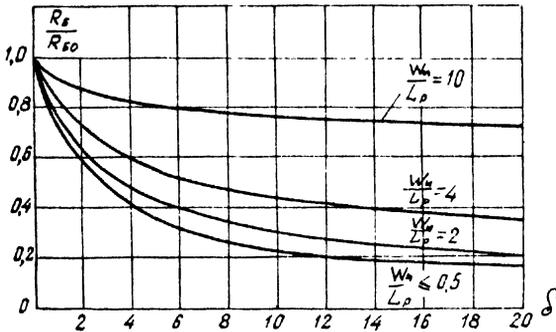


Рис. I.18. Снижение базового сопротивления диода с ростом уровня инжекции при различной длине базы:

R_{b0} - сопротивление базы при нулевом уровне инжекции; R_b - сопротивление базы при конечном уровне инжекции

Подставляя в последнее выражение значение

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n ,$$

получим выражение для напряженности поля в базе диода

$$E = - \frac{kT}{en} \cdot \frac{dn}{dx} .$$

Дрейфовая составляющая дырочного тока в базе определится выражением

$$J_{pE} = e p \mu_p E = e p \mu_p \left(- \frac{kT}{en} \cdot \frac{dn}{dx} \right); \quad (I.43)$$

$$J_{pE} = - e p \frac{D_p}{n} \cdot \frac{dn}{dx} .$$

В последнем уравнении можно считать

$$p = p_n + \Delta p \cong \Delta p \quad , \text{ так как } p \gg p_n , \quad (I.44)$$

где p - концентрация дырок в базе вблизи p - n -перехода ;
 p_n - равновесная концентрация.

В условиях квазинейтральности

$$\frac{dn}{dx} \cong \frac{dp}{dx} \quad \text{и} \quad \Delta n \cong \Delta p ,$$

тогда

$$n = n_n + \Delta n \cong n_n + \Delta p . \quad (I.45)$$

Учитывая соотношение (I.44) и (I.45), выражение (I.43) можно переписать в виде

$$J_{pE} = - e \left(D_p \cdot \frac{\Delta p}{n_n + \Delta p} \right) \frac{dp}{dx} , \quad (I.46)$$

т.е. ценой ряда допущений дрейфовая составляющая дырочного тока в базе выражена в форме, аналогичной диффузионной составляющей. Тогда полный ток дырок в базе

$$J_p = J_{pE} + J_{pD}$$

определяется выражением

$$J_p = -e \left(D_p \frac{\Delta p}{n_n + \Delta p} \right) \frac{dp}{dx} - e D_p \frac{dp}{dx}.$$

Последнее выражение преобразовывается к виду

$$J_p = -e \left[D_p \left(1 + \frac{\Delta p}{n_n + \Delta p} \right) \right] \cdot \frac{dp}{dx}, \quad (I.47)$$

где выражение в квадратных скобках можно считать неким эквивалентным коэффициентом диффузии

$$D_{p\text{экв}} = \left[D_p \left(1 + \frac{\Delta p}{n_n + \Delta p} \right) \right].$$

Величина $D_{p\text{экв}}$ зависит от уровня инжекции, коэффициента γ и т.п. Поэтому функция (I.47) очень сложна.

Однако при высоком уровне инжекции $\Delta p(0) \gg n_n$ вблизи границы перехода при $x < L_p$.

$$D_{p\text{экв}} \cong 2D_p$$

Действительно, при $\Delta p(0) \gg n_n$

$$1 + \frac{\Delta p(0)}{\Delta p(0) + n_n} \cong 2,$$

т.е.

$$D_{p\text{экв}} = D_p \left(1 + \frac{\Delta p}{n_n + \Delta p} \right) \cong 2D_p.$$

Так как

$$J_p = J_{pE} + J_{pD} \cong -e 2D_p \frac{dp}{dx},$$

где

$$J_{pD} = -e D_p \frac{dp}{dx},$$

тогда

$$J_{pE} = J_p - J_{pD} = -e2D_p \frac{dp}{dx} = -eD_p \frac{dp}{dx}; \quad (I.48)$$

$$J_{pE} \approx -eD_p \frac{dp}{dx},$$

т.е. при высоких уровнях инжекции, когда $\Delta p(0) \gg n_n$, дрейфовая составляющая дырочного тока почти равна диффузионной составляющей. Поэтому при больших уровнях инжекции полный дырочный ток можно рассчитывать по формуле (I.38), но ток необходимо удваивать, так как по (I.38) рассчитывается только диффузионная составляющая тока через p-n-переход. Формула выведена в предположении, что дрейфовая составляющая тока через p-n-переход отсутствует.

Распределение токов в базе диода зависит от уровня инжекции и относительной толщины базы W/L_p . Имеются следующие общие особенности распределения токов в диодах с длинной и короткой базой при высоком и низком уровнях инжекции.

1. На границе перехода, где напряженность поля $E = 0$, обращается в нуль дрейфовая составляющая токов.
2. Диффузионные составляющие электронного и дырочного токов противоположны по направлению и близки по величине.
3. На границе перехода электронные составляющие диффузионного тока становятся положительными, так как должна осуществляться инжекция электронов из базовой области в эмиттирующую. Поэтому кривая J_{nE} претерпевает вблизи перехода резкий излом, а кривая $n(x)$ будет иметь максимум.
4. Так как распределение электронов и дырок в базе диода должно различаться, то образуется некоторый положительный объемный заряд, без которого не имели бы места дрейфовые составляющие токов J_{nE} и J_{pE} в базе.

На рис. I.19 приведено распределение токов в базе диода при низком уровне инжекции для длинной (а) и короткой (б) баз. На рис. I.19,а диффузионные токи электронов и дырок J_{nE} и J_{pE} примерно равны друг другу, так как распределение электронов и дырок $n(x)$ и $p(x)$ в условиях квазинейтральности почти одинаково (к инжекти-

рованным дыркам должно подойти такое же количество электронов). В результате образовавшихся градиентов концентрации $\frac{dp}{dx} \approx \frac{dn}{dx}$ возникнут два одинаковых, но противоположно направленных тока электронов и дырок (в предположении, что $D_p = D_n$

$$J_{pD} = e D_p \frac{dp}{dx} ;$$

$$J_{nD} = -e D_n \frac{dn}{dx} .$$

Дрейфовые токи при малых уровнях инжекции малы, так как объемный заряд в базе, созданный в результате неравенства $\Delta p(x)$ и $\Delta n(x)$, ничтожно мал и поле, созданное этим зарядом, пренебрежимо мало.

Основную роль играет поле, созданное за счет омического падения напряжения вдоль базы. В этом поле дрейфуют инжектированные дырки и основные носители - электроны. При этом

$$J_{pE} = e \mu_p p E ;$$

$$J_{nE} = e \mu_n n E .$$

Но при низких уровнях инжекции $p \ll n$, поэтому $J_{nE} \gg J_{pE}$ (рис. I.19, а). Иначе говоря, при низком уровне инжекции длинная база является обычным омическим сопротивлением, в котором главную роль играют дрейфовые движения основных носителей (электронов).

Дырочная составляющая тока велика только вблизи p - n -перехода и пренебрежимо мала на расстояниях $x > 2 \div 3 L_p$. Вблизи p - n -перехода полный ток близок к дырочному, который на расстояниях $x < 2 \div 3 L_p$ является чисто диффузионным, а на расстояниях $x > 2 \div 3 L_p$ полный ток диода определяется дрейфовым током основных носителей. При этом взаимная компенсация дрейфовой и диффузионной составляющих электронного тока будет незначительной на всем протяжении базы, кроме области $x < 2 \div 3 L_p$.

В случае короткой базы и низкого уровня инжекции (рис. I.19, б) градиенты концентрации дырок и электронов возрастают при прочих равных условиях. Это приводит к возрастанию диффузионных составляющих токов и соответствующему возрастанию общего тока (база короче).

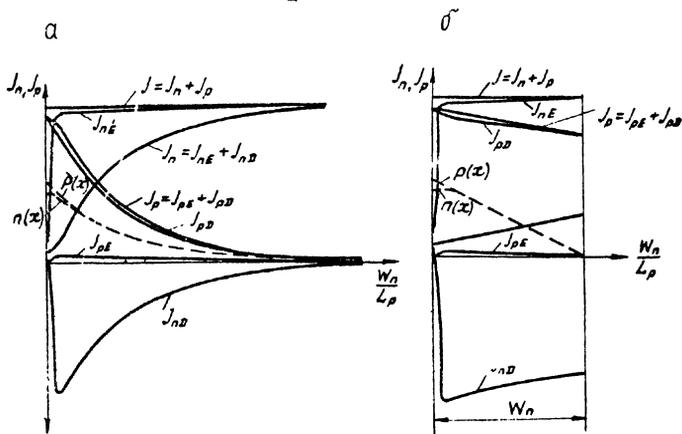


Рис.1.19. Распределение токов в диоде при низком уровне инжекции: а - для длинной базы; б - для короткой базы

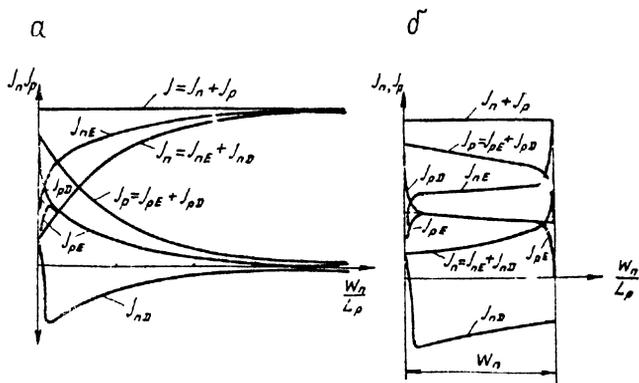


Рис.1.20. Распределение токов в диоде при высоком уровне инжекции: а - для длинной базы; б - для короткой базы

Возрастание диффузионной составляющей электронного тока при такой же дрейфовой составляющей электронного тока, как и в случае длинной базы, приводит к снижению общего электронного тока, так как дрейфовая и диффузионная составляющие электронного тока противоположно направлены.

Таким образом, в случае короткой базы дрейфовая и диффузионная составляющие электронного тока в значительной степени взаимно компенсируются. Степень компенсации тем больше, чем короче база. В случае короткой базы основную роль играет диффузионная составляющая тока инжектированных дырок. Роль этой составляющей тем больше, чем короче база.

При высоких уровнях инжекции (рис. I.20) наблюдаются следующие особенности. Диффузионные составляющие токов дырок и электронов также равны друг другу (рис. I.20, а). При этом дырочный ток вблизи р-п-перехода уже не равен полному току, так как в этом случае начинает играть заметную роль инжекция из базы в эмиттер (с ростом уровня инжекции коэффициент инжекции $\gamma = \frac{J_p(0)}{J(0)}$ уменьшается), т.е. относительная величина J_{pD} по сравнению с J будет значительно меньше, чем для случая малого уровня инжекции.

Вблизи р-п-перехода резко возрастает дрейфовая составляющая дырочного тока J_{pE} и она становится одного порядка с диффузионной составляющей тока дырок J_{pD} . Поэтому полную составляющую дырочного тока вблизи р-п-перехода

$$J_p = J_{pE} + J_{pD}$$

можно получить, если экстраполировать кривую J_{pE} или J_{pD} до пересечения с осью ординат, а затем удвоить ординату.

Дрейфовый ток электронов на модулированном участке базы $x < 1 + 2L_p$ резко снижается по сравнению с J_{nE} для низких уровней инжекции. Это объясняется тем, что концентрация дырок и электронов на модулированном участке базы при высоких уровнях инжекции — величины одного порядка. Поэтому J_{nE} составляет примерно половину всего дрейфового тока вблизи р-п-перехода.

При высоких уровнях инжекции и короткой базе (рис. I.20, б) возрастает градиент концентрации дырок и электронов по сравнению с длинной базой. Возрастает диффузионная составляющая электронов и дырок в базе. Так как дрейфовая и диффузионная составляющие тока

электронов \int_{nE} и \int_{nD} противоположно направлены, то с возрастанием \int_{nD} падает общий электронный ток \int_n . Здесь, в отличие от длинной базы, дрейфовая и диффузионная составляющие электронного тока взаимно компенсируются.

Рассмотрим некоторые разновидности полупроводниковых диодов.

Туннельные диоды. В этих диодах носители преодолевают p - n -переход за счет туннельного эффекта. На рис. I.2I приведена ВАХ туннельного диода. Из рисунка видно, что туннельный диод имеет прямой участок ВАХ N -типа с отрицательной проводимостью на участке A - B . На обратной ветви отсутствует участок насыщения, более того, обратные токи резко растут с повышением обратного напряжения.

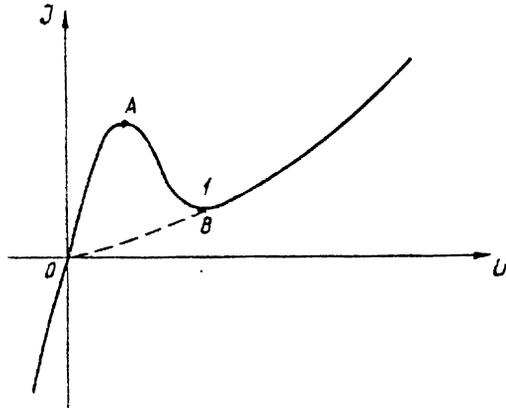


Рис. I.2I. ВАХ туннельного диода:
 A - B участок с отрицательной проводимостью на прямой ветви ВАХ

Туннельные диоды могут быть использованы для усиления электромагнитных колебаний, их генерирования, а также используются в качестве ключа (прибора с двумя устойчивыми состояниями). Рабочее напряжение на туннельных диодах обычно не превышает 0,5 в, т.е. прибор может работать при малых напряжениях источника питания. Туннельные диоды могут работать в широком диапазоне темпера-

тур (от низких -200°C до высоких $+300 + 400^{\circ}\text{C}$). Широкий диапазон рабочих температур объясняется тем, что туннельные диоды изготавливаются из сильно легированных, вырожденных полупроводниковых материалов, у которых слабая зависимость $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (см. рис. I.8)

Основным недостатком туннельных диодов является то, что они неуправляемы (двухполюсные приборы). Кроме того, туннельные диоды имеют относительно высокий уровень шумов.

Рассмотрим принцип действия туннельного диода. С ростом концентрации легирующей примеси уровень ферми смещается в направлении к дну зоны проводимости для p -полупроводников и к потолку валентной зоны для n -полупроводников. У вырожденных полупроводников уровень ферми смещается в свободную зону для p -полупроводника и в валентную зону для n -полупроводника. При этом толщина запирающего слоя p - n -перехода снижается (I.32, I.33), а потенциальный барьер Φ_k повышается (I.27). Ширина запрещенной зоны E_g обычно снижается. Уменьшение толщины запирающего слоя в туннельном диоде до величины

$W < 100 \text{ \AA}$ приводит к тому, что электроны могут туннелировать сквозь потенциальный барьер p - n -перехода, а не диффундировать над потенциальным барьером, как в обычных диодах.

На рис. I.22 приведены зависимости плотности состояний $N(E)$ и $P(E)$ в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно, функции ферми $f_n(E)$ и $f_p(E)$ и плотность состояний, занятых электронами $n(E)$ и дырками $p(E)$ в зависимости от энергии (энергия дырок возрастает вниз, электронов - вверх).

При внешнем смещении в прямом направлении (рис. I.23) высота потенциального барьера будет снижаться. Электроны из зоны проводимости p -полупроводника будут туннелировать сквозь узкий потенциальный барьер на свободные уровни дырок в валентной зоне n -полупроводника. При этом туннельный ток будет наибольшим, когда максимум на кривой $n(x)$ станет против максимума на кривой $p(x)$. При дальнейшем повышении внешнего смещения в прямом направлении максимумы (точка p_{\max} и точка n_{\max}) разойдутся, что будет соответствовать уменьшению туннельного тока и при еще большем повышении прямого смещения, когда E_c станет против E_v , туннельный ток прекратится, точка I на ВАХ (см. рис. I.21) и дальнейшее повышение тока с ростом внешнего смещения будут определяться диффузионными токами, как в обычном полупроводниковом диоде.

При обратном смещении (рис. I.24) обратная ветвь ВАХ туннель-

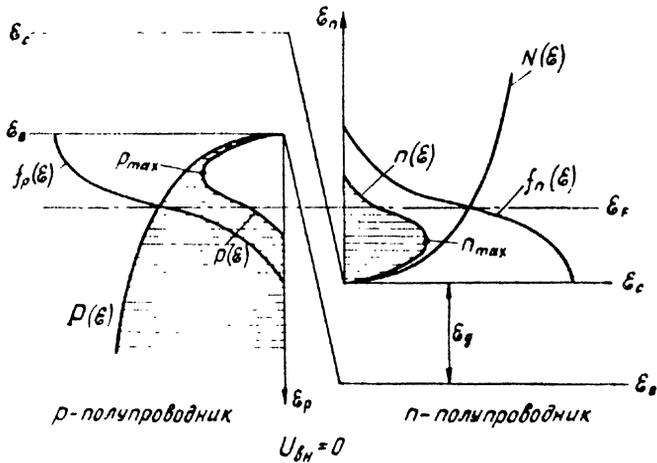


Рис. I.22. Энергетическая зонная диаграмма р-п-перехода:
 $N(\xi)$, $P(\xi)$ — плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне; $n(\xi)$, $p(\xi)$ — плотность состояний, занятых электронами и дырками

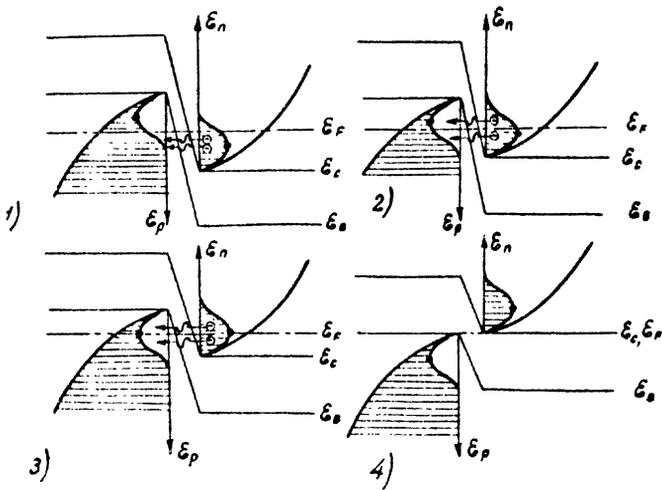


Рис. I.23. Туннелирование носителей сквозь р-п-переход туннельного диода при прямом смещении

ного диода определяется исключительно токами туннелирования. При этом туннельные токи резко возрастут с повышением обратного напряжения.

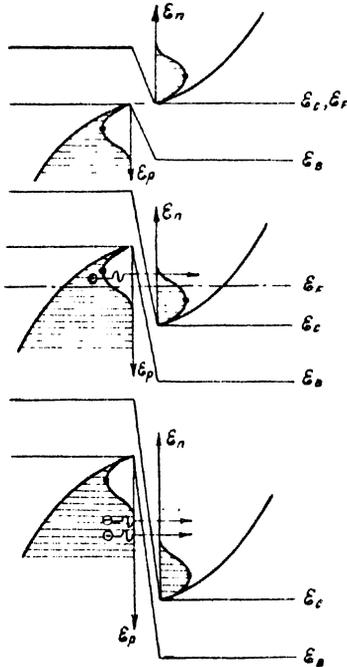


Рис. I.24. Туннелирование электронов сквозь p-n-переход при обратном смещении

жения. Ток при обратном смещении обусловлен переходом электронов из валентной зоны p-полупроводника на свободные уровни в зоне проводимости n-полупроводника. Так как при обратном смещении плотность стоящих друг против друга уровней велика (электронов в валентной зоне и свободных уровней в зоне проводимости), то и токи, обусловленные этими туннельными переходами, также велики (рис. I.21 и I.24).

Как указывалось выше, с ростом концентрации легирующих примесей высота потенциального барьера $e \cdot \varphi_k$ p-n-перехода будет возрастать p- и n-области туннельного диода могут быть легированы так, что ϵ_c на зонной энергетической диаграмме будет находиться против ϵ_v при отсутствии внешнего смещения (рис. I.25). Диод, имеющий такую зонную энергетическую диаграмму, называется обращенным туннельным диодом. ВАХ обращенного туннельного диода приведена на рис. I.26. У обращенного туннельного диода при прямом смещении туннельные токи отсутствуют, так как уровни электронов в зоне проводимости p-полупроводника находятся против запрещенной зоны и прямая ветвь ВАХ определяется диффузионными токами, как в обычном диоде. При обратном смещении появляются туннельные токи (рис. I.25).

Обращенные туннельные диоды используются в качестве детекторов слабых сигналов СВЧ диапазона, а также как вентили в схемах с малыми напряжениями источников питания.

Варикапы (параметрические диоды).

Параметрическими называются системы, у которых реактивные параметры (сопротивления) меняются во времени. Реактивные сопротивления, как известно, не вносят в усилительные устройства тепловых шумов, поэтому параметрические усилители имеют низкий уровень шумов.

Варикапами называются диоды, запорная емкость которых используется в качестве управляемого реактивного сопротивления параметрического усилителя.

Запорная емкость C_z имеет относительно высокую добротность, малый температурный коэффициент, низкий уровень шумов и не зависит от частоты вплоть до миллиметрового диапазона. В параметрических системах на варикапах используется изменение емкости в зависимости от напряжения для усиления и генерирования колебаний

$$C_z \cong \frac{\Delta Q}{\Delta U}.$$

Допустим, что контур, в котором возбуждены колебания, имеет конденсатор, обкладки которого можно сдвигать и раздвигать. При этом, раздвигая обкладки, мы будем затрачивать энергию. Если раздвинуть обкладки при максимальном напряжении на конденсаторе, то величина емкости конденсатора уменьшится. При этом заряд Q на обкладках конденсатора останется прежним, а напряжение на обкладках должно возрасти (рис. I.27). Таким образом, энергия, затрачен-

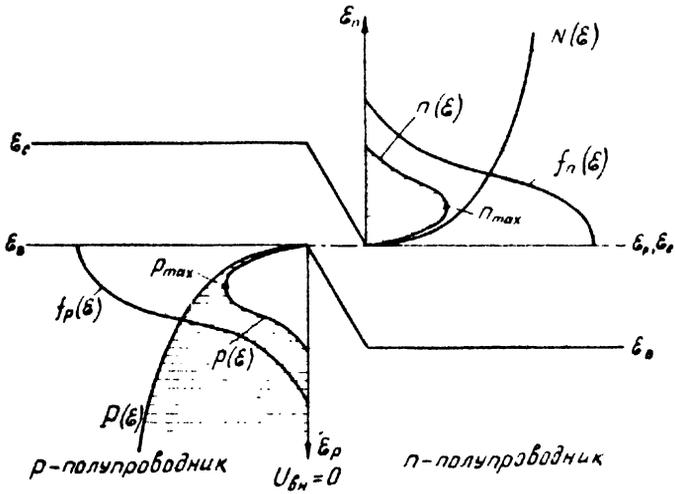


Рис. I.25. Зонная энергетическая диаграмма р-п-перехода обращенного туннельного диода

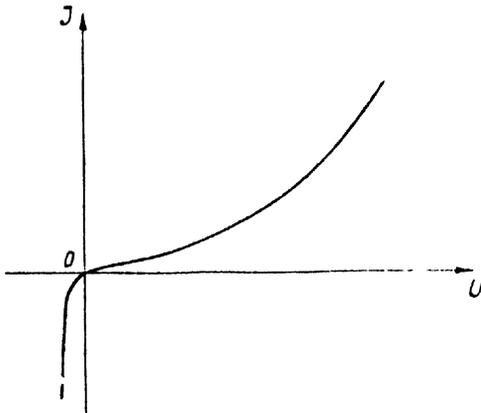


Рис. I.26. ВАХ обращенного туннельного диода

ная на раздвигание обкладок конденсатора, превратится в энергию

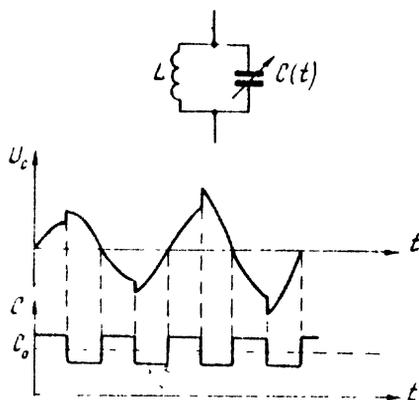


Рис. I.27. Возрастание амплитуды напряжения в колебательном контуре при изменении емкости р-п-перехода варикапа

электрического поля колебательной системы. Если вернуть обкладки конденсатора в исходное состояние, когда напряжение на нем переходит через нулевое значение и заряды на обкладках отсутствуют, то это перемещение обкладок произойдет без отдачи энергии колебательной системой. Значит, в колебательную систему можно подкачивать энергию от внешнего источника, если раздвигать пластины конденсатора, когда напряжение на нем максимальное, и сдвигать, когда напряжение на нем равно нулю. В результате в колебательной системе будет возрастать амплитуда и мощность колебаний.

Изменение емкости р-п-перехода C_p варикапа осуществляется от специального генератора переменного напряжения, частота которого должна быть в два раза больше усиливаемого напряжения (рис. I.27).

4. Транзисторы

Плоскостной транзистор схематически изображен на рис. I.28. На этом же рисунке приведены его зонная энергетическая диаграмма и распределение токов.

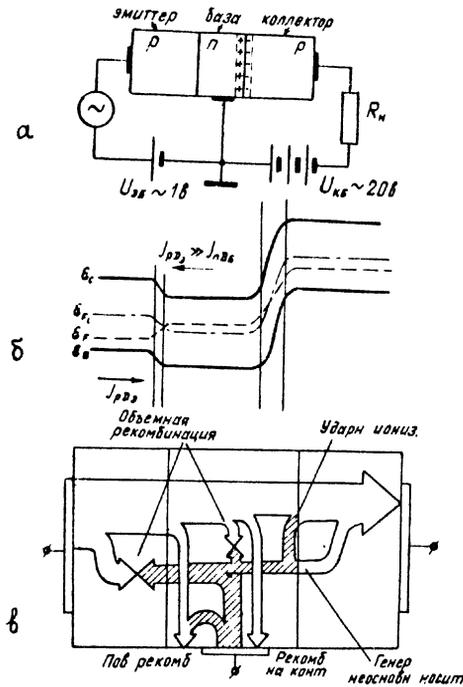


Рис.1.28. Схема транзистора $p-n-p$ (а); зонная энергетическая диаграмма транзистора (б); распределение токов в транзисторе (в)

Транзистор может работать в четырех основных режимах.

1. Активный режим: эмиттерный $p-n$ - переход смещен в прямом направлении, коллекторный в обратном.
2. Режим насыщения: оба $p-n$ - перехода открыты.
3. Режим отсечки: оба перехода смещены в обратном направлении.
4. Инверсный режим: коллекторный $p-n$ - переход смещен в прямом направлении, эмиттерный в обратном.

Для транзистора наиболее типичной является работа в активном режиме, при котором возможно усиление и генерирование колебаний.

Работа транзистора в активном режиме характеризуется следующими особенностями:

1. Коллекторный переход имеет высокое сопротивление (до единиц Мом), эмиттерный низкое (несколько ом).
2. В цепь коллектора включается нагрузочное сопротивление такого же порядка, как и сопротивление коллектора R_k .
3. Удельное сопротивление базы $\rho_b \gg \rho_a$ удельного сопротивления эмиттера. Это позволяет предельно снизить объемную рекомбинацию инжектированных в область базы носителей.
4. Длина диффузии инжектированных в базу дырок $L_p \gg w_b$ (толщины базы).
5. Инжектированные из эмиттера дырки диффундируют (не дрейфуют) от эмиттерного p-n-перехода к коллекторному, где увлекатся полем коллекторного p-n-перехода и скатываются в область коллектора.
6. Поле коллекторного p-n-перехода практически не влияет на ток инжектированных дырок.
7. При $L_p \gg w_b$ и $\rho_b \gg \rho_a$ почти все инжектированные в базу дырки достигнут коллекторного p-n-перехода, создавая коллекторный ток.
8. В цепь коллектора (см.рис. I.28,а) включено нагрузочное сопротивление $R_n > R_{kx}$, что позволяет получить усиление по напряжению

$$J_k R_n \gg J_a \cdot R_{bx},$$

а также усиление по мощности

$$P_{вых} > P_{вх},$$

усиление по току

$$\frac{J_{b_{вых}}}{J_{kx}} < 1$$

при включении транзистора по схеме с общей базой (рис. I.28,а).

В идеальном транзисторе при работе в режиме усиления входная цепь по условиям работы приближается к режиму короткого замыкания, выходная к режиму холостого хода.

Транзисторы, как известно, включаются по схеме с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК) (рис. I.29).

При включении транзистора по схеме с ОБ будет наименьшее вход-

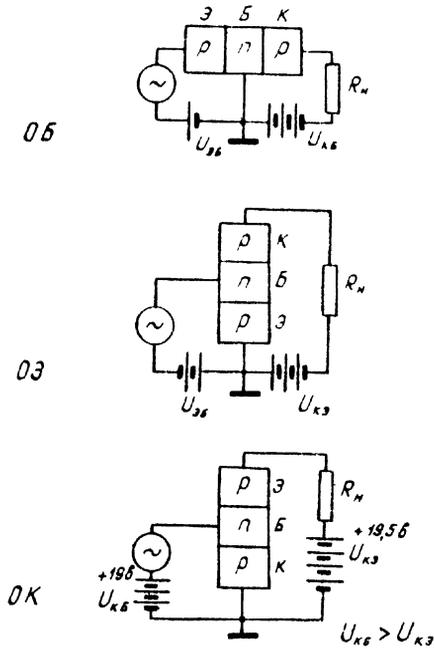


Рис. I.29. Схемы включения транзисторов с общей базой, эмиттером и коллектором

ное сопротивление и наибольшее выходное. Усиление по напряжению будет наибольшим, усиление по току наименьшим (меньше единицы).

При включении транзистора по схеме с ОК входное сопротивление будет наибольшим, выходное сопротивление наименьшим; усиление по току наибольшее, усиление по напряжению наименьшее (меньше единицы).

В схеме с ОЭ усиление по току почти такое же, как и в схеме с ОК (чуть меньше), так как I_k - выходной ток в схеме с ОЭ меньше $I_э$ - выходного тока в схеме с ОК, а входным током в обеих схе-

мах является ток базы J_B . Усиление по напряжению в схеме с ОЭ такого же порядка, как и в схеме с ОБ.

Работа транзистора в режиме малых сигналов. Теория работы транзистора в режиме малых сигналов строится в следующих приближениях.

1. Концентрация инжектированных в базу носителей p_n мала

$$p_n \ll n_n.$$

2. Модель транзистора одномерна, поэтому поверхностная рекомбинация в базе транзистора отсутствует.

3. Движение носителей в базе диффузионное (бездрейфовое).

4. Распределение дырок, инжектированных в область базы, линейно.

5. Эмиттерный и коллекторный переходы тонкие (объемная рекомбинация в p - n -переходах отсутствует).

Учитывая эти приближения, определим основные физические параметры транзистора: коэффициент передачи тока α , эффективность эмиттера γ , эффективность переноса β^* , эффективность коллектора α^* .

Под коэффициентом передачи тока α понимается отношение изменения тока коллектора к изменению тока эмиттера при $U_K = \text{const}$

$$\alpha = \left. \frac{\partial J_K}{\partial J_E} \right|_{U_K} \cong \left. \frac{\Delta J_K}{\Delta J_E} \right|_{U_K}. \quad (I.49)$$

Эффективность эмиттера γ определяется отношением изменения дырочной составляющей тока эмиттера к изменению полного тока эмиттера при $U_K = \text{const}$

$$\gamma = \left. \frac{\partial J_{pE}}{\partial J_E} \right|_{U_K} \cong \left. \frac{\Delta J_{pE}}{\Delta J_E} \right|_{U_K}. \quad (I.50)$$

Эффективность переноса β^* (коэффициент переноса) характеризует долю переданных от эмиттера к коллектору дырок при $U_K = \text{const}$

$$\beta^* = \left. \frac{\partial J_{pK}}{\partial J_{pE}} \right|_{U_K} \cong \left. \frac{\Delta J_{pK}}{\Delta J_{pE}} \right|_{U_K} \quad (I.51)$$

Эффективность коллектора α^* характеризует рост тока через коллекторный переход за счет воздействия подошедших к коллекторному p-n-переходу дырок при $U_k = \text{const}$

$$\alpha^* = \left. \frac{\partial J_k}{\partial J_{pk}} \right|_{U_k} = \frac{\Delta J_k}{\Delta J_{pk}} \Big|_{U_k} \quad (I.52)$$

Перечисленные выше параметры связаны соотношением

$$\alpha = \gamma \cdot \beta^* \cdot \alpha^* = \frac{\partial J_{p3}}{\partial J_3} \cdot \frac{\partial J_{pk}}{\partial J_{p3}} \cdot \frac{\partial J_k}{\partial J_{pk}} = \frac{\partial J_k}{\partial J_3} \quad (I.53)$$

γ и β^* определяются электронной и дырочной составляющими тока эмиттера и током рекомбинации дырок в базе соответственно J_{p3} , J_{n3} , J_r . В режиме малых сигналов, когда $p_n \ll n_n$ и распределение инжектированных в базу дырок линейно, можно считать

$$\begin{aligned} J_{p3} &\sim \Delta J_{p3}; \\ J_{n3} &\sim \Delta J_{n3}; \\ J_r &\sim \Delta J_r. \end{aligned}$$

Тогда

$$\gamma = \frac{J_{p3}}{J_3} = \frac{J_{p3}}{J_{p3} + J_{n3}} = \frac{1}{1 + \frac{J_{n3}}{J_{p3}}}; \quad (I.54)$$

$$\beta^* = \frac{J_{pk}}{J_{p3}} = \frac{J_{p3} - J_r}{J_{p3}} = 1 - \frac{J_r}{J_{p3}} \quad (I.55)$$

Токи $J_{pэ}$, $J_{nэ}$ и J_r определяются следующими соотношениями:

$$J_{pэ} = \frac{e D_p p_n}{W_b} \exp\left(\frac{e U_{эб}}{kT}\right); \quad (I.56)$$

$$J_{nэ} = \frac{e D_n n_p}{L_n} \exp\left(\frac{e U_{эб}}{kT}\right); \quad (I.57)$$

$$J_r = \frac{e p_n W_b}{2 \tau_p} \exp\left(\frac{e U_{эб}}{kT}\right). \quad (I.58)$$

Подставляя формулы (I.55), (I.57) в выражение (I.54), получим

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{e D_n n_p W_b}{e D_p p_n L_n}}.$$

Учитывая, что

$$\frac{n_p}{p_n} = \frac{n_n}{p_p}; \quad \frac{D_n}{D_p} = \frac{\mu_n}{\mu_p},$$

получим

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{e \mu_n \cdot n_n \cdot W_b}{e \mu_p p_p L_n}}$$

или

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \cdot \frac{W_b}{L_n}} \approx 1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \cdot \frac{W_b}{L_n}, \quad (I.59)$$

где σ_b , σ_a - удельные проводимости базы и эмиттера.

Последнее выражение дает несколько заниженное значение γ .
 Более точное значение γ можно получить по формуле

$$\gamma = 1 - \frac{\mu_{n3} \cdot \mu_{p3} \cdot \rho_p \cdot W_E}{\mu_{n6} \cdot \mu_{p6} \cdot \rho_6 \cdot L_n} \quad (I.60)$$

Подставляя формулы (I.56) и (I.58) в выражение (I.55), получим

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{W_E^2}{\tau_p \cdot D_p}$$

Учитывая, что

$$\tau_p \cdot D_p = L_p^2,$$

получим

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_E}{L_p} \right)^2 \quad (I.61)$$

В последнем выражении для β^* можно учесть также и поверхностную рекомбинацию. Нетрудно видеть, что поверхностная рекомбинация будет прямо пропорциональна скорости поверхностей рекомбинации S , площади, на которой протекает рекомбинация F_s , и толщине базы W_E и обратно пропорциональна коэффициенту диффузии D_p и площади эмиттера F_E . Тогда параметр β_s^* , учитывающий влияние поверхностной рекомбинации на эффективность переноса β^* , определится выражением

$$\beta_s^* = \frac{S \cdot F_s \cdot W_E}{D_p \cdot F_E}, \quad (I.62)$$

а эффективность переноса с учетом поверхностной рекомбинации

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_E}{L_p} \right)^2 - \frac{S F_s W_E}{D_p F_E} \quad (I.63)$$

Эффективность коллектора α^* определяется рядом факторов.

Во-первых, лавинным умножением носителей в коллекторном

p-n-переходе

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_{кб}}{U_{кбпр}} \right)^n} = \frac{I_{к(умн.)}}{I_{к(без умн.)}},$$

где M - коэффициент умножения - отношение полного тока коллектора к току коллектора, который был бы при отсутствии умножения.

Во-вторых, условия электрической нейтральности требуют, чтобы навстречу дыркам, диффундирующим в область коллектора, из омического контакта коллектора вышли электроны. Часть этих электронов проходит в базовую область, создавая дополнительный электронный ток коллектора.

С учетом перечисленных выше двух факторов эффективность коллектора может быть представлена в виде

$$\alpha^* = \frac{1 + \frac{n_{рк} U_n}{p_{рк} U_p}}{1 - \left(\frac{U_{кб}}{U_{кбпр}} \right)^n}, \quad (I.64)$$

Рассмотрим эквивалентную схему транзистора и элементы эквивалентной схемы.

Эквивалентная схема транзистора приведена на рис. I.30. При работе транзистора на низких частотах

$$\frac{1}{\omega C_a} \gg R_a;$$

$$\frac{1}{\omega C_k} \ll R_k.$$

Поэтому в эквивалентной схеме (рис. I.30, а) такими элементами, как C_a и R_k можно пренебречь и эквивалентная схема для низких частот примет вид (рис. I.30, б).

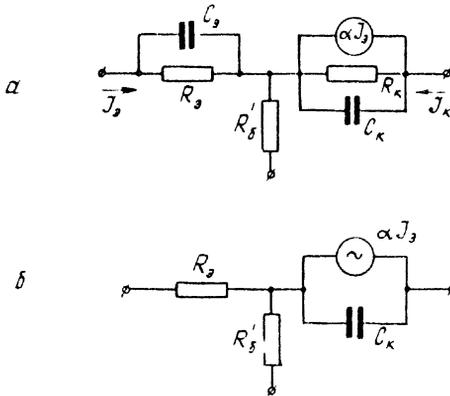


Рис. I.30. Эквивалентные схемы транзистора:
а - для ВЧ; б - для НЧ

Определим элементы эквивалентной схемы транзистора: $C_э$, $C_к$, $R_э$ и т.д.

Емкости переходов коллектора и эмиттера определяются как суммы диффузионных и запорных емкостей

$$C_э = C_{Дэ} + C_{Зэ} ;$$

$$C_к = C_{Дк} + C_{Зк} .$$

В транзисторе диффузионная емкость $C_{Дэ}$ и $C_{Дк}$, особенно $C_{Дэ}$, вследствие иного, чем у единичного р-п-перехода, распределения дырок в базе может существенно превосходить диффузионную емкость единичного р-п-перехода.

Диффузионная емкость коллектора. определяется как отношение изменения объемного заряда инжектированных в базу дырок к изменению напряжения на коллекторе при постоянном токе эмиттера

$$C_{Дк} \cong \left. \frac{\partial Q}{\partial U_k} \right|_{J_э} \cong \frac{\Delta Q}{\Delta U_k} \Big|_{J_э} . \quad (I.65)$$

Диффузионная емкость коллектора может быть определена относительно просто, если считать, что распределение инжектированных в базу дырок линейно и коэффициент передачи тока $\alpha \cong 1$.

На рис. I.31, а приведено распределение дырок в базе $p_n(x)$ при двух различных напряжениях на коллекторе U_k и U'_k и $J_3 = \text{const}$, так как $J_3 \sim \frac{dp_n}{dx} = \text{const}$.

Нетрудно видеть, что изменение объемного заряда дырок в области базы при изменении коллекторного напряжения на $\Delta U_k = U_k - U'_k$

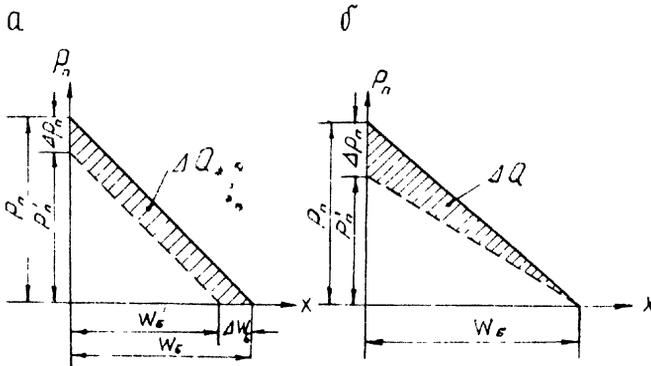


Рис. I.31. Распределение инжектированных в базу дырок:
 а - при $J_3 = \text{const}$, $U_k \neq \text{const}$;
 б - при $U_k = \text{const}$, $J_3 \neq \text{const}$

будет равна разности площадей треугольников (разность площадей заштрихована)

$$\Delta Q = e \left[\frac{1}{2} p_n \cdot W_B - \frac{1}{2} (p_n - \Delta p_n)(W_B - \Delta W_B) \right] \cong e p_n \Delta W_B, \quad (\text{I.66})$$

так как

$$J_3 \cong J_{p3} = -e D_p \frac{dp_n}{dx}$$

и учитывая, что при линейном распределении дырок

$$\frac{dp_n}{dx} = - \frac{p_n}{W_6} ,$$

получим

$$J_3 \cong e D_p \frac{p_n}{W_6} , \quad (I.67)$$

откуда

$$p_n = \frac{J_3 \cdot W_6}{e D_p} .$$

Подставляя значение p_n в формулы (I.66), а затем в (I.65), получим

$$C_{ДК} \cong J_3 \frac{W_6}{D_p} \cdot \frac{\Delta W_6}{\Delta U_k} . \quad (I.68)$$

Для расчета диффузионной емкости транзистора по (I.67) значение $\frac{\Delta W_6}{\Delta U_k}$ может быть взято из справочников.

Например, для сплавных транзисторов

$$\frac{\Delta W_6}{\Delta U_k} = - \frac{W_k}{2U_k} ,$$

где W_k - толщина запорного слоя коллекторного p-n-перехода.

Диффузионная емкость эмиттера. определяется как отношение изменения объемного заряда инжектированных в базу дырок к изменению напряжения на эмиттере при постоянном коллекторном напряжении

$$C_{ДЭ} = \left. \frac{\partial Q}{\partial U_3} \right|_{U_k} \cong \left. \frac{\Delta Q}{\Delta U_3} \right|_{U_k} . \quad (I.69)$$

На рис. I.31,б приведено распределение дырок в базе $p_n(x)$ при двух различных напряжениях на эмиттере U_3 и U'_3 и $U_k = \text{const}$.

Из рисунка I.3I видно, что ΔQ определяется разностью площадей треугольников, т.е. площадью заштрихованного треугольника

$$\Delta Q = e \frac{\Delta p_n \cdot W_E}{2}. \quad (I.70)$$

Δp_n можно получить, если продифференцировать выражение (I.67)

$$\Delta p_n = \frac{W_E}{e D_p} \cdot \Delta J_{\Delta}; \quad (I.71)$$

$$J_{\Delta} \approx J_s \left[\exp\left(\frac{e U_{\Delta}}{kT}\right) - 1 \right],$$

откуда

$$\Delta J_{\Delta} = J_s \exp\left(\frac{e U_{\Delta}}{kT}\right) \cdot \frac{e}{kT} \Delta U_{\Delta};$$

$$\Delta J_{\Delta} = J_{\Delta} \cdot \frac{e}{kT} \cdot \Delta U_{\Delta}. \quad (I.72)$$

Подставляя формулу (I.72) в (I.71), а затем в (I.70), получим

$$C_{D\Delta} = \frac{\Delta Q}{\Delta U_{\Delta}} = \frac{e W_E^2}{2kT D_p} \cdot J_{\Delta} \quad (I.73)$$

или учитывая, что

$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p,$$

получим

$$C_{D\Delta} = \left(\frac{e}{kT}\right)^2 \frac{J_{\Delta} \cdot W_E^2}{2\mu_p}. \quad (I.74)$$

Запорная емкость $C_{зэ}$ или $C_{зк}$ в первом приближении может быть определена как емкость единичного р-п-перехода.

Для ступенчатого перехода

$$C_z \sim \frac{1}{\sqrt{2} U_{p-n}} .$$

Для симметричного ступенчатого р-п-перехода

$$C_z \sim \frac{1}{\sqrt{4} U_{p-n}} .$$

Для линейного плавного р-п-перехода

$$C_z \sim \frac{1}{\sqrt[3]{U_{p-n}}} .$$

Сопротивление эмиттера R_z определяется как

$$R_z = \left. \frac{\partial U_z}{\partial J_z} \right|_{U_k} \cong \frac{\Delta U_z}{\Delta J_z} \Big|_{U_k} . \quad (I.75)$$

При определении сопротивления эмиттера R_z и сопротивления R_k учитывается только сопротивление р-п-перехода. Сопротивлением эмиттерной и коллекторной областей можно пренебречь

$$J_z = J_{sz} \left[\exp\left(\frac{eU_z}{kT}\right) - 1 \right] ;$$

$$\frac{\partial J_z}{\partial U_z} = \frac{e}{kT} \cdot J_{sz} \exp\left(\frac{eU_z}{kT}\right) ;$$

$$\frac{\partial J_z}{\partial U_z} = \frac{e}{kT} \cdot J_z ,$$

откуда

$$R_э = \frac{kT}{eJ_э} \quad (I.76)$$

Из формулы (I.76) видно, что сопротивление эмиттера линейно зависит от температуры.

Сопротивление коллектора R_k определяется как

$$R_k = \left. \frac{\partial U_k}{\partial J_k} \right|_{J_э} \cong \left. \frac{\Delta U_k}{\Delta J_k} \right|_{J_э} ; \quad (I.77)$$

$$R_k = \frac{2U_k W_б}{J_э W_k [2(1-\beta^*) + (1-\gamma)]} \quad (I.78)$$

Сопротивление базы. Для транзистора можно рассматривать три сопротивления базы.

I. Омическое сопротивление $R_{б0}$ есть сопротивление базы рекомбинационной составляющей тока. $R_{б0}$ определяется геометрией базы транзистора, размерами базы и удельным сопротивлением базы. При определении $R_{б0}$ базовую область транзистора разделяют на простейшие геометрические объемы и определяют сопротивление базовому току каждого из этих объемов. На рис. I.32 базовую область можно разбить на три простейших объема.

Если считать, что базовый ток идет от осевой линии транзистора к омическому контакту базы, то сопротивление I, 2, и 3-го объемов (рис. I.32) определяется выражениями

$$R_{б1} = \frac{\rho_б}{8\pi \cdot W_{б1}} ;$$

$$R_{б2} = \frac{\rho_б}{2\pi \cdot W_{б2}} \cdot \ln \frac{D_k}{D_э} ;$$

$$R_{б3} = \frac{\rho_б}{2\pi \cdot W_{б3}} \cdot \ln \frac{D_б}{D_k} .$$

Тогда

$$R_{\text{б0}} = R_{\text{б0}_1} + R_{\text{б0}_2} + R_{\text{б0}_3} ;$$

$$R_{\text{б0}} = \frac{\rho_{\text{б}}}{2\tau} \left(\frac{1}{4 \cdot W_{\text{б}_1}} + \frac{1}{W_{\text{б}_2}} \cdot \ln \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{э}}} + \frac{1}{W_{\text{б}_3}} \cdot \ln \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{к}}} \right). \quad (\text{I.79})$$

2. Диффузионное сопротивление базы $R_{\text{бD}}$ определяется как

$$R_{\text{бD}} = \left. \frac{\partial U_{\text{э}}}{\partial J_{\text{к}}} \right|_{J_{\text{э}}} \cong \left. \frac{\Delta U_{\text{э}}}{\Delta J_{\text{к}}} \right|_{J_{\text{э}}}. \quad (\text{I.80})$$

В результате диффузии носителей, инжектированных в базу, между цепями эмиттера и коллектора возникает обратная связь через сопротивление базы. Величину этой обратной связи можно условно характеризовать с помощью диффузионного сопротивления базы, определяемого выражением

$$R_{\text{бD}} = \frac{R_{\text{э}}}{2(1-\alpha)}. \quad (\text{I.81})$$

3. Под высокочастотным сопротивлением базы понимается сопротивление току зарядной емкости коллекторного р-п-перехода.

Частотные свойства транзистора. С повышением частоты усиленные свойства транзистора снижаются. Это объясняется тем, что среднее время пролета носителей от эмиттера к коллектору становится сравнимым с периодом колебаний сигнала. С повышением частоты растут также реактивные проводимости эмиттерного и коллекторного р-п-переходов. При какой-то частоте реактивные сопротивления переходов становятся сравнимыми с $R_{\text{э}}$ и $R_{\text{к}}$

$$\frac{1}{\omega C_{\text{э}}} \cong R_{\text{э}} ; \quad \frac{1}{\omega C_{\text{к}}} \cong R_{\text{к}} .$$

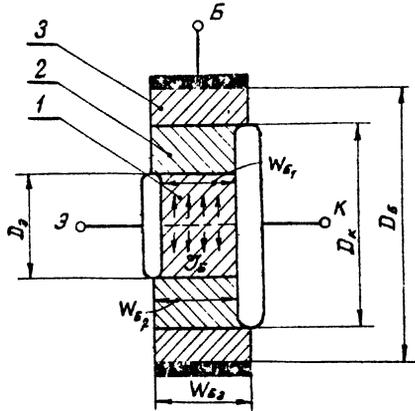


Рис. I.32. К расчету омического сопротивления базы транзистора

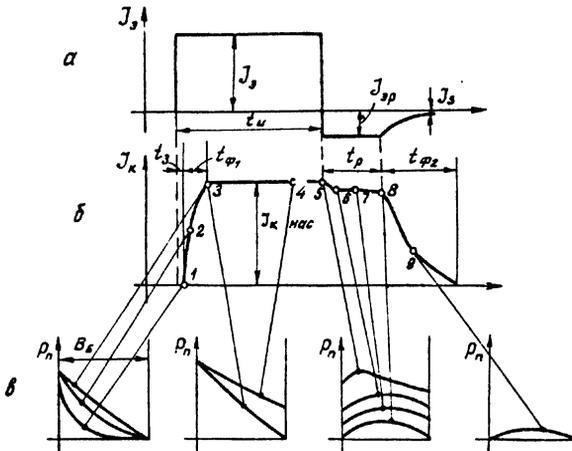


Рис. I.33. Прохождение импульса тока в транзисторе:

а - импульс тока эмиттера; б - импульс тока коллектора; в - распределение инжектированных в базу дырок при различных режимах работы транзистора

При этом реактивные проводимости шунтируют р-п-переходы транзистора, что приводит к снижению уровня инжекции из эмиттерного р-п-перехода, снижению сопротивления коллекторного р-п-перехода и т.д.

Усилительные свойства транзистора на высокой частоте определяются двумя основными параметрами. Предельная частота усиления по току f_{α} - частота, при которой квадрат модуля усиления по току $|\alpha|^2$ уменьшается вдвое по сравнению с $|\alpha_0|^2$, где α_0 - усиление по току при частоте равной нулю.

Максимальная частота генерирования $f_{ген}$ - частота, при которой коэффициент усиления мощности снижается до единицы (на более высокой частоте - затухание).

Предельная частота транзистора зависит от следующих факторов:

1. Материала транзистора. Более высокие предельные частоты будут в том случае, если транзистор изготавливается из материалов с более высокой подвижностью, временем жизни носителей и т.п.

2. Структуры транзистора. Так как электроны имеют более высокую подвижность, то n-p-n транзистор должен иметь в принципе более высокую частоту, чем p-n-p транзистор.

3. Толщины базы W_B . Чем меньше W_B , тем выше β^* и меньше сдвиг по фазе между I_e и I_k . Поэтому базу для повышения f_{α} нужно делать как можно тоньше. Однако сопротивление очень тонкой базы будет глубоко модулироваться при изменении толщины запирающего слоя коллекторного р-п-перехода (при изменении U_k).

Модуляция сопротивления базы с изменением U_k называется эффектом Ирли. Для снижения этого эффекта базу необходимо делать низкоомной, тогда область заряда коллекторного р-п-перехода будет узкой, но при низкоомной базе снижается τ_p , L_p , $U_{кпрсб}$, β^* , α и др. Поэтому сопротивление базы необходимо выбирать оптимальным.

4. Сопротивления базы $R_{б0}$. При высоком сопротивлении базы с ростом частоты резко снижается эффективность эмиттера γ . Это объясняется тем, что с ростом частоты сопротивление эмиттерного р-п-перехода шунтируется его емкостью, что приводит к перераспределению напряжения источника питания $U_{эб}$ между сопротивлением базы $R_{б0}$ и сопротивлением эмиттерного р-п-перехода так, что падение на эмиттерном р-п-переходе будет уменьшаться. С уменьшением падения напряжения на эмиттерном р-п-переходе будет снижаться уровень ин-

жекции. Исходя из этих соображений удельное сопротивление базы ρ_B для повышения предельной частоты следует брать как можно меньше. Однако, как уже указывалось, снижение ρ_B приводит к снижению τ_p , L_p , U_k проф и др.

5. Емкости p-n-переходов эмиттера и коллектора. Из рассмотрения эквивалентной схемы транзистора (рис. I.30, а) ясно, что с уменьшением емкости предельная частота транзистора должна возрастать.

6. Схемы включения транзистора.

Схемы с ОБ, ОЭ и ОК имеют неодинаковую предельную частоту.

Например,

$$f_{\alpha_{03}} = \frac{1}{2\pi\tau_p} ; \quad (I.82)$$

$$f_{\alpha_{06}} = \frac{2}{\tau_p} \cdot \frac{L_p^2}{W_B^2} . \quad (I.83)$$

Подставляя значение $\frac{1}{\tau_p}$ из формулы (I.82) в выражение (I.83), получим

$$f_{\alpha_{06}} = f_{\alpha_{03}} \cdot 4\pi \frac{L_p^2}{W_B^2} .$$

Так как

$$\frac{L_p}{W_B} \gg 1 ,$$

то

$$4\pi \cdot \frac{L_p^2}{W_B^2} \gg 1 \quad \text{и} \quad f_{\alpha_{06}} > f_{\alpha_{03}} .$$

7. Размеров транзистора. Очевидно, что с уменьшением геометрических размеров транзистора уменьшаются емкости p-n-переходов. Следовательно, повышается предельная частота.

8. Конструкции транзистора. Транзисторы различных конструкций (дрейфовый, поверхностно-барьерный, канальный и т.п.) будут

иметь различные предельные частоты при прочих равных условиях.

Работа транзистора в импульсном режиме. При прохождении импульсов тока транзистор работает в режимах отсечки, активного, насыщения, инверсного и снова - отсечки. При импульсном токопрохождении транзистор обычно работает в режиме большого сигнала. На рис. I.33 приведены формы импульсов эмиттерного и коллекторного токов и распределения дырок в базе транзистора при различных режимах его работы.

В начальный период транзистор находится в режиме отсечки. При подаче на эмиттер отпирающего импульса напряжения длительностью t_u эмиттерный p-n-переход открывается и через него проходит прямоугольный импульс тока (рис. I.33, а). Через время t_u эмиттерный p-n-переход закрывается, при этом в течение времени t_p (время рассасывания) обратный ток через эмиттер $I_{эp}$ будет значительно больше тока насыщения I_s обратного смещенного p-n-перехода. В течение времени t_p ток $I_{эp} \gg I_s$, это объясняется тем, что

в течение времени t_u в области базы накапливается значительный объемный заряд инжектированных из эмиттера носителей. При обратном смещении эмиттерного p-n-перехода инжектированные носители из базы возвращаются (рассасываются) обратно в эмиттер, создавая ток $I_{эp}$, который в течение времени $t_{ф2}$ спадает (релаксирует) до тока I_s .

Импульс коллекторного тока отстает от эмиттерного импульса на величину времени задержки t_3 . Время t_3 определяется временем пролета носителей от эмиттера к коллектору.

Длительность переднего фронта $t_{ф1}$ коллекторного импульса определяется частотными свойствами транзистора $t_{ф1} \gg t_3$, поэтому временем задержки t_3 обычно пренебрегают.

В течение времени $t_{ф1}$ транзистор работает в активном режиме (эмиттерный p-n-переход открыт, коллекторный закрыт). В точке Э коллекторный p-n-переход открывается и транзистор переходит в режим насыщения. Открытие коллекторного p-n-перехода происходит при неизменных напряжениях источников питания входной и выходной цепей транзистора и объясняется следующим образом.

Обычно в выходной цепи транзистора имеется нагрузочное сопротивление R_n . В течение времени $t_{ф1}$ с ростом тока коллектора происходит перераспределение напряжения источника питания между сопротивлением коллектора R_k и R_n . При этом доля напряжения, приходящегося на R_k , будет уменьшаться по мере роста тока коллектора и

при токе $I_{нн}$ (ток насыщения) на коллекторном $p-n$ -переходе сменится знак напряжения, переход отперется и транзистор перейдет в режим насыщения.

В точке 5 эмиттерный $p-n$ -переход закрывается (транзистор переходит в инверсный режим), но ток коллектора при этом меняется незначительно. В момент изменения направления тока эмиттера происходит небольшое скачкообразное изменение тока коллектора (тока 5), обусловленное изменением падения напряжения на объемном сопротивлении базы. Ток коллектора $I_{кр}$ и ток эмиттера $I_{эр}$ в течение t_p остаются почти постоянными.

Это объясняется тем, что в течение времени рассасывания градиенты концентрации дырок в базе в направлениях эмиттера и коллектора остаются почти постоянными (точки 5,6,7,8 на рис.1.33,б).

В точке 8 коллекторный $p-n$ -переход закрывается и транзистор переходит из инверсного в режим отсечки и ток коллектора в течение времени $t_{ф2}$ спадает до нуля.

Рассмотрим основные типы транзисторов.

Дрейфовый транзистор. В дрейфовом транзисторе в результате неоднородного распределения легирующих примесей в базе создается дрейфовое поле E . Инжектированные в базу дрейфового транзистора носители перемещаются не только за счет диффузии, определяемой градиентом концентрации, но и за счет дрейфа в электрическом поле E базы. Таким образом, движение носителей в базе такого транзистора диффузионно-дрейфовое.

Образование электрического поля E объясняется тем, что вблизи эмиттера концентрация донорных примесей в базе выше, чем вблизи коллектора (рис. I.34, а, б, в). Поэтому основные носители базы - электроны - под влиянием градиента концентрации диффундируют в направлении к коллектору, оставляя неподвижные положительные ионы доноров вблизи эмиттера.

Таким образом, в базовой области вблизи эмиттера создается положительный объемный заряд, а вблизи коллектора отрицательный. Это и приводит к появлению электрического поля E в области базы.

На рис. I.34, б приведено распределение примесей в базе дрейфового транзистора и энергетическая зонная диаграмма.

Рассмотрим работу диффузионно-дрейфового транзистора на следующей модели.

1. Транзистор одномерный с p-n-p структурой.
2. Концентрация донорных примесей в области базы изменяется по экспоненциальному закону

$$N_D(x) = N_0 \exp(-ax),$$

где a - коэффициент, определяющий распределение примесей в базе ;
 N_0 - концентрация донорных примесей в базе вблизи эмиттера..

3. Все атомы донорной примеси в базе ионизированы.
4. Эмиттерный p-n-переход считается тонким.
5. Явления, связанные с тормозящим полем в области эмиттера, не рассматриваются.

6. Ширина коллекторного p-n-перехода изменяется пропорционально сигналу.

7. Коэффициент диффузии D_p и подвижность μ_p инжектированных в базу дырок во всей области базы постоянны, т.е. не зависят от концентрации дырок и концентрации легирующих примесей в области базы.

Последнее допущение $D_p = \text{const}$ и $\mu_p = \text{const}$ может приводить к существенному расхождению теории с экспериментом.

Дрейфовое поле E в области базы транзистора определится следующим образом.

При отсутствии внешних смещений на p-n-переходах транзистора ток основных носителей в базе $J_n = 0$

$$J_n = J_{nD} + J_{nE} = eD_n \frac{dn}{dx} + e\mu_n nE = 0.$$

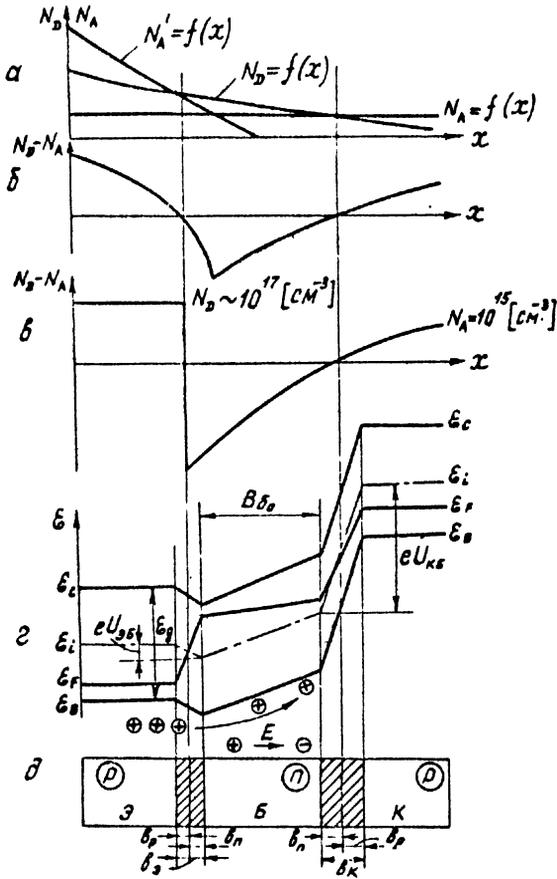


Рис.1.34. Распределение донорной N_D и акцепторной примесей в дрейфовом транзисторе (а); результирующее распределение примесей в транзисторе (б); упрощенное результирующее распределение примесей в дрейфовом транзисторе (в); зонная энергетическая диаграмма дрейфового транзистора (г)

Напряженность электрического поля в базе

$$E = -\frac{D_n}{\mu_n} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dx} = -\frac{kT}{e} \cdot \frac{d(\ln n)}{dx}.$$

Так как в базе принято экспоненциальное распределение примесей, то

$$\left. \begin{aligned} N_D(x) &= N_D \cdot \exp(-ax); \\ n(x) &= n_D \exp(-ax); \\ p_B(x) &= p_D \cdot \exp(ax). \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.84})$$

и

$$-d(\ln n) \cong -d(\ln N_D) = d(\ln p_B), \quad (\text{см. рис. I.35})$$

где

$$p_B \equiv p_B(x).$$

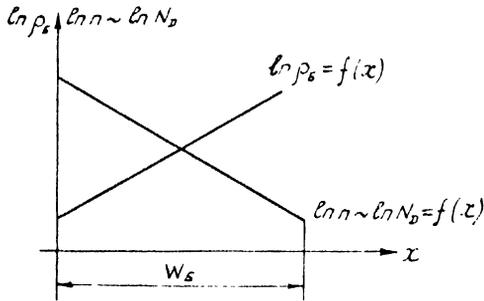


Рис. I.35. Зависимости $\ln p_B = f(x)$ и $\ln n = f(x)$

Тогда

$$\begin{aligned} E &= -\frac{kT}{e} \cdot \frac{d(\ln n)}{dx} = -\frac{kT}{e} \cdot \frac{d(\ln N_D)}{dx} = \\ &= \frac{kT}{e} \cdot \frac{d(\ln p_B)}{dx}. \end{aligned} \quad (\text{I.85})$$

Так как

$$\ln N_D = \ln N_0 - ax,$$

то

$$E = - \frac{kT}{e} \cdot \frac{d(\ln N_0 - ax)}{dx} = - \frac{kT}{e} = U_T \cdot a,$$

где $U_T = \frac{kT}{e}$ - температурный потенциал.

На границе коллекторного p-n-перехода при $x = W_B$

$$N_K = N_0 \exp(-aW_B).$$

Откуда

$$a = \frac{1}{W_B} \ln \frac{N_0}{N_K}.$$

Тогда

$$E = U_T \cdot a = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{W_B} \cdot \ln \frac{N_0}{N_K}. \quad (I.86)$$

Таким образом, при экспоненциальном распределении примесей в области базы электрическое поле в базе постоянно и не зависит от координаты x , а определяется перепадом концентрации примесей в базе N_0 , N_K и толщиной базы W_B .

Максимальная напряженность поля в базе дрейфового транзистора может быть определена из следующих соображений.

Поле будет максимальным, если $N_0 = N_{0 \max}$, при этом уровень ферми не должен подняться выше \mathcal{E}_c . $N_K = N_{0 \min}$, при этом уровень ферми не должен опуститься ниже \mathcal{E}_i (см. рис. I.34, г). Тогда максимальная разность потенциалов в базе дрейфового транзистора

ΔU_{\max} не может быть больше $\mathcal{E}_2/2e$.

Для германия $\Delta U_{\max} = \frac{E_g}{2e} = 0,366$;

для кремния $\Delta U_{\max} = \frac{E_g}{2e} = 0,666$.

Тогда при толщине базы $W_B = 5$ мкм для германиевых триодов

$$E_{\max} = \frac{\Delta U}{W_B} \cong 720 \text{ в/см.}$$

Однако объемный заряд инжектированных носителей снижает несколько величину дрейфового поля в базе.

Сравним время пролета носителей в базе чисто дрейфового и чисто диффузионного транзистора t_E и t_D .

$$t_E = \int_0^{x=W_B} \frac{1}{v} dx = \frac{W_B}{v} = \frac{W_B}{\mu_B E} = \frac{W_B}{\frac{e}{kT} D_p \cdot \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{p_B} \cdot \frac{dp_B}{dx}}.$$

Так как

$$dp(x) = p_a \cdot a \cdot dx;$$

$$\frac{1}{a} = \frac{p_a}{\frac{dp(x)}{dx}},$$

то

$$t_E = \frac{W_B}{a \cdot D_p}.$$

Так как при $x = W_B$

$$\ln p_k = \ln p_a + a W_B,$$

то

$$a = \frac{1}{W_B} \cdot \ln \frac{p_k}{p_a}.$$

Подставляя значение a в последнее выражение для t_E , получим

$$t_E = \frac{W_B^2}{D_p \ln \frac{p_k}{p_a}}. \quad (I.87)$$

Время пролета носителей сквозь базу чисто диффузионного транзистора t_D определяется аналогично

$$t_D = \frac{W_B^2}{2D_p}.$$

Тогда

$$\frac{t_E}{t_D} = \frac{1}{2 \ln \frac{p_k}{p_a}}.$$

Так как

$$p_k \gg p_a \quad \text{и} \quad \ln \frac{p_k}{p_a} \gg 1, \quad \text{то} \quad t_E \ll t_D.$$

Таким образом, в дрейфовом транзисторе предельная частота в принципе должна быть больше, чем в бездрейфовом, потому что $t_E \ll t_D$.

Рассмотрим распределение дырок в базе диффузионно-дрейфового транзистора.

Плотность дырочного тока в базе

$$J_p = -eD_p \frac{dp}{dx} + ep\mu E.$$

Если считать, что ток дырок не зависит от координаты $\frac{dJ_p}{dx} = 0$, то

$$\frac{dJ_p}{dx} = -eD_p \frac{d^2p}{dx^2} + eD_p E \cdot \frac{e}{kT} \cdot \frac{dp}{dx} = 0;$$

$$\frac{d^2p}{dx^2} - a \frac{dp}{dx} = 0. \quad (I.88)$$

Решение для (I.88) может быть получено в виде

$$p(x) = \frac{p_3 [1 - \exp - a(W_Б - x)]}{1 - \exp(-aW_Б)}. \quad (I.89)$$

Распределение, определяемое по формуле (I.89), представлено на рис. I.36, где η - коэффициент поля, определяющий соотношение между разностью потенциалов, создаваемой дрейфовым полем в базе $\Delta U = E \cdot W_Б$ и температурным потенциалом U_T .

$$\eta = \frac{\Delta U}{2U_T} = \frac{aW_Б}{2} = \frac{eE \cdot W_Б}{2kT} = \frac{1}{2} \ln \frac{N_3}{N_к}$$

Из рисунка I.36 видно, что при $\eta = 0$ (в случае чисто диффузионного транзистора) распределение дырок в базе линейно $\frac{dp}{dx} = \text{const}$ и $J_{pD} = \text{const}$. Нетрудно видеть, что при $\eta = 0$

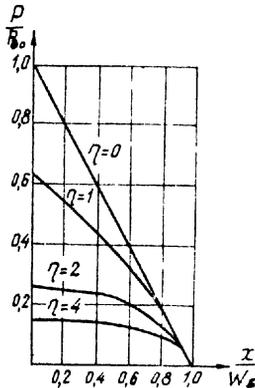


Рис. I.36. Распределение инжектированных дырок в базе диффузионно-дрейфового транзистора при различной величине коэффициента поля (дрейфового поля)

распределение дырок в базе, определяемое уравнением (I.89), прини-

мает вид

$$p(x) = p_{\text{э0}} \left(\frac{W_{\text{б}} - x}{W_{\text{б}}} \right),$$

где $p_{\text{э0}}$ - концентрация инжектированных в базу дырок вблизи эмиттера для чисто диффузионного транзистора.

Если движение носителей в основном определяется их дрейфом (сильное дрейфовое поле - большие η), то градиент концентрации дырок в базе мал, диффузионная составляющая тока мала и ток почти на всем протяжении базы определяется дрейфом носителей. Соотношение между дрейфовым и диффузионным токами определяется, так же как распределение дырок, коэффициентом α и шириной базы $W_{\text{с}}$. Для учета этого соотношения и вводится коэффициент поля η .

Сравним значения плотностей токов $J_{\text{рD}}$ и $J_{\text{рЕ}}$ в бездрейфовом и дрейфовом транзисторах при одинаковых концентрациях дырок, инжектированных в базу

$$p_{\text{э0D}} = p_{\text{э0E}}.$$

Для диффузионного транзистора плотность тока дырок в базе

$$J_{\text{рD}} = eD_{\text{р}} \frac{p_{\text{э0D}}}{W_{\text{с}}}. \quad (\text{I.90})$$

Для дрейфового транзистора при $\eta \gg 1$ и $\frac{dp}{dx} = 0$

$$J_{\text{рЕ}} = e\mu_{\text{р}} p_{\text{э0E}} \cdot E.$$

Так как

$$\mu_{\text{р}} = \frac{e}{kT} D_{\text{р}}, \quad \text{то}$$

$$J_{\text{рЕ}} = eD_{\text{р}} \frac{p_{\text{э0E}}}{W_{\text{с}}} \cdot \frac{eEW_{\text{с}}}{kT};$$

$$J_{\text{рЕ}} = J_{\text{рD}} \cdot \frac{\Delta U}{U_{\text{T}}}. \quad (\text{I.91})$$

Таким образом, в чисто дрейфовом транзисторе для случая $h \gg 1$ плотность тока оказывается в $\frac{\Delta U}{U_T}$ раз большей по сравнению с плотностью тока бездрейфового транзистора при одинаковых концентрациях инжектированных в базу дырок $p_{э0}$.

Наоборот, при одинаковых плотностях токов J_{pE} и J_{pD} концентрации инжектированных дырок в дрейфовом транзисторе оказываются в $\frac{\Delta U}{U_T}$ раз меньше, чем в бездрейфовом.

Действительно,

$$J_{pD} = eD_p \frac{p_{э0D}}{W_c} ;$$

$$J_{pE} = eD_p \frac{eE}{kT} p_{э0E} .$$

Приравнявая J_{pD} и J_{pE} , получим

$$p_{э0E} = \frac{p_{э0D}}{\frac{\Delta U}{U_T}} . \quad (1.92)$$

Полупроводниковый тетрод. В полупроводниковых тетрадах на базу подается дополнительное смещение с помощью электрода B_2 (рис. 1.37. Если подать положительное смещение на B_2 , то ток между контактами B_2 и B_1 создаст падение напряжения так, что вблизи B_2 потенциал базы будет положительным и эмиттерный p - n -переход частично закроется (чем больше U_{B_2} , тем большая часть эмиттерного перехода закроется). Инжектированные в базу дырки будут подниматься полем U_{B_2} к контакту B_1 , и вблизи контакта B_1 будет протекать интенсивная поверхностная рекомбинация дырок и коэффициент передачи тока $\alpha = \frac{J_k}{J_a}$ будет уменьшаться.

Таким образом, изменяя U_{B_2} , можно управлять коэффициентом усиления транзистора по току.

При повышении положительного потенциала U_{B_2} понижается сопротивление базы. Понижение сопротивления базы приводит к некоторому повышению предельной частоты (см. выше). Несколько утрированное объяснение снижения сопротивления базы с ростом U_{B_2} заключается в следующем. С ростом положительного U_{B_2} длинные траектории (5, 6 и 3, 4) носителей, создающих базовый ток, отсекаются при частичном запыриании эмиттерного перехода (остаются только короткие траектории),

что и приводит к некоторому уменьшению сопротивления базы (рис. I.37, б).

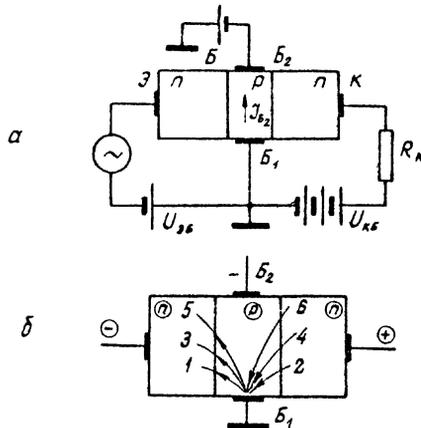


Рис. I.37. Полупроводниковый тетрод (а); схематическое изображение базовых токов в полупроводниковом тетроде (б)

Таким образом, в полупроводниковых тетродах возможно:
регулирование коэффициента усиления;
снижение сопротивления базы и связанное с этим повышение предельной частоты транзистора.

Транзисторы p-n-i-p(n-p-i-n)

В транзисторах p-n-i-p или в транзисторах с i-слоем предельная частота повышается за счет одновременного снижения запорной емкости коллектора $C_{зк}$ и омического сопротивления базы $R_{\zeta 0}$.

Для снижения запорной емкости коллектора и повышения предельной частоты необходимо, чтобы база и коллектор были высокоомными, но в случае высокоомной базы повышается ее сопротивление, что в свою очередь приводит к снижению предельной частоты (см. выше).

Для того чтобы при низкоомной базе сохранить малые $C_{зк}$, базу делают двухслойной (рис. I.38). Один слой $W_0 \cong 5 \text{ мкм}$, прилегающий к эмиттеру, — низкоомный, другой слой $W_{Bi} \cong 20\text{--}30 \text{ мкм}$, прилегающий к коллектору, — высокоомный с проводимостью, близкой к собственной. При этом толщина i -слоя примерно равна толщине запирающего слоя коллекторного p - n -перехода в области базы при номинальном U_k

$$W_{Bi} \cong W_{нк.}$$

При такой конструкции (рис. I.38) база транзистора низкоомна, а область объемного заряда коллекторного p - n -перехода формируется в высокоомной области базы (в i -слое).

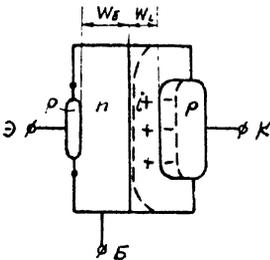


Рис. I.38. Схема транзистора p - n - i - p

В транзисторах с i -слоем инжектированные носители в низкоомной области базы диффундируют и дрейфуют в i -слое (т.е. в области запирающего слоя коллекторного p - n -перехода, сформированного в i -слое).

В транзисторах с i -слоем время пролета $t = t_D + t_E$,

где t_D — время пролета низкоомной области базы;

t_E — время пролета i -слоя.

Так как время пролета t_D в транзисторах с i -слоем такое же, как в транзисторах без i -слоя, то предельная частота f_{α} в транзисторах с i -слоем не повышается, но в этих транзисторах ввиду низких $C_{зк}$ и R_{60} возможно существенное повышение предельной частоты генерации $f_{ген}$, которая доходит до 500–700 мгц.

Полевой транзистор (униполярный транзистор). Конструкция транзистора приведена на рис. I.39. Полевые транзисторы имеют большую аналогию с вакуумным триодом.

Принцип действия его заключается в том, что при изменении потенциала затвора меняется толщина запирающего слоя p - n -перехода затвора, площадь сечения канала, а следовательно, и сопротивление канала.

Таким образом, сопротивление канала (сопротивление выходной цепи) модулируется изменением входного напряжения U_z . Глубина модуляции сопротивления канала будет тем выше, чем более высокоомный материал в области канала.

Так как сопротивление входной цепи полевого транзистора определяется сопротивлением обратно смещенного р-п-перехода затвора, которое может достигать нескольких мом, то входной ток в полевых транзисторах весьма мал и управление сопротивлением выходной цепи осуществляется при малых затратах входной мощности.

В этом случае коэффициент усиления по напряжению, току и мощности будет больше единицы.

В таких модификациях полевого транзистора, как алькатрон, коэффициент усиления по напряжению достигает $6 \cdot 10^3$ при крутизне управления $S = 6$ ма/в и входном сопротивлении порядка 1 мом.

Полевой транзистор существенно отличается от обычных транзисторов, поскольку в полевых транзисторах отсутствует инжекция несобственных носителей и принцип действия их заключается в перемещении основных носителей.

Полевой транзистор обладает рядом преимуществ перед обычными транзисторами, основными из которых являются:

низкий уровень шумов ;

полевой транзистор лучше выдерживает вредные воздействия ядерной радиации, поскольку его работа сравнительно мало зависит от времени жизни основных носителей ;

по своей структуре и принципу действия полевой транзистор значительно лучше защищен от перегрузок по току, которые в обычных транзисторах приводят к разрушению р-п-переходов ;

полевые транзисторы технологически легче вводить в полупроводниковые интегральные схемы в качестве элемента некоторых сложных конфигураций, так как токи в полевых транзисторах текут вдоль плоскости пластинки или кристалла, тогда как токи в обычных транзисторах текут в направлении, перпендикулярном к поверхности ;

характер нелинейности у полевых транзисторов позволяет использовать их в схемах автоматической регулировки усиления.

Основным недостатком полевых транзисторов является относительно малое произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания.

Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП - транзистор)

Конструкция МОП-транзистора схематически показана на рис.

Г.40, а. Принцип действия МОП-транзистора аналогичен принципу действия ППТ (см. ниже).

На рис. I.40, б приведены выходные характеристики МОП-транзистора, из которых видно, что транзистор может работать в режиме обеднения и обогащения.

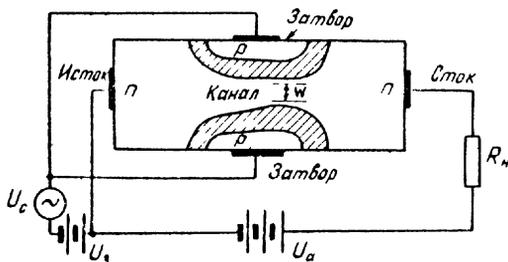


Рис. I.39. Схема униполярного транзистора

Возможность использования смещения затвора любой полярности составляет отличие и преимущество полевого транзистора с изолированным затвором.

Важным достоинством МОП-транзистора является то, что паразитная емкость между затвором и другими электродами при одинаковых размерах элементов на поверхности интегральной схемы может быть меньшей по сравнению с соответствующей емкостью полевого транзистора с $p-n$ -переходами.

Важным достоинством МОП-транзистора является также простота конструкции и технологии изготовления.

К числу недостатков следует отнести низкую воспроизводимость параметров и характеристик прибора.

Спесистор. С целью снижения времени пролета носителей в базе, за счет уменьшения ее толщины, и повышения таким образом предельной частоты транзистора возникла конструкция транзистора без базы, в которой носители инжектируются непосредственно в область объемного заряда обратно смещенного коллекторного $p-n$ -перехода (рис. I.41).

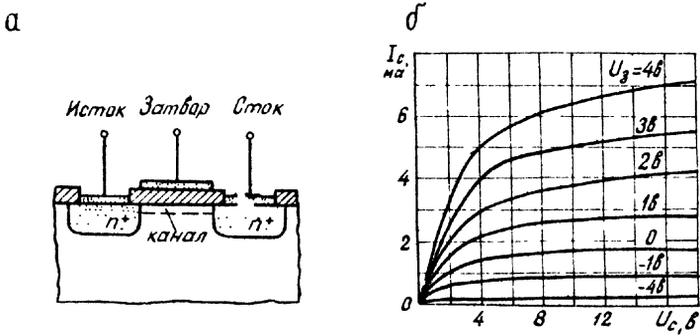


Рис. I.40. Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП-транзистор) (а); выходные характеристики МОП-транзистора (б)

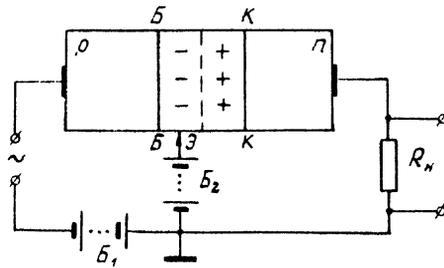


Рис. I.41. Схема спесистора

В конструкции спесистора время пролета действительно несколько уменьшается, однако емкостная природа обратного смещенного коллекторного $p-n$ -перехода остается прежней. Поэтому существенного повышения предельной частоты в спесисторах не достигнуто.

Ряд технологических трудностей не позволяет широко применять спесисторы в полупроводниковых интегральных схемах.

Однопереходный транзистор (двухбазовый диод). Конструкция этого транзистора схематически приведена на рис. I.42, а.

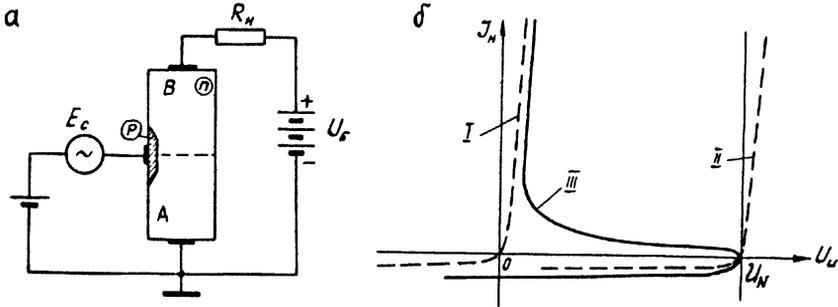


Рис. I.42. Схема однопереходного транзистора (а); ВАХ однопереходного транзистора (б):

I - ВАХ обычного $p-n$ -перехода; II - ВАХ обычного $p-n$ -перехода при условии, что на p - и n -области диода первоначально подано постоянное смещение U_N ; III - ВАХ однопереходного транзистора

Однопереходной транзистор несколько похож на полевой транзистор, однако аналогия эта чисто внешняя. Однопереходной транзистор имеет ВАХ с отрицательным сопротивлением (рис. I.42, б).

Принцип действия транзистора заключается в следующем.

Если на инжектор транзистора (область с p -проводимостью) подано напряжение U_C так, что $U_C > U_N$, то $p-n$ -переход инжектора будет закрыт и распределение потенциала в базовой области с n -проводимостью будет линейно. При $U_C > U_N$ n -переход открывается и в область базы А будут инжектироваться дырки. Для сохранения условий электронейтральности навстречу инжектируемым дыркам в область А должно прийти такое же количество электронов из омического контакта. В результате проводимость в области А возрастет, потенциал U_N еще больше понизится, что в свою очередь вызовет дополнительную инжекцию из области p , еще большее повышение проводимости в области А и т.д. Таким образом, на ВАХ однопереходного транзистора появится участок с отрицательным сопротивлением.

Г л а в а П

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

I. Технологический процесс изготовления полупроводниковых интегральных схем и его особенности

Задача технологии изготовления полупроводниковых ИС сводится в конечном счете к формированию в монокристалле полупроводника локальных областей, выполняющих функции транзисторов, диодов, конденсаторов и резисторов, обеспечению изоляции этих компонентов друг от друга и необходимых электрических соединений между ними, а также герметизации и защиты готовых ИС от внешних воздействий. Основой технологии являются методы, разработанные при создании дискретных полупроводниковых приборов и получившие в технологии ИС новое развитие. Важнейшие технологические операции сводятся к созданию транзисторной структуры, состоящей из трех отдельных слоев полупроводникового материала с разными типами проводимости: коллектора, базы и эмиттера.

Основными технологическими операциями при создании полупроводниковых ИС являются:

- подготовка материалов;
- маскирование двуокисью кремния SiO_2 ;
- фотолитография;
- травление SiO_2 ;
- диффузия примесей в полупроводник;
- эпитаксиальное наращивание полупроводниковых пленок;
- создание межсоединений в схемах;
- резка пластин на кристаллы;
- присоединение выводов;
- герметизация.

Технологические операции в **существующей** в настоящее время планарно-эпитаксиальной технологии производства кремниевых ИС выполняются в следующей последовательности (рис. II.1).

На подложке из монокристаллического кремния р-типа, имеющей форму круглой пластинки диаметром 25-30 мм и толщиной 0,2-0,3 мм, наращивают эпитаксиальную (повторяющую монокристаллическую структуру подложки) пленку кремния n -типа толщиной 15-25 мкм.

Термическим окислением кремния на поверхности пластины выращивают пленку SiO_2 толщиной 0,5-1 мкм для защиты кремния от диффузии примесей. После этого методом фотолитографии в пленке SiO_2 вскрывают отверстия для проведения через них локальной диффузии. Через эти отверстия проводят локальную диффузию акцепторной примеси на всю глубину эпитаксиального слоя n -типа до подложки. Таким образом, получают коллекторную область n -типа проводимости, отделенную от остального кристалла р- n -переходом, образующимся на границе областей разного типа проводимости. После операций окисления и фотолитографии для вскрытия окон в пленке SiO_2 проводят в изолированной области n -типа локальную диффузию сначала акцепторной примеси на глубину 5-7 мкм для создания области базы р-типа, затем в области базы проводят локальную диффузию донорной примеси на глубину 3,5-4,5 мкм для создания области эмиттера n^+ -типа.

В результате этих операций в кристалле кремния получают транзисторную структуру. Распределение примесей в этой структуре представлено на рис. II.2.

На этом рисунке по оси абсцисс откладывается расстояние от поверхности вглубь кристалла, а по оси ординат - концентрация примесей в полупроводнике. Линия α соответствует концентрации примеси n -типа в области коллектора (эпитаксиальная пленка), кривая β - распределению концентрации примеси р-типа в базовой области в зависимости от глубины, кривая γ - распределению концентрации примеси n -типа в эмиттерной области в зависимости от глубины. Для оси концентраций принят логарифми-

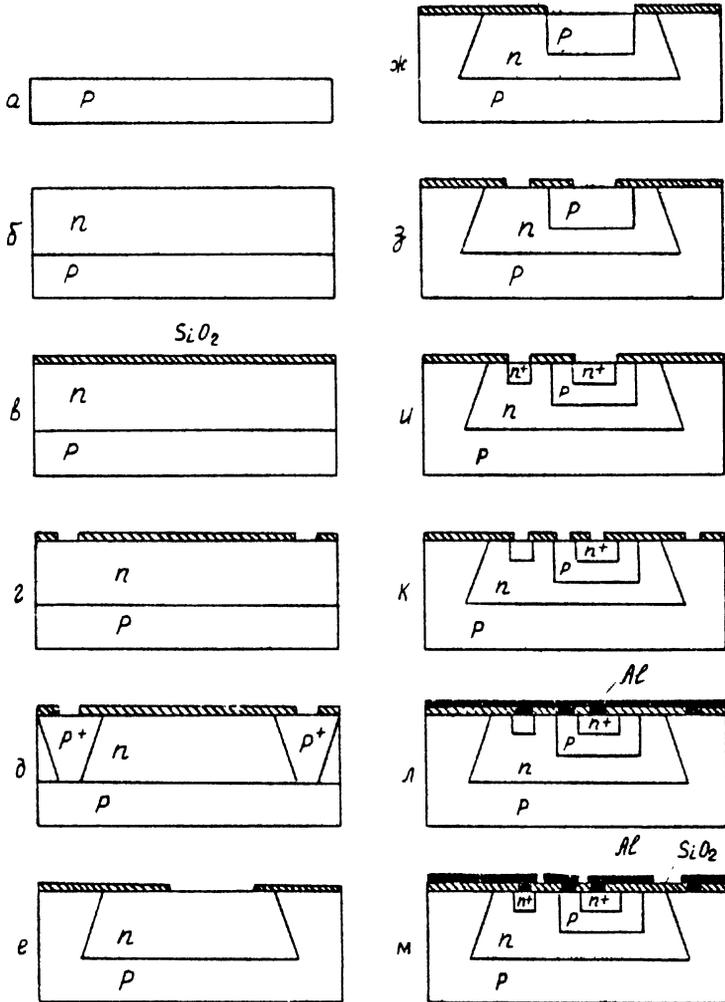


Рис. П.1. Основные технологические операции изготовления ИС:

а - подложка, кремний р-типа; б - наращивание эпитаксиальной пленки п-типа; в - окисление; г - вскрытие окон для разделительной диффузии; д - разделительная диффузия примеси р-типа; е - вскрытие окон для базовой диффузии; ж - создание базовой области; з - вскрытие окон для эмиттерной диффузии; и - создание эмиттерной области; к - вскрытие окон под контакты; л - напыление токопроводящего материала; м - создание комму-

ческий масштаб. Абсцисса точки I пересечения линий а и б на рисунке соответствует глубине залегания перехода коллектор-база, а абсцисса точки 2 пересечения линий б и в - глубине залегания перехода эмиттер-база. Разность абсцисс точек I и 2 соответствует физической толщине базы транзистора. Проведя еще раз процесс фотолитографии, вскрывают в соответствующих местах пленки SiO_2 окна под контакты и напыляют токопроводящий материал для осуществления коммутации.

Технология изготовления полупроводниковых ИС имеет целый ряд особенностей, и к технологическому процессу предъявляются специфические для микроэлектроники требования:

групповой характер производства, сотни схем изготавливаются в одном технологическом цикле, хорошая повторяемость свойств компонентов и характеристик схем (относительный разброс параметров 1-2%);

чистота материалов, точность поддержания параметров технологических процессов;

параметры всех компонентов схемы взаимосвязаны, так как технологический процесс определяется требованиями к транзистору, а все другие компоненты создаются путем использования той или иной части транзисторной структуры, при этом изменяется только плоскостная конфигурация;

технология изготовления ИС более пригодна для получения активных компонентов схемы, чем пассивных. Точность изготовления резисторов, например, иногда составляет до $\pm 20\%$ номинального значения. Трудно получать конденсаторы большой емкости; стоимость транзисторов и диодов может быть ниже стоимости пассивных компонентов, так как они могут занимать большую площадь на пластине кремния;

трудно в одной структуре создавать активные компоненты с разными свойствами, например транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$ типов;

схемы, в которых в одной изоляционной области можно разместить несколько компонентов, более удобны для изготовления. Например, транзисторы с общими базами или общими коллекторами, последовательно включенные резисторы и т.д.

изоляция компонентов р-п-переходами вызывает возрастание связей на высоких частотах;

технология в микроэлектронике часто определяет и выбор схемотехнических решений, поэтому разработчикам схем и систем необходимы достаточно полные знания об особенностях изготовления ИС.

2. Материалы полупроводниковых интегральных схем

Из наиболее распространенных полупроводниковых материалов германия и кремния для изготовления полупроводниковых ИС в подавляющем большинстве случаев применяют кремний, обладающий неоспоримыми преимуществами перед германием:

большая ширина запрещенной зоны, что дает возможность создавать резисторы с большими номинальными значениями (до 1 ом.см);
более высокие рабочая температура и удельные нагрузки;
кремниевые транзисторы работают при значительно больших напряжениях;

меньшие токи утечки в р-п-переходах (~ 1 мка/см²), поэтому можно создавать резисторы, не зависящие от тока утечки;

имеет устойчивую к загрязнениям поверхность;

пленка двуокиси кремния, созданная на его поверхности, имеет коэффициенты диффузии примесей значительно меньше, чем сам кремний. На этом свойстве основана вся планарная технология получения кремниевых ИС. Германий не имеет защиты окисной пленкой, как кремний. Для осуществления защиты поверхности германия при локальной диффузии примесей на его поверхность наносят пленку двуокиси кремния.

Кремний - элемент IV группы периодической системы элементов Д.И.Менделеева, один из самых распространенных элементов на земле. В коре земли его содержится до 20%.

Основные свойства кремния полупроводниковой чистоты:

Атомный номер	14
Атомная масса	28
Кристаллическая структура -	гранецентрированная кубическая
	решетка (типа алмаз)
Параметр решетки (при 298°К), А	5,4307
Диэлектрическая проницаемость	12

Плотность при 298°К, г/см ³	2,3283
Коэффициент линейного расширения при температурах, °К	
283 - 323	4,15.10 ⁻⁶
298	2,4.10 ⁻⁶
423	3,6.10 ⁻⁶
Теплопроводность при 298°К, кал/сек.см.град	0,2-0,26
Теплоемкость при 293-373°К, кал/г.град	0,181
Температура плавления, °К	1685 ± 2
Упругость пара при температуре плавления	1.10 ⁻²
Удельное сопротивление, ом.см.10 ⁴	23-24
Ширина запрещенной зоны при 300°К, эв	1,1
Коэффициент диффузии электронов при 300°К, см. ² /сек	35
Коэффициент диффузии дырок при 300°К, см. ² /сек	13,1
Твердость по Бринеллю	240
Модуль упругости, кг/мм ²	10890
Предел прочности при сжатии, кг/мм ²	9,47
Коэффициент сжимаемости, см ² /кг	0,525.10 ⁻⁶
Для Si с собственной проводимостью при 298°К:	
количество носителей, ат/см ³	1,5.10 ¹⁰
подвижность электронов	1350 ± 100
дырок	480 ± 15

Промышленность выпускает монокристаллический кремний, по параметрам и качеству подразделяющийся на 5 групп в зависимости от назначения и предъявляемых требований:

Первая группа (электронная или дырочная проводимость). Удельное сопротивление монокристаллического кремния 1 + 20 ом.см, длина слитков не менее 30 - 40 и диаметр 20 - 40 мм. Делится на четыре подгруппы: I, Ic, Icy и Iss.

Вторая группа (электронная проводимость). Удельное сопротивление 12-250 ом.см, длина слитков не менее 40 мм и диаметр 20-40 мм. Делится на шесть подгрупп: 2А, 2Б, 2Бс, 2В, 2Г, 2Д.

Третья группа (электронная или дырочная проводимость).

Удельное сопротивление $0,005 \pm 1,0$ ом.см, длина слитков не менее 30 мм, диаметр 25-40 мм. Делится на три подгруппы: 3, 3с, 3сп.

Четвертая группа (дырочная проводимость). Удельное сопротивление $0,005-1,0$ ом.см, длина слитка не менее 30 мм, диаметр 20-40 мм. Делится на две подгруппы: 4, 4с. Кремний этой группы может быть легирован бором или алюминием в зависимости от заказа.

Пятая группа (электронная проводимость). Удельное сопротивление 3-18 ом.см, длина слитков не менее 30 мм, диаметр 20-40 мм. Делится на две подгруппы: 5, 5с. Легируется фосфором и золотом. Марка кремния обозначается следующим образом: первый элемент - буква "К" (кремний); второй элемент - буква, обозначающая тип проводимости "Э" - электро́нная, "Д" - дырочная; третий и четвертый элементы - начальные буквы легирующих элементов, пятый элемент - числовая дробь, числитель которой обозначает номинальное удельное сопротивление, а знаменатель - диффузионную длину неравновесных носителей зарядов для подгрупп I, Ic, Iss, 2A, 2B, 2Bc и время жизни неравновесных носителей зарядов для подгрупп 5 и 5с. В подгруппах 2B, 2Г, 2Д указывается только индекс подгруппы, а обозначения легирующего элемента и числовая дробь в марку не входят. Если кремний изготовлен методом бестигельной зонной плавки, то перед обозначением материала ставится буква Б (бестигельный).

Например, марка IssкЭФ7,5/0,1 означает - подгруппа Iss, кремний, проводимость электронная, легирован фосфором, номинальное удельное сопротивление 7,5 ом.см, диффузионная длина неравновесных носителей зарядов не менее 0,1 мм; марка 5скЭФ10/0,2 - подгруппа 5с, кремний электронной проводимости, легирован фосфором, удельное сопротивление 10 ом.см и время жизни неравновесных носителей зарядов не более 0,2 мксек; марка БКЭФ7/0,5 - кремний, электронный, легированный фосфором, изготовлен методом бестигельной зонной плавки, сопротивление 7 ом.см и диффузионная длина 0,5 мм.

При выращивании монокристаллов на заводе-изготовителе заправка ориентируется в направлении [111], а по заказам заводы могут изготовить слитки, ориентированные вдоль кристаллографических осей [110] и [100].

Завод-изготовитель гарантирует точность ориентации по заданной оси $\pm 2^\circ$.

Каждый слиток кремния имеет паспорт, в котором указывается: группа, тип проводимости, диффузионная длина (или время жизни) неравновесных носителей зарядов;

удельное сопротивление, вес слитка и его размеры;

номер протокола измерения параметров слитка на заводе.

Кроме монокристаллических слитков, промышленность выпускает пластины кремния с выращенным на них эпитаксиальным слоем. Марка таких пластин представляет собой дробь, в числителе которой дается характеристика эпитаксиальной пленки, а в знаменателе - подложки кремния. Например, $\frac{320K300,5}{300KДБ10}$ - эта марка означает, что структура состоит из эпитаксиальной пленки кремния электронной проводимости, легированного фосфором, с удельным сопротивлением 0,5 ом.см и толщиной 20 мкм, которая выращена на кремниевой подложке, дырочной проводимости, легированной бором, с удельным сопротивлением 10 ом.см, имеющей толщину 300 мкм.

Выпускаемый промышленностью германий маркируется аналогично кремнию, только в марке материала вместо буквы "К" стоит буква "Г". Например, марка ГДГ 0,75/05 Iас означает - германий, дырочной проводимости, легирован галлием, удельное сопротивление 0,75 ом.см, диффузионная длина не менее 0,5 мм, подгруппа I ас.

При производстве полупроводниковых ИС для создания областей с заданными типами проводимости методом диффузии в качестве примесей применяются различные элементы. Чаще всего применяют в качестве диффузантов два элемента: бор - как акцепторную примесь и фосфор - как донорную примесь.

Для создания коммутации и выводов чаще всего применяют золото и алюминий.

Кроме того, целый ряд материалов применяется для деталей конструктивного оформления ИС и приборов.

Подробные сведения об их свойствах здесь не приводятся, так как это является предметом изучения специальных дисциплин (материаловедения).

3. Подготовка материалов

Подготовка полупроводниковых материалов для производства ИС включает в себя следующие операции: ориентацию слитков, резка слитков на пластины, шлифовка, полировка, травление поверхностей.

Ориентация слитков

Кремний и германий имеют кристаллическую решетку типа алмаз, обладающую анизотропией. Это свойство имеет существенное значение в изготовлении полупроводниковых ИС. При выращивании монокристаллов затравку ориентируют так, чтобы плоскость (111) была параллельна поверхности расплава, но плоскость торца слитка не всегда бывает строго параллельна плоскости (111) и у выращенных слитков геометрическая ось не совпадает с кристаллографической осью. Для получения пластинок полупроводникового материала, строго ориентированных в заданной кристаллографической плоскости, слитки ориентируют, т.е. определяют расположение в монокристалле основных кристаллографических плоскостей.

Разработано несколько способов ориентации монокристаллических слитков полупроводников. В промышленном производстве наиболее широко используются рентгеновский метод, основанный на отражении и дифракции рентгеновских лучей, и метод световых фигур, основанный на отражении света от вытравленных на поверхности полупроводника фигур.

При применении рентгеновского метода исходят из того, что рассеяние рентгеновских лучей кристаллической решеткой характеризуется выражением (условием Вульфа-Брэгга, см. рис.П.3)

$$2d \sin \alpha = n \lambda ,$$

(П.1)

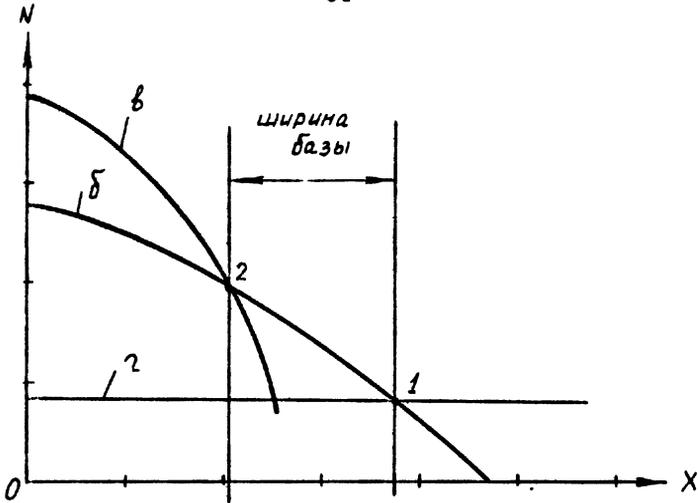


Рис. П.2. Распределение примесей в транзисторной структуре:

а - концентрация примеси n -типа в коллекторе;
б - концентрация примеси p -типа в базе; в - концентрация примеси p -типа в эмиттере

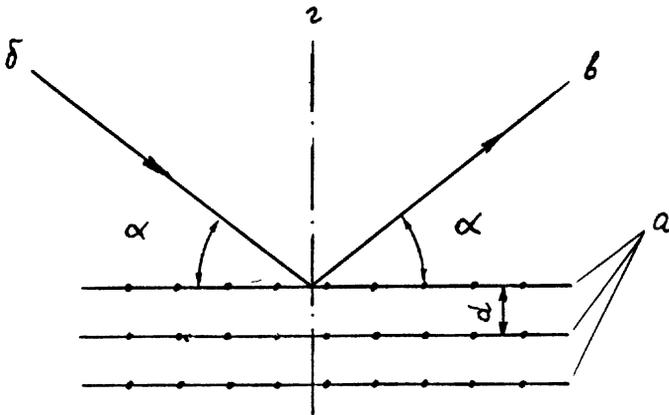


Рис. П.3. К геометрии закона Брэгга:

а - параллельные атомные плоскости;
б - падающая волна; в - отраженная волна; г - нормаль

где λ - длина волны рентгеновских лучей;
 d - расстояние между плоскостями;
 α - угол падения или угол отражения лучей;
 n - целое число, порядок отражения;
 для практических расчетов принимают $n = 1$.

Согласно этому выражению для серии плоскостей кристалла, данных n и λ существует единственное значение угла α , при котором происходит отражение рентгеновских лучей. В табл. II.1 приведены экспериментально определенные углы отражения α для кремния и германия.

Т а б л и ц а II.1

Углы отражения для Si и Ge

Материал	Угол отражения от плоскости		
	(111)	(110)	(100)
Кремний	17° 56'	30° 12'	45° 23'
Германий	17° 14'	28° 56'	43° 10'

Одна из возможных схем ориентации слитка состоит в следующем (рис. II.4).

Столик, на котором находится рамка для фиксации слитка, устанавливают таким образом, что угол между плоскостью рамки и падающим рентгеновским лучом равен углу α - углу отражения от плоскости, в которой производится ориентация слитка. Приемник индикатора лучей, отраженных от слитка, устанавливают под углом отражения лучей, равном также углу α . После этого слиток полупроводника со шлифованным торцом устанавливают на вращающийся столик шлифованной боковой плоскостью так, чтобы плоскость торца слитка совпадала с лицевой плоскостью рамки. После этого при включенной рентгеновской трубке вращают столик, добиваясь положения, которое соответствует максимальной интенсивности отраженного рентгеновского луча. Угол между новым положением плоскости торца слитка и исходным является одним из углов ориентации α_i . Но так как кристаллографическая плоскость может быть от-

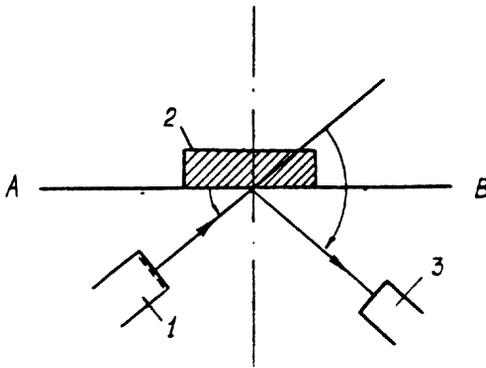
клонена от плоскости торца слитка в двух направлениях, то определяют второй угол ориентации α_2 при положении слитка, когда шлифованная боковая сторона перпендикулярна плоскости столика. Положение кристаллографической плоскости относительно торца слитка вполне определяется двумя углами ориентации α_1 и α_2 .

Ориентация слитков методом световых фигур заключается в следующем. При травлении селективным травителем отшлифованного торца слитка на нем образуются фигуры травления в виде ямок и выступов, имеющих четкую огранку, соответствующую строению кристаллической решетки. Если на протравленный торец слитка направить узкий пучок света, то, отражаясь от граней ямок, он образует на полупрозрачном экране фигуры, отстоящие ближе или дальше от центра экрана, в зависимости от отклонения кристаллографической плоскости от плоскости торца слитка.

Резка слитков на пластины

Монокристаллические слитки разрезают на пластины на специальных станках разными способами. В настоящее время резку производят алмазными дисками или стальными полотнами. Диски применяют двух типов: с внешней и внутренней режущей кромкой (рис. II.5). Состав материала диска с внешней режущей кромкой диаметром 90 мм и толщиной 0,4–0,5 мм: $Cu - 17,6 \text{ г}$, $Pb - 1,6 \text{ г}$, $Sn - 1,3 \text{ г}$. Расход алмаза около 0,5 карата. Алмазная крошка вкрапляется в режущую кромку диска. Станки для резки слитков алмазными дисками подобны обычным фрезерным станкам, в которых вместо фрезы устанавливается алмазный диск. Наиболее широко применяются диски с внутренней режущей кромкой, дающие более узкую ширину реза (0,2 мм и тоньше). При работе диски и разрезаемый полупроводник охлаждаются водой. Производительность данного способа резки очень высокая. Например, при скорости вращения диска 8000 об/мин от слитка кремния диаметром 40 мм пластина отрезается за 1,5–2 мин.

Для резки слитков применяют стальные полотна, изготовленные из инструментальной стали шириной 10 и толщиной 0,15 мм. Полотна набираются в кассеты по несколько десятков штук с шагом, определяемым необходимой толщиной пластин. Кассета с полотнами устанавли-



A-B - линия плоскости рамки столика

Рис. П.4. Схема ориентации слитка:
1 - рентгеновская трубка; 2 - вращающийся столик; 3 - приемник индикатора

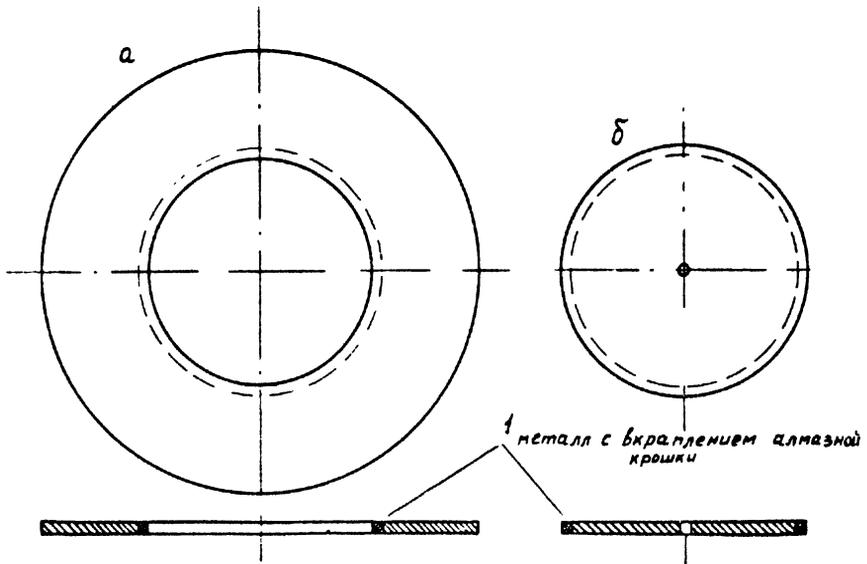


Рис. П.5. Алмазные диски:
а - с внутренней режущей кромкой; б - с наружной режущей кромкой

вается в станке (рис. II.6) и приводится в возвратно-поступательное движение. Снизу к полотнам подводится закрепленный на столике слиток. Давление полотен на слиток регулируется. К месту резки подается абразивная суспензия (на 1 л воды - 300 г микропорошка).

Шлифовка и полировка пластин

При шлифовке пластин требуется удалить нарушенный при резке слитков на пластины поверхностный слой, получить параллельные плоскости пластин и довести толщину пластин до заданной величины. Затем пластины полируются до заданной чистоты поверхности.

Шлифовку и полировку пластин осуществляют абразивной суспензией, представляющей собой механическую взвесь зерен абразивного порошка в воде (иногда в керосине). Процесс шлифовки и полировки заключается в том, что частички абразивного материала соприкасаются с поверхностью пластины и выкалывают с нее частички полупроводникового материала. Чистота получаемой поверхности будет зависеть от размеров зерен абразивного материала. Выпускаемые промышленностью абразивные материалы по крупности зерен делятся на три группы:

- 1) шлифзерно (размеры зерен более 180-150 мкм);
- 2) шлифпорошки (размеры зерен 150+28 мкм);
- 3) микропорошки (размеры зерен менее 28 мкм).

Каждая группа содержит порошки нескольких номеров зернистости.

Для механической обработки полупроводниковых материалов применяют только микропорошки.

В качестве абразивов используют электрокорунд белый марки "Э98" (для резки монокристаллов), электрокорунд нормальный марки "Э90" (для резки и шлифовки материалов), корунд природный "Семиэ-буги", карбид кремния марки "КЗ", а также алмазные порошки.

Пластины кремния и германия шлифуют на специальных станках, основной рабочей деталью которых является шлифовальный диск -

чугунная плита, покрытая сверху толстым стеклом. К вращающемуся шлифовальному кругу прижимаются пластины полупроводникового материала. Между ними и диском подают частички абразивного материала. Так как стекло имеет меньшую твердость, чем кремний, но высокую вязкость и пластичность, зерно абразива увязает в нем одним из своих ребер, а другим разрушает поверхность пластины кремния. При использовании вместо стекла полихлорвинила или винипласта, имеющих бóльшую, чем у стекла, эластичность, можно с тем же размером абразивного порошка получить меньшую в два раза глубину разрушения материала.

Очень точная шлифовка с применением мелкозернистых порошков и шлифовальных дисков, покрытых фетром или велюром, называется полировкой.

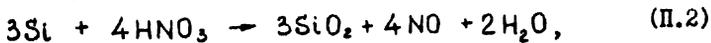
Химическая полировка

При механической полировке полупроводниковых материалов величина нарушенного поверхностного слоя еще остается относительно бóльшой; для кремния - 7000-10000 Å, для германия - до 15000 Å. Для удаления этих нарушенных слоев материала применяют метод травления. Пластины после механической полировки подвергают обработке химическими реактивами - травителями, в состав которых входят сильные окислители, окисляющие полупроводник, и комплексообразователи, переводящие окислы полупроводников в раствор. В качестве окислителей применяют азотную кислоту (HNO_3), перекись водорода (H_2O_2), а в качестве растворяющих агентов-комплексообразователей HF и щелочи $NaOH$ и KOH , а также кислоты - савелевую, лимонную, винную и соляную. Кроме того, в травители добавляют вещества, ускоряющие (например J , Br) или замедляющие реакции.

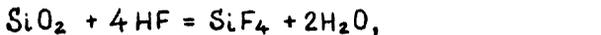
Для химической полировки кремния чаще всего применяют травители, состоящие из смеси 48% HF и 72% HNO_3 в соотношении 1:10; 1:8; 1:3 (чаще всего); 1:2; 1:1 с различными добавками (Br , соли азотной кислоты, уксусной кислоты и др.) Иногда применяют смеси из 42% HF и 63% HNO_3 . Процесс

травления характеризуется реакциями:

окисление



растворение



общая реакция



Самая высокая скорость травления кремния достигается в травителе, где соотношение HF и HNO_3 в молях 1:4. Эта скорость равна 28 мкм/сек.

Химической полировкой можно получать поверхности самого высокого класса точности, с неровностями, меньшими порога чувствительности существующих измерительных инструментов.

Очистка поверхностей

Кроме операции химической полировки, в технологии полупроводниковых ИС применяют химическую очистку поверхностей пластин, которая, как правило, проходит без нарушения поверхности материала и служит для удаления различных загрязнений, попавших на пластины.

Очистка поверхностей обычно проводится путем обработки пластин жидкими или парообразными растворителями (ацетоном, толуолом, диоксаном, трихлорэтиленом). Очистку в ваннах с растворителем производят интенсификацией ультразвуковыми колебаниями или в кипящих растворителях. Чаще всего процесс очистки осуществляют в нескольких растворителях с промежуточной промывкой в демонизированной воде с удельным сопротивлением до 20 Мом.см.

4. Окисление поверхностей полупроводников

Пленки окислов кремния играют значительную роль в технологии ИС, являясь маскирующими средами при проведении локальной диффузии примесей. Но слои двуоксида кремния используются не только для маскировки поверхностей пластин полупроводника, а также:

для защиты поверхности от влияния окружающей среды;

в качестве основания для омических контактов и металлической коммутации в ИС, создаваемых на покрытой окислом поверхности пластины кремния методами напыления, фотолитографии и термического сплавления;

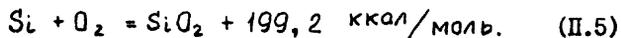
для диэлектрической изоляции компонентов ИС;

в качестве диэлектрика в пленочных конденсаторах;

в кремниевых планарных МДП-транзисторах с изолированным затвором для изоляции затвора от канала.

На основании изложенного выше можно заключить, что процесс окисления кремния является одним из основных технологических процессов в технологии полупроводниковых ИС.

В нормальных условиях пленка SiO_2 на поверхности пластины кремния образуется самопроизвольно. На поверхности пластины происходит сорбция газов из воздуха, в том числе и кислорода. Атомы кислорода, сорбированные на поверхности, вступают в химическую реакцию с кремнием, образуя SiO_2 . Реакция окисления идет с выделением тепла:



В результате этой реакции на поверхности пластины в первые 24 часа вырастает пленка SiO_2 толщиной 10-15 Å, в последующие сутки толщина пленки SiO_2 увеличивается до 20-30 Å и на этом процесс простого химического окисления прекращается, так как образовавшаяся пленка SiO_2 надежно защищает кремний от среды.

Но рост пленки не прекращается. Сорбированные на поверхности пленки SiO_2 атомы кислорода и других газов ионизируются, создавая электрическое поле высокой напряженности, определяемое для точечного заряда формулой

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}, \quad \frac{q}{m}, \quad (П.6)$$

где $\varepsilon = 4$;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м;
 $\tau \sim 30$ А, толщина пленки;
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ к.

Подставляя значение величин в формулу, получим

$$E \approx 80 \cdot 10^6 \text{ в/м} \approx 10^6 \text{ в/см}.$$

Под действием этого поля ионы мигрируют через пленку SiO_2 к поверхности чистого кремния, где происходит окисление и дальнейший рост пленки SiO_2 . Действие заряда в среде характеризуется радиусом экранировки Дебая L_D , т.е. расстоянием, на котором электрическое поле уменьшается в e раз

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{x}{L_D}\right), \quad (\text{П.7})$$

где x - расстояние, м;

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 kT}{n q^2}}, \quad \text{м}, \quad (\text{П.8})$$

$\varepsilon = 4$;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м;
 $K = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ дж/град;
 T - температура в градусах Кельвина;
 n - равновесная концентрация носителей заряда в среде, $1/\text{м}^3$;
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ к.

Для двуокиси кремния радиус Дебая равен примерно 100 \AA . Можно полагать, что, начиная с этой толщины пленки, прекращается миграция через нее ионов кислорода и дальнейший ее рост. Таким образом, в нормальных условиях пленка двуокиси кремния толщиной в 100 \AA надежно защищает кремний от внешней среды. Большая толщина пленки двуокиси кремния может быть получена только при изменении нормальных условий, например повышением температуры.

В настоящее время разработано несколько методов получения пленок двуокиси кремния. Все их можно разделить на две группы:

методы, связанные с непосредственным окислением поверхности кремния (термическое окисление, анодное и окисление в плазме кислорода);

методы, связанные с нанесением двуокиси кремния из внешнего источника (химическое осаждение, испарение в вакууме).

При непосредственном окислении кремния рост пленки окисла сводится к следующим основным процессам:

адсорбции молекул кислорода или воды на поверхности кремния;

диффузии частиц окислителя через слой образовавшегося окисла;

реакции окисления кремния.

Скорость роста пленки окисла будет определяться самым медленным из этих процессов. Исследованиями установлено, что при существующей технологии, атмосферном давлении и в диапазоне температур 800–1300°C скорость роста пленки окисла определяется диффузией через нее частиц окислителя.

Термическое окисление кремния

Этот метод получения двуокиси кремния на поверхности кремниевых пластин в технологии кремниевых ИС является господствующим. Суть его состоит в том, что поверхность кремния окисляется при повышенной температуре в различных окисляющих средах: в сухом кислороде, во влажном кислороде, в парах воды (рис. II.7).

Окисление в сухом кислороде. Исследованиями установлено, что при толщинах пленок SiO_2 , превышающих 1000 Å, и температурах, превышающих 1000°C, рост толщины пленки, получаемой в среде сухого или влажного кислорода, подчиняется параболическому закону.

$$x^2 = k t, \quad (II.9)$$

где x - толщина пленки двуокиси кремния;

t - время окисления;

k - коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры, энергии активации и парциального давления кислорода.

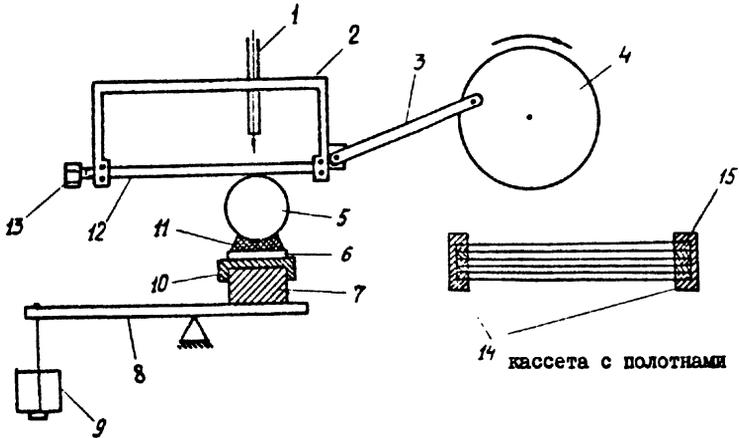


Рис. П.6. Схема станка для резки слитков стальными полотнами: 1 - шпалг для подачи суспензии; 2 - скоба для закрепления кассеты; 3 - шатун; 4 - маховик-эксцентрик; 5 - слиток кремния; 6 - стекло; 7 - основание столика; 8 - рычаг; 9 - груз; 10 - съемный столик; 11 - клеевая мастика; 12 - стальное полотно; 13 - винт для натягивания полотен; 14 - оправка кассеты; 15 - прокладки между полотнами

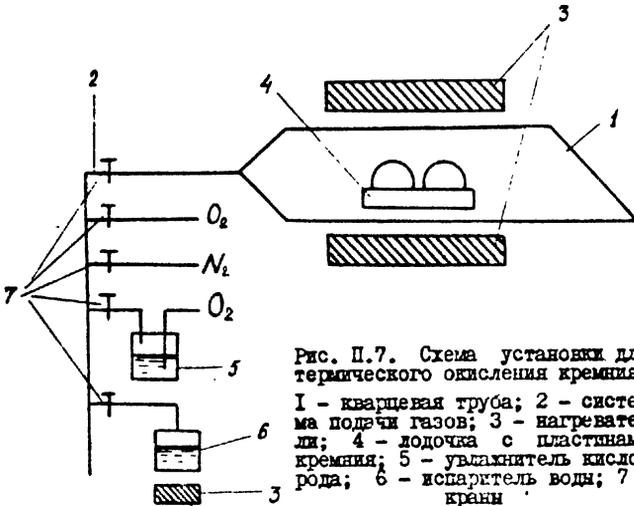


Рис. П.7. Схема установки для термического окисления кремния: 1 - кварцевая труба; 2 - система подачи газов; 3 - нагреватель; 4 - лодочка с пластинами кремния; 5 - увлажнитель кислорода; 6 - испаритель воды; 7 - кран

Время окисления, необходимое для получения пленки заданной толщины, можно определить по эмпирической формуле

$$t = 1,19 \cdot 10^{-11} \rho^{-\frac{1}{5}} x^2 \exp\left(\frac{1,7}{kT}\right), \quad (\text{II.10})$$

где x - толщина двуокиси кремния, Å;
 ρ - парциальное давление кислорода, атм;
 t - время окисления, мин;
 k - постоянная Больцмана, эв/град;
 T - температура окисления, °К.

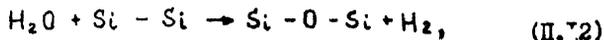
Необходимо отметить, что приведенная эмпирическая формула дает ориентировочное время окисления для получения пленки заданной толщины. Окончательное время устанавливается опытным путем. На рис. II.8 приведены кривые скорости роста двуокиси кремния в атмосфере сухого кислорода на подложке с ориентацией (III).

Пример. Определить время, необходимое для получения пленки SiO₂ толщиной 0,5 мкм при окислении в сухом кислороде, атмосферном давлении и температуре 1200°С.

По формуле (II.10)

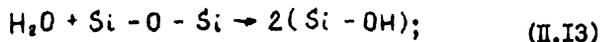
$$t = 1,19 \cdot 10^{-11} \cdot 1^{-\frac{1}{5}} \cdot 5000^2 \exp\left(\frac{1,7}{8,6167 \cdot 10^{-5} \cdot 1473}\right) = 247 \text{ мин.} \quad (\text{II.11})$$

Окисление в парах воды. Первые несколько монослоев окисла на поверхности кремния образуются хемосорбцией молекул воды. Дальнейший рост пленки окисла происходит за счет диффузии через нее частиц воды до границы раздела окисел-кремний. Реакция может идти двумя путями: или между атомами кремния в кристаллической решетке и молекулами воды, диффундирующими по междоузлиям окисла

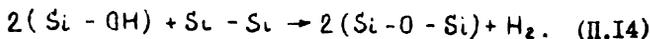


или по сложной реакции, имеющей две стадии:

первая - на границе пар-окисел с образованием промежуточной группы гидроокиси кремния-силанола



вторая - на границе окисел-кремний



Выделяющийся при реакции водород диффундирует через окисел и уносится потоком пара.

Установленные экспериментально значения коэффициентов диффузии через двуокись кремния при температуре 1050°C составляют:

$$\text{для воды} \quad D = 9,5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{сек}, \quad (\text{II.15})$$

$$\text{для водорода} \quad D = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{сек}. \quad (\text{II.16})$$

Из этих данных можно заключить, что водород, имея значительно бóльший, чем у воды коэффициент диффузии, быстро диффундирует через окисел и не оказывает существенного влияния на реакцию и образующуюся пленку окисла. На рис. II.9 представлено графическое соотношение между толщиной пленки двуокиси кремния, временем и температурой окисления в парах воды при давлении 1 атм на подложке с ориентацией (III).

Время окисления, необходимое для получения пленки окисла заданной толщины при атмосферном давлении, можно ориентировочно определить по эмпирической формуле:

$$t = 0,13774 \cdot x^2 \cdot \exp\left(\frac{0,8}{kT}\right), \quad (\text{II.17})$$

где t - время окисления, мин;
 x - толщина двуокиси кремния, мкм;
 k - постоянная Больцмана, эв/град;
 T - температура окисления, °К.

Пример. Определить время, необходимое для получения пленки двуокиси кремния толщиной 0,5 мкм при окислении в парах воды, при атмосферном давлении и температуре 1200°C.

По формуле (II.17)

$$t = 0,13774 \cdot (0,5)^2 \cdot \exp\left(\frac{0,8}{8,6167 \cdot 10^{-5} \cdot 1473}\right) = 18,5 \text{ мин.}$$

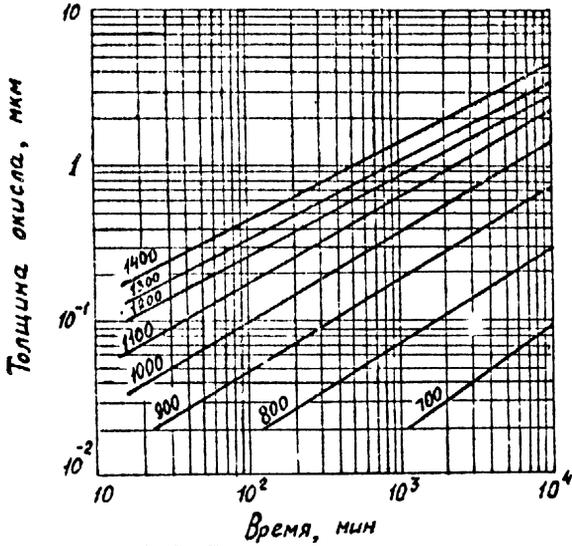


Рис. П.8. График скорости роста окисла в сухом кислороде (температура окисления (в °С) указана на кривых)

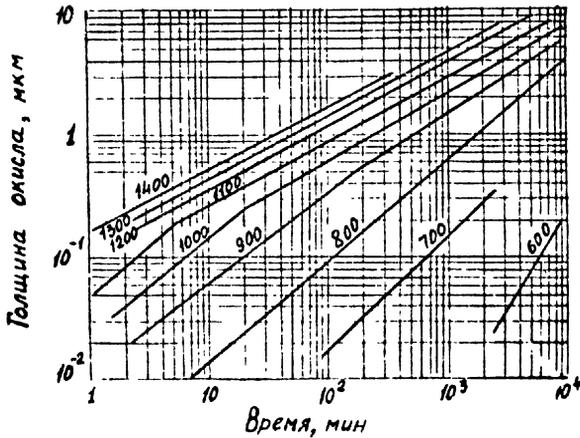


Рис. П.9. График скорости роста окисла в парах воды (температура окисления (в °С) указана на кривых)

Скорость окисления в парах воды значительно превышает скорость окисления в сухом кислороде. Для условий, выбранных в приведенных примерах, скорость окисления в парах воды примерно в 13 раз превышает скорость окисления кремния в сухом кислороде.

Окисление во влажном кислороде. При таком способе окисления кремния кислород, поступающий в печь для окисления, предварительно пропускается через водяную баню и насыщается парами воды. Так как окисление в парах воды происходит быстрее, чем в сухом кислороде, то при данном способе, изменяя количество пара в кислороде, можно изменять скорость роста пленки окисла от скорости в атмосфере сухого кислорода до скорости, получаемой при окислении в парах воды. Если применять в качестве газа-носителя инертный газ, например аргон, то можно получить скорость роста пленки меньшую, чем при окислении в сухом кислороде.

В табл. II.2 приведены данные по росту пленок двуокиси кремния, полученные экспериментально.

Т а б л и ц а II.2
Экспериментальные данные роста пленок SiO_2

Окислитель	Температура окисления, °C	Время получения пленки SiO_2 толщиной	
		0,5 мкм	1 мкм
Сухой кислород	1000	1800	-
-"-	1200	320	1320
Влажный кислород	1000	70	252
-"-	1200	22	85
Пары воды	1000	55	195
-"-	1200	16	60

Окисление в парах воды при повышенном давлении. Окисление этим методом проводится в металлических сосудах-"бомбах" постоянного объема, внутренняя поверхность которых покрывается золотом для устранения реакций между водой и материалом сосуда. В сосуд помещают окисляемый кремний и определенное количество воды.

"Бомбы" помещают в печь, представляющую собой нихромовый куб с отверстиями, который нагревается с каждой стороны независимо контролируемыми нагревателями. При нагревании вода переходит в газовую фазу, создавая высокое давление в сосуде, и идет реакция окисления кремния на поверхности образцов. Рост пленок двуокиси кремния в этих условиях подчиняется линейному закону во времени и скорость роста окисла пропорциональна давлению пара. При повышении температуры и давления, начиная с некоторых значений, наблюдается отклонение от линейного закона роста пленки, а при значительном повышении давления рост пленки не только прекращается, но происходит травление поверхности кремния парами воды. В табл. II.3 приведены критические температуры и давление с точностью ± 50 атм, выше которых не наблюдается рост пленки окисла.

Т а б л и ц а II.3

Критические температуры и давление, выше которых
рост пленок не наблюдается

Температура, °К	Критические давления, атм	Температура, °К	Критические давления, атм
773	500	1023	200
848	500	1123	150
923	400		

Исследованиями установлено, что на скорость роста пленки кремния влияют тип его проводимости и степень легирования, ориентация кристаллографических поверхностей, а также степень предварительной очистки поверхности пластин кремния перед окислением. Этот метод получения двуокиси кремния в настоящее время находится в стадии изучения и разработки рекомендаций для промышленного использования.

Анодное окисление кремния

Процесс анодного окисления кремния основан на переносе ионов кислорода из электролита к аноду, которым является окисляемый кремний. На поверхности анода происходит реакция и образуется слой окисла. Анодным окислением называют также окисление кремния в газовом разряде - газовое анодирование. Иногда этот процесс называют окислением в плазме. Окисление в жидком электролите называют электролитическим анодированием.

Распространенным электролитом для анодного окисления кремния является раствор азотнокислого калия (KNO_3) в N-метилацетамиде ($CH_3-CO-NH-CH_3$).

В процессе окисления при поддержании постоянного напряжения между электродами происходит уменьшение плотности тока, так как с ростом толщины пленки двуокиси кремния увеличивается сопротивление цепи. Уменьшение плотности тока служит косвенной мерой толщины пленки окисла.

Для получения однородной пленки окисла необходимо поддерживать постоянную плотность тока, что достигается непрерывным увеличением напряжения между электродами (рис. II.10). Продолжение окисления при постоянном токе ведет к значительному повышению напряжения и при определенной его величине происходит пробой слоя окисла. Таким образом, величина пробивного напряжения ограничивает максимальную толщину пленок двуокиси кремния, полученных анодным окислением. Существует способ значительного увеличения пробивного напряжения: процесс в течение некоторого времени протекает при напряжении, меньшем пробивного. Это ведет к структурным изменениям в пленке окисла и при дальнейшем увеличении напряжения пробой пленки происходит при значительно более высоком напряжении. Скорость электролитического анодирования определяется величиной, равной толщине пленки окисла, получаемой при постоянной плотности тока и изменении напряжения на 1 в.

Например, при окислении в 0,04 н. растворе KNO_3 в N-метилацетамиде при плотности 7 ма/см² получаем 3,8 Å/в. Пробой пленки наступает при напряжении 350 в. Если для этих условий сделать 20-минутную выдержку при 300 в, то пробивное нап-

ряжение достигает 560 в, и наибольшая величина пленки двуокиси кремния, которую можно получить, составит 2100 Å.

При окислении кремния в кислородной плазме вместо электролита используется газ. Кислород возбуждается электрическим полем с частотой 2,45 Ггц при давлении 0,4-1,5 мм рт.ст. Ионы кислорода вытягиваются из плазмы анодом с постоянным смещением. Этим методом получены обнадеживающие результаты. Например, при 270°C получена скорость роста пленки двуокиси кремния в 6000 Å/час, что примерно равно скорости роста пленки при окислении в парах воды при температуре 1050°C. Но относительно низкая температура при окислении в плазме кислорода исключает диффузию примесей в кремнии и смещение р-п — переходов во время окисления.

Другие методы нанесения двуокиси кремния

При нанесении двуокиси кремния из внешнего источника существенным является то, что материал полупроводниковой подложки не используется для образования пленки. Двуокись кремния этими методами можно наносить не только на подложки из кремния, но и на германий, арсенид галлия и др.

Самым распространенным химическим методом является метод пиролитического разложения кремний-органических соединений. Подложки из полупроводникового материала, на которые необходимо нанести слой двуокиси кремния, помещают в горячую реакционную зону, в которую подают инертные газы ($Ar; N_2$), насыщенные парами кремний-органических соединений. В горячей зоне кремний-органические соединения разлагаются с образованием пленки двуокиси кремния на поверхности полупроводниковой подложки, а газообразные продукты распада уносятся потоком газа-носителя.

Например, в настоящее время разработан метод осаждения двуокиси кремния на германиевые подложки. Процесс выращивания пленки SiO_2 проводят в печи в атмосфере аргона при температуре 610-615°C. В качестве источника SiO_2 применяется этилсиликат $Si(C_2H_5O)_4$, который при данной температуре разлагается, образуя на поверхности пластин германия плотную

защитную пленку SiO_2 со свойствами, не отличающимися от свойств подобной пленки, создаваемой на Si . Принципиальная схема установки представлена на рис. II.11.

Пленки двуокиси кремния на полупроводниковые подложки наносятся также термическим напылением в вакууме.

Все эти методы подробно рассмотрены в главе VI (часть I).

Особое внимание необходимо обратить на обеспечение чистоты поверхностей полупроводниковых пластин, на которых выращивается слой двуокиси кремния, и на технологическую чистоту процесса роста пленки. На плохо очищенной поверхности получаются пленки окисла, содержащие различные дефекты, нежелательные при использовании этих пленок в технологии ИС. Основным недостатком таких пленок окисла являются включения кристобалитов, на границах которых с пленкой образуются пустоты. В этих пустотах возможно скопление грязи и через них возможна диффузия примесей. Поэтому перед окислением пластин следует предусмотреть операции полировки, химического травления и несколько циклов промывки в различных веществах (царской водке, плавиковой кислоте, демонизированной воде, трихлорэтилене, растворах щелочей).

Высокие требования по обеспечению чистоты должны быть предъявлены и к аппаратуре, с помощью которой проводится окисление. Лучшим конструкционным материалом для аппаратуры является кварц. Экспериментами установлено, что использование других материалов ведет к изменению проводимости полупроводниковых пластин в процессе окисления.

Физические свойства пленок SiO_2

Свойства пленок двуокиси кремния отличаются от свойств объемного кварца и меняются в зависимости от метода и условий нанесения. Пленки SiO_2 представляют собой стеклообразный окисел кремния, имеющий непрерывную, однородную и аморфную структуру. Методом электронной дифракции обнаружена мелкокристаллическая структура пленок, причем было установлено, что резкие изменения температуры уменьшают размеры кристаллов и структура приближается к аморфной, а при длительном отжиге размеры кристаллов увеличиваются. На плохо очищенных подложках наблюда-

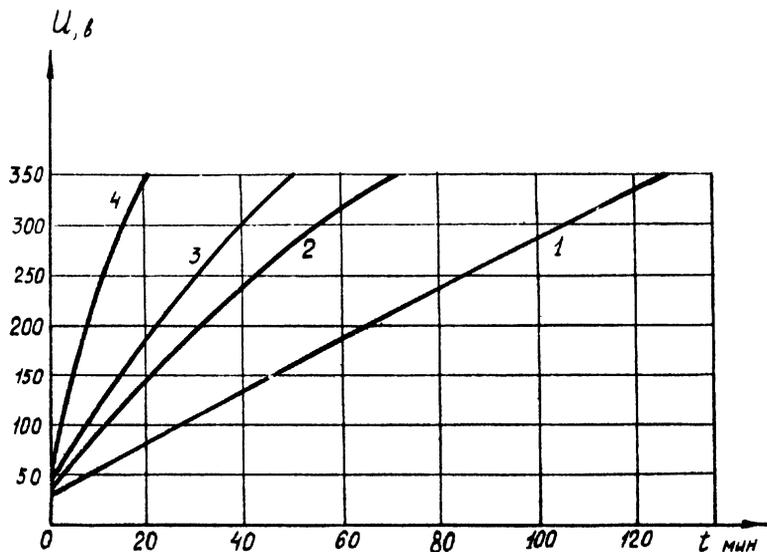


Рис. П.10. Изменение напряжения для создания постоянной плотности тока при анодном окислении кремния р-типа (в $\text{ма}/\text{см}^2$):

1 - 5; 2 - 6; 3 - 7; 4 - 12

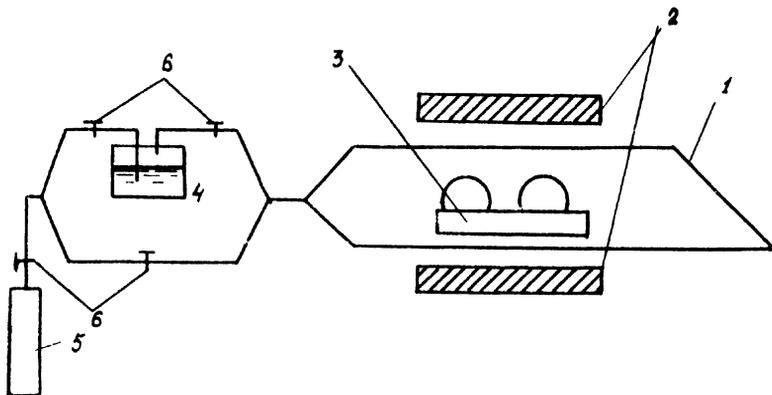


Рис. П.11. Схема осаждения окиси кремния на германии: 1 - кварцевая труба; 2 - нагреватели; 3 - пластины германия; 4 - сосуд с этилсиликатом; 5 - баллон с аргоном; 6 - краны

ется появление отдельных кристаллитов, включенных в аморфную структуру пленки. Это объясняется тем, что частицы некоторых веществ являются катализаторами, ускоряющими процесс превращения аморфной двуокиси кремния в кварц или кристобалит.

Плотность пленок двуокиси кремния близка к плотности плавленного кварца - $2,20 \text{ г/см}^3$ и зависит от метода получения. Плотность пленок, полученных окислением в сухом кислороде, выше чем пленок, полученных окислением в парах воды, что видно из табл. II.4.

Т а б л и ц а II.4

Плотность пленок SiO_2 , полученных в разных условиях

Метод окисления	Плотность, г/см^3
В сухом кислороде	2,23-2,27
Во влажном кислороде	2,18-2,21
В парах воды (при атмосферном давлении)	2,00-2,20

Удельное сопротивление пленок, полученных анодированием, составляет 10^{12} ом.см, а термическим окислением - 10^{16} ом.см, концентрации подвижных ионов примеси, создающих проводимость, соответственно равны 10^{18} и 10^{14} см^{-3} . Диэлектрическая прочность колеблется в пределах 10^6 - 10^7 в/см. Диэлектрическая постоянная изменяется от 3,78 (для кварца) до 10.

Маскирующие свойства пленок SiO_2

В технологии полупроводниковых ИС пленки двуокиси кремния наиболее широко применяются в виде диффузионных масок для создания локальных p-n- переходов на кремнии и на других полупроводниковых материалах. Эффективность маскирования зависит от многих факторов технологического процесса и параметров пленки двуокиси кремния: толщины пленки окисла, температуры и времени диффузии, давления паров примесей и концентраций примесей в исходном материале. Но определяющим фактором маскирования являет-

ся отношение коэффициента диффузии примеси в окисел кремния к коэффициенту диффузии в защищаемый материал. Если это отношение значительно меньше единицы, то будет достигнуто полное маскирование, если больше единицы, маскирования не будет.

Для диффузантов, применяемых в современной технологии ИС, P, B, As, Sb это отношение значительно меньше единицы и при соответствующей минимальной толщине пленки двуокиси кремния осуществляется полное маскирование полупроводника. Если в качестве диффузанта применяется галлий или алюминий, маскирования не будет, так как коэффициенты диффузии этих элементов в двуокиси кремния значительно выше, чем в кремнии. Например, скорость диффузии галлия в окисле в 400 раз превышает скорость его диффузии в кремнии, а алюминий диффундирует еще быстрее. В табл. II.5 даны значения коэффициентов диффузии примесей в двуокись кремния.

Т а б л и ц а II.5

Коэффициенты диффузии элементов в SiO_2

Примесь	Температура диффузии, °C	Коэффициент диффузии, см ² /сек
Фосфор	1100-1350	$10^{-15} - 10^{-13}$
Бор	1150-1250	$\sim 10^{-16}$
Сурьма	1000	$\sim 2 \cdot 10^{-15}$
Галлий	1100-1250	$5,3 \cdot 10^{-11} - 7 \cdot 10^{-9}$

При всех обычных параметрах технологических процессов производства и применяемых глубинах $p-n$ - переходов полностью маскируют кремний и германий пленки двуокиси кремния толщиной: для мышьяка, сурьмы, бора $\sim 0,5$ мкм, для фосфора $\sim 1,0$ мкм. Необходимо отметить, что пленки двуокиси кремния, полученные термическим окислением в разных средах, отличаются маскирующими свойствами. Так, пленки, выращенные в сухом кислороде, имеют более высокую плотность и лучше задерживают диффузанты, а выращенные в парах воды имеют меньшую плотность и несколько хуже задер-

живают диффузанта, хотя скорость роста их в парах воды значительно выше, чем в сухом кислороде. В современной технологии ИС окисление кремния, как правило, проводят в два этапа: сначала для быстрого получения необходимой толщины пленки окисла окисление проводят в парах воды или во влажном кислороде, а на завершающем этапе, для получения более плотной пленки двуокиси кремния, окисление проводят в атмосфере сухого кислорода. При диффузии фосфора, если в системе есть вода, иногда наблюдаются локальные нарушения в пленке окисла. Это объясняется тем, что молекулы воды реагируют с фосфором и образуют фосфорную кислоту, которая и вызывает нарушения. Эти нарушения чаще всего наблюдаются на неровностях поверхности окисла - "горках", число которых зависит от чистоты поверхности кремния и, следовательно, может быть значительно уменьшено тщательной очисткой поверхности перед нанесением окисла.

В технологии полупроводниковых ИС пленки двуокиси кремния применяются также и как источники диффузанта при создании р-п-переходов. Диффузия из легированных примесью пленок двуокиси кремния имеет целый ряд положительных особенностей:

обеспечивается более высокая однородность подачи диффузанта к поверхности полупроводника по сравнению с диффузией из газовой фазы;

источник диффузанта и полупроводник всегда находятся при одинаковой температуре, что исключает появление ошибок из-за разности температур и упрощает технологию;

толщиной окисла и содержанием в нем диффузанта легко контролировать степень подачи последнего в полупроводник;

относительно проще достигается уменьшение поверхностной концентрации в диффузионных слоях;

пленка окисла все время защищает поверхность полупроводника от воздействия окружающей среды, а материал подложки - от испарения во время диффузионных процессов при высокой температуре.

Метод диффузии примесей из пленки двуокиси кремния можно разделить на два этапа. На первом этапе пары диффузанта, соприкасаясь с поверхностью окисла, насыщают верхние слои пленки, образуя но-

вую фазу - стекло состава $R_x Si_y O_z$, где R - примесь. Например, бор и фосфор, реагируя с кислородом, содержащимся в двуокиси кремния, дают стеклообразующие вещества $B_2 O_3$ и $P_2 O_5$. Атомы примеси из газовой фазы постепенно диффундируют через новую фазу до границы стекло - SiO_2 и, реагируя с SiO_2 , пленка окисла переходит в стекло. На этом этапе осуществляется полное маскирование полупроводника. На втором этапе, как только стекло соприкасается с полупроводником, начинается диффузия примеси из стекла в полупроводник.

Изменение свойств материала подложки
при нанесении пленок двуокиси кремния

При нанесении любых тонких пленок на поверхность материала с другими термическими свойствами и при хорошей адгезии с изменением температуры будут возникать механические напряжения. Эти напряжения могут вызвать структурные дефекты как в самой пленке, так и в материале полупроводника. Исследованиями установлено, что в процессе нанесения пленок и при последующей термической обработке наблюдаются разрывы пленки окисла, увеличение плотности дислокаций в приповерхностном слое полупроводника на глубину до 9,0 мкм и образование относительно больших дефектов решетки. Причем увеличение толщины пленки окисла ведет к увеличению числа дислокаций в приповерхностном слое полупроводника.

При термическом окислении кремния пленка двуокиси кремния растет внутрь материала подложки, а так как удельный объем ее больше удельного объема чистого кремния (единичный объем SiO_2 получается из 0,45 объема Si), это ведет к возникновению деформаций. Механические деформации становятся различимыми, если на кремниевой подложке толщиной 125 мкм вырастить пленку, толщина которой будет превышать 0,75 мкм. Деформации не возникают, если пленка окисла наносится с обеих сторон пластины, но это ведет к появлению больших внутренних напряжений. Удаление пленки окисла с одной стороны пластины ведет к возникновению деформаций. Деформацию пластин можно оценивать радиусом кривизны (рис. 11.12)

$$R = \frac{z^2}{2w} + \frac{w}{2}, \quad (\text{П.18})$$

или изгибом

$$W = R - \sqrt{R^2 - z^2} \quad (\text{П.19})$$

В табл. II.6 приведены экспериментальные данные измерения радиуса кривизны для кремниевых подложек разного диаметра и толщины при выращивании на них пленок двуокиси кремния.

Т а б л и ц а II.6

Радиусы кривизны пластинок кремния в зависимости от толщины пленки

Диаметр пластины, мм	Толщина пластины, мкм	Радиус кривизны деформации (м) для пленки SiO ₂ толщиной, мкм				
		0,8	1,0	2,0	5,0	10,0
17,8	150	2,6	2,2	1,4	0,64	0,37
17,8	180	3,4	2,8	1,7	0,76	0,43
25,4	180	-	-	2,8	1,2	0,55
25,4	200	-	-	3,6	1,6	0,80

Установлено, что в зависимости от условий окисления кремния изменяются скорость поверхностной рекомбинации S и эффективное время жизни носителей $\tau_{эфф}$. Причем, окисление во влажных газовых средах ведет к уменьшению S и увеличению $\tau_{эфф}$, а после выдерживания образцов при повышенной температуре в сухом кислороде наблюдается увеличение S и уменьшение $\tau_{эфф}$.

Под влиянием пленки SiO₂, наносимой термическим окислением, проводимость кремния на границе раздела может изменяться за счет изменения концентрации носителей заряда. Сильнее всего этот эффект проявляется при нанесении SiO₂ на кремний р-типа. На поверхности полупроводника в этом случае возникает тонкий слой с проводимостью n-типа. Этот слой наблюдается после

термического окисления в сухой и влажной среде, но отсутствует при нанесении пленки SiO_2 путем испарения. Если снять окисел, то эффект исчезает. Это говорит о том, что он вызван пленкой

SiO_2 , в которой на границе с кремнием, скапливаются положительные заряды. Эти заряды отталкивают дырки от поверхности раздела и притягивают электроны, создавая слой n -типа. Этот эффект появляется в кремнии с высоким удельным сопротивлением, где меньше основных носителей.

Эффект изменения проводимости приповерхностного слоя может вызвать изменения характеристик транзисторов ИС. В транзисторах $n-p-n$ -типа обогащение носителями n -типа области коллектора может уменьшить пробивное напряжение. В транзисторах $p-n-p$ -типа образовавшийся на поверхности коллекторной области слой n -типа становится продолжением базы и каналом утечки тока (рис. II.13).

В процессе термического окисления кремния в его приповерхностном слое под пленкой SiO_2 наблюдается эффект перераспределения примесей, в результате которого может образоваться обогащенный или обедненный данной примесью слой. Перераспределение примеси зависит от коэффициента сегрегации m примеси на границе $Si-SiO_2$, от отношения коэффициента диффузии примеси в SiO_2 к коэффициенту диффузии в $Si-\tau$, а также от скорости и длительности окисления. Коэффициент сегрегации m есть отношение равновесной концентрации примеси в Si к равновесной концентрации примеси в SiO_2 . Значения m и порядок величины τ для некоторых примесей даны в табл. II.7.

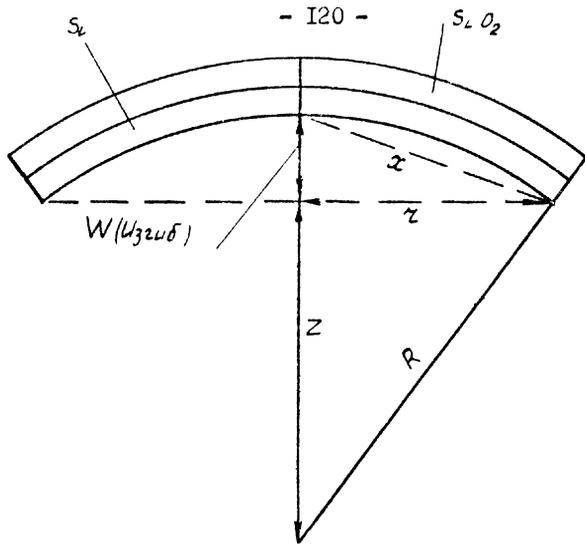


Рис.П.12. Схема деформации пластины кремния, покрытой окислом

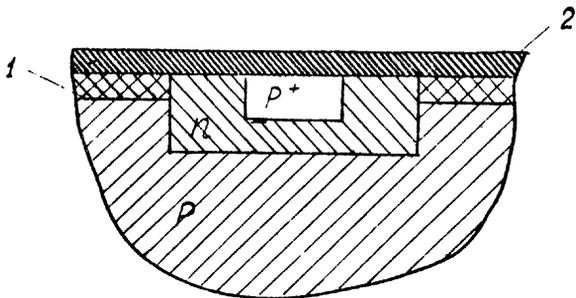


Рис.П.13. Транзистор р-п-р типа с каналом утечки на поверхности коллектора:

1 - канал п-типа (исходный материал р-типа изменил свою проводимость на обратную); 2 - пленка двуокиси кремния

Т а б л и ц а II.7

Значения m и порядок величины τ

Примесь	m	τ
Ga	~ 20	> 1
B	$\sim 0,1 + 0,3$	< 1
Tn	$> 10^3$	> 1
P, Sb, As	~ 10	< 1
Al	$< 10^{-3}$	$-$

Если коэффициент сегрегации больше единицы, то образующийся окисел "отталкивает" примесь и ее концентрация в кремнии у границы $Si - SiO_2$ возрастает (например для P). Если коэффициент сегрегации меньше единицы, окисел как бы "всасывает" примесь и в кремнии образуется обедненный примесью слой (например для Al) (рис. II.14).

На перераспределение примеси одновременно влияют и значения коэффициентов диффузии примеси в Si и SiO_2 . Если, например, коэффициент диффузии примеси в SiO_2 выше, чем в Si , то будет наблюдаться обеднение слоя Si носителями даже при $m > 1$, так как в этом случае примесь быстро диффундирует через слой SiO_2 к поверхности и испаряется. Это происходит при окислении Si с примесью Ga или Tn - концентрация этих примесей в слое Si уменьшается. P, Sb и As очень медленно диффундируют через SiO_2 , поэтому происходит накопление примесей в Si . Концентрация B в кремнии при окислении заметно не изменяется (см. рис. II.14).

Необходимо отметить, что при удалении пленки SiO_2 эффект перераспределения не исчезает.

Перераспределение примесей в приповерхностном слое Si может вызвать изменения характеристик компонентов UC . Если в кремнии имеется более одной примеси, то в результате перераспределения могут образоваться паразитные $p-n$ - переходы,

иногда многократные (рис. II.15), которые оказывают влияние на параметры ИС.

Определение толщины слоя SiO_2

Разработано несколько методов определения толщины слоя двуокиси кремния на пластинах: метод, основанный на измерении хорды лунки; микровзвешивание; двухлучевой и многолучевой интерференции; оптический поляризационный метод; радиоактивный и метод цветных оттенков Ньютона.

В практике производства полупроводниковых ИС применяют в основном оптические методы измерения и чаще всего цветовой. Этот метод основан на использовании интерференционных цветов, возникающих при отражении белого света в структуре воздух-оксид-кремний. При нормальном падении белого света на пластинку, покрытую оксидом, оператор определяет цвет пленки и сравнивает его со специальной таблицей, в которой приведены зависимости видимых цветов пленки от ее толщины. В табл. II.8 приведены значения толщины пленок в зависимости от цвета. Так как в интерференционной картине определенные цвета чередуются, необходимо знать порядок интерференций. Для определения порядка интерференций на край пластинки наносят каплю плавиковой кислоты и травливают оксид в виде клина (цветовой клин). Это дает возможность видеть на пластине всю серию окрашенных колец. По зеленым кольцам определяют порядок интерференции.

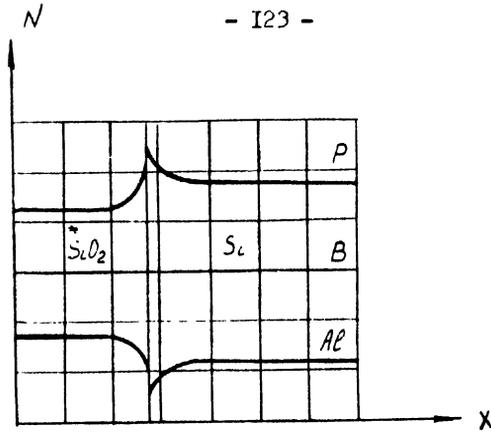


Рис.П.14. Перераспределение примесей в кремнии при окислении

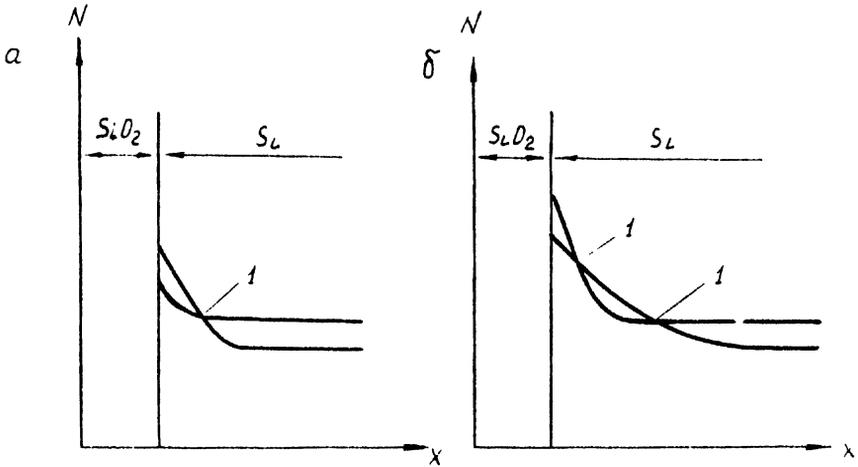


Рис.П.15. Схематическое изображение возможного образования р-п переходов при перераспределении примесей в процессе окисления кремния:

а - один р-п переход; б - два р-п перехода

Т а б л и ц а II.8

Интерференционные цвета пленок SiO_2

Цвет	Толщина SiO_2 , Å			
	Порядок интерференции			
	I	II	III	IV
Серый	100	-	-	-
Рыжевато-коричневый	300	-	-	-
Коричневый	500	-	-	-
Синий	800	-	-	-
Фиолетовый	1000	2750	4650	6500
Голубой	1500	3000	4900	6850
Зеленый	1850	3300	5200	7200
Желтый	2100	3700	5600	7500
Оранжевый	2250	4000	6000	-
Красный	2500	4350	6250	-

Необходимо заметить, что определение цвета зависит от субъективных особенностей оператора. Для уменьшения ошибок при определении цвета необходимо иметь калиброванные образцы с пленками окисла заданной толщины. Их можно помещать рядом с исследуемыми пластинами и рассматривать одновременно.

5. Фотолитография

Фотолитография – процесс получения заданного расположения и конфигурации компонентов микросхем с помощью светочувствительных покрытий-фоторезистов.

Суть метода состоит в следующем. Для получения элементов полупроводниковой ИС проводят локальную диффузию примеси. В качестве защитной маски используется слой двуокиси кремния. Для получения заданного расположения отверстий, через которые будет проводиться диффузия, и их конфигураций на окисленную поверхность полупроводниковой пластины наносится фоточувстви-

тельный слой-фоторезист, на котором методом фотопечати получают требуемый рисунок. При дальнейшей химической обработке с засвеченных участков (окон) удаляется фоторезист, но остается на незасвеченной поверхности как защитная маска. После этого проводят травление слоя SiO_2 , не защищенного фоторезистом, плавиковой кислотой (она не действует на фоторезист) и получают окна, через которые проводят диффузию примеси. Для получения точной копии рисунка схемы на подложке сначала делают фотооригинал схемы, с которого затем создается фотошаблон.

Фотооригинал (оригинал) - специальный чертеж конфигурации каждого слоя структуры микросхемы, выполненный с высокой степенью точности в увеличенном масштабе (M10:1; M100:1; M200:1 или даже M1000:1).

Фотооригинал схемы изготавливают с помощью координатографа на стекле, покрытом пленкой нитрозмали. Координатограф вычерчивает на стекле рисунок микросхемы, удаляя в необходимых местах нитрозмаль. Существующие координатографы позволяют получать точность отсчета и определения координат соответственно 12,5 и 25 мкм. Фотооригинал можно вычерчивать тушью на ватмане.

Фотошаблон - негативное или позитивное изображение оригинала, выполненное на прозрачном материале путем его фотографирования с высокой степенью точности. Изображение рисунка микросхемы на фотошаблоне получают в масштабе M1:1 неоднократным фотографированием с уменьшением.

Чаще всего фотошаблон содержит несколько изображений микросхемы (от 50 до 2000 и даже до 20000).

Процесс получения фотошаблона с размноженным изображением называется мультиплицированием.

Для изготовления фотошаблонов применяют фотопластинки с разрешающей способностью до 1200 линий на миллиметр и высоко-разрешающую оптику. В настоящее время получают элементы микросхем размером 0,7-0,4 мкм (предел разрешающей способности оптических систем 0,11 мкм).

Фотошаблоны бывают двух типов:

эмульсионные - позволяют производить не более 20 операций контактной печати;

металлизированные с пленкой хрома - позволяют производить до 3000 операций контактной печати.

Процесс получения фотошаблонов требует особого внимания и высокой точности при выполнении операций. По данным фирм США комплект фотошаблонов для производства микросхемы требует недельного срока на изготовление и стоит более 20 тыс. долларов.

Фоторезисты - это светочувствительные и после проявления устойчивые к воздействию агрессивных факторов (кислот, щелочей) составы.

Свет, действуя на эти материалы, либо разрушает молекулы, либо вызывает дополнительную полимеризацию их. В зависимости от этого по способу образования рельефа фоторезисты делят на негативные и позитивные (рис. II.16).

Позитивный фоторезист - при освещении разрушается и при проявлении удаляется с освещенных участков. Светлое поле дает не защищенный фоторезистом участок.

Негативный фоторезист - при освещении возрастает степень полимеризации и при проявлении удаляется с неосвещенных участков. Светлое пятно дает защищенный фоторезистом участок.

Кроме этого, фоторезисты делятся на кислотостойкие и щелочестойкие.

Критериями оценки фоторезистов являются:

1. Чувствительность - степень полимеризации в зависимости от длительности действия света. Различают чувствительность интегральную и спектральную.

2. Кислотостойкость - способность противостоять действию кислот. Единая оценка кислотостойкости фоторезистов пока не разработана. Предложена, например, методика определения кислотостойкости путем создания на подложке защитной пленки фоторезиста в виде треугольника с высотой, в 10 раз превышающей его основание, выдерживания этого образца в травителе в течение определенного времени и измерения величины уменьшения остроконечной вершины треугольника. Полученный результат является критерием оценки кислотостойкости.

3. Разрешающая способность - число четко различимых линий, которые фоторезист позволяет создать на 1 мм длины. В настоящее время созданы фоторезисты с разрешающей способностью слоя 1500-2000 линий на 1 мм.

Но нужно различать еще разрешающую способность всего процесса получения конфигураций на подложке.

В настоящее время созданы и применяются фоторезисты высокого качества.

Характеристики некоторых фоторезистов приведены в табл. II.9.

Т а б л и ц а II.9
Характеристики фоторезистов

Фоторезист	Т и п	Спектральная чувствительность, нм (длинноволновая граница)	Разрешающая способность, слоя/травл. SiO_2
С С С Р			
Поливинилцианимат "ЭПК" "МПВЦ" "ПВЦ" (сложный эфир поливинилового спирта и коричной кислоты)	Негативный, щелочестойкий и кислотостойкий	410	> 500/200
Нафтохинондиазид сульфоэфир с новолаком	Позитивный, кислотостойкий	480	1000/300
С Ш А			
KPR (Kodak Photo Resist) KTEP (Kodak Thin Film Resist) (разработан специально для микронэлектроники)	Негативный	450	1000/250
4z - I350	Негативный	470	2000/-
	Позитивный	490	2000/770

Технология фотолитографического процесса включает целый ряд операций, выполняемых в определенной последовательности.

Очистка поверхности подложки. В зависимости от материала, на который будет наноситься фоторезист, применяют различные способы очистки. Кремниевые пластины, покрытые слоем окисла, очищают растворителями. Рекомендуется обработка в парах трихлорэтилена, кипячение в азотной кислоте, кипячение в деионизованной воде с ультразвуковой обработкой. Применение плохо очищенных пластин сокращает выход годных изделий. Это обстоятельство имеет особое значение для технологии ИС, поскольку геометрические размеры компонентов малы, а вероятность выхода их из строя при попадании загрязнений высокая.

Нанесение фоторезиста. Разработано несколько способов нанесения фоторезиста на поверхность подложки.

В настоящее время в технологии полупроводниковых ИС чаще всего применяют центрифугирование. На подложку наносится фоторезист, который при вращении ее с большой скоростью под действием центробежных сил растекается ровным слоем по ее поверхности. С увеличением скорости вращения толщина слоя уменьшается, но до определенного предела. Для заданной концентрации (вязкости) фоторезиста существует критическая скорость, превышение которой не снижает толщины слоя (табл. II.10).

Т а б л и ц а II.10

Толщина пленки ПВХ при критической скорости вращения

Концентрация по весу, %	Критическая скорость, об/мин	Толщина пленки, мкм
5	600	0,3
10	800	0,4
15	1000	0,5

При нанесении фоторезиста при серийном производстве необходимо принимать скорость больше критической, тогда на всех под-

ложках будет достигнута одинаковая толщина пленки фоторезиста и хорошая воспроизводимость параметров схем.

Толщина пленки фоторезиста имеет существенное значение, так как от нее зависит точность воспроизведения мелких деталей на пластине.

Из-за непараллельности световых лучей при засвечивании и рассеянии их фоторезистивной пленкой в процессе экспонирования происходит засвечивание части фоторезиста под темным полем фотошаблона и уход геометрических границ при проявлении (рис. II.17). Из рисунка видно, что чем тоньше будет пленка фоторезиста, тем меньше отклонение геометрических размеров компонентов. Этот эффект будет по-разному проявляться для негативного и позитивного фоторезиста.

Недостаток этого способа заключается в том, что при попадании или образовании в растворе твердых (плотных) частичек вещества глущаем дефекты пленки-"кометы" из-за движения этих частичек от центра к периферии. Для устранения этого дефекта проводят тщательную очистку фоторезиста путем центрифугирования при 20 тыс. об/мин. в течение нескольких часов. Кроме того, имеют место напылы фоторезиста по краям пластины.

Применяется также способ нанесения пульверизацией (разбрызгиванием), который имеет ряд преимуществ: хорошо контролируется толщина пленки и ее можно менять в широких пределах от 0,5 до 20 мкм; отсутствуют утолщения на краях подложки и "кометы"; фоторезист можно наносить на продирированные подложки; адгезия лучше.

Способ нанесения фоторезиста на поверхность подложки купанием состоит в том, что пластину окунают в фоторезист и ставят на ребро. При этом фоторезист стекает с нее и застывает "клином". Для устранения этого эффекта производят повторное купание пластины и сушат на противоположном ребре.

В особых случаях наносят фоторезист поливом. При этом способе можно получить ровные слои фоторезиста толщиной до 20 мкм и более.

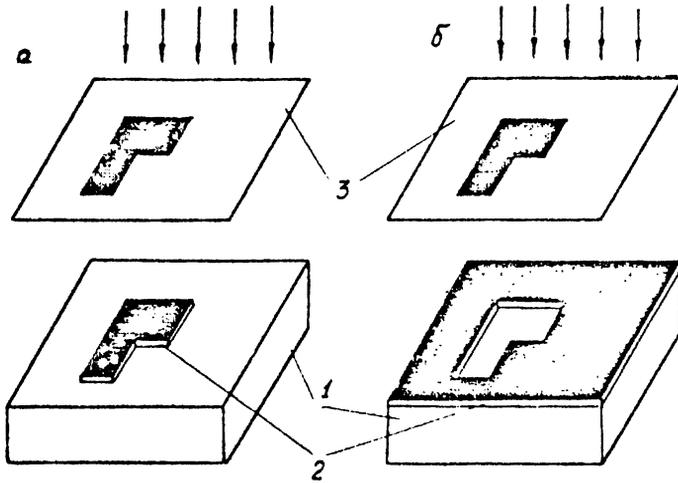


Рис. П.16. Схема положительного (а) и отрицательного (б) фоторезистора:

1 - подложка; 2 - слой фоторезиста; 3 - фотошаблон

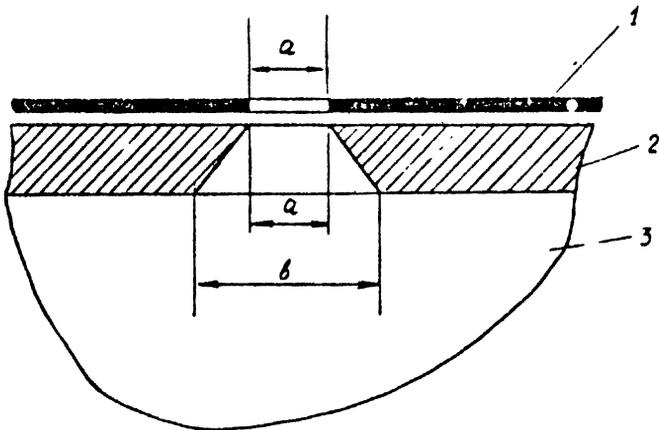


Рис. П.17. Клин засвечивания фоторезиста:

1 - фотошаблон; 2 - фоторезист; 3 - подложка
а - размер элемента на фотошаблоне; б - размер элемента на пленке фоторезиста

Сушка фоторезиста. Эта операция проводится в два этапа: сначала выдержка в течение 15 мин. при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$, затем сушка в течение 20-60 мин. при температуре $100 \pm 10^\circ\text{C}$ в лучах инфракрасной лампы ($\lambda = 0,77-340$ мкм).

При сушке фоторезиста происходит его усадка и возникающие внутренние напряжения сжимают пленку, а адгезия к подложке растягивает ее. Это явление может вызвать разрыв пленки, либо отрыв ее от подложки.

Возникающие напряжения тем меньше, чем тоньше пленка фоторезиста, поэтому нужно стремиться к уменьшению толщины пленки, если это не ограничивается другими факторами. Для того, чтобы пленка фоторезиста не разрывалась на гранях окон в пленке от предыдущих технологических операций, толщина ее должна быть больше толщины пленки SiO_2 .

Совмещение фотшаблона с подложкой. Существуют два метода совмещения фотшаблонов с подложкой:

базовый, когда выбранный участок подложки - "база" устанавливается всегда в определенном фиксированном положении; этот метод дает точность совмещения ± 10 мкм;

визуальный (сейчас преобладает), когда оператор совмещает фотшаблон с подложкой, наблюдая за контрольными отметками; этот метод обеспечивает точность совмещения от $\pm 0,25$ до 1 мкм и зависит от возможностей установки.

Экспонирование. Эту операцию можно осуществить контактным и проекционным способами. Засвечивание производят специальными лампами СВД-120, СВДШ-250, ДРШ-500 и др. Выдержка 1, 2, 3 и 4 мин.

Проявление. Для проявления фоторезист подвергают химической обработке в специальных проявителях. Для хинондиазидных позитивных фоторезистов применяют водные растворы едкого натра или тринатрийфосфата. Для негативных фоторезистов поливинилпирролинонатов применяют трихлорэтилен, толуол, хлорбензол и др.

Удаление фоторезиста. Фоторезист удаляют 2-3-х разовым кипячением по 5-10 мин в концентрированной H_2SO_4 или "хромовой смеси" (H_2SO_4 + двухромовокислый калий). Кроме того, позитивный фоторезист можно удалить холодным 10-15% раствором едкого

калия, но подложку после этого необходимо тщательно мыть.

Когда кипячение в H_2SO_4 недопустимо, например, при наличии Al , применяют кипячение в органических растворителях, чаще в трихлорэтаноле.

Выбор фоторезиста. При решении вопроса о том, какой фоторезист применять в конкретном технологическом процессе - негативный или позитивный, нужно учитывать нижеследующие обстоятельства. Совмещение фотшаблона с подложкой легче осуществить, когда виден рисунок микросхемы, т.е. когда фотшаблон прозрачный (темные пятна занимают малую площадь) и трудно совмещать, когда фотшаблон непрозрачный и оператор не видит микросхему.

При вскрытии окон в защитном слое SiO_2 на подложке, занимающих малую площадь, при покрытии ее негативным фоторезистом основной фон фотшаблона должен быть прозрачным, а окна - темные участки, будут занимать малую часть площади. Посторонние частицы, пылинки, попавшие на фотшаблон или подложку, дадут тени на фоторезисте и при проявлении в этих местах в защитной пленке будут протравлены окна - потенциальные дефекты схемы. В случае применения позитивного фоторезиста основной фон фотшаблона должен быть темным, непрозрачным и попавшие пылинки на его большей части не дадут дефектов, так как будут в тени.

Выбор фоторезиста определяется также свойствами защищаемого слоя. Например, при травлении Al можно применять как позитивный, так и негативный фоторезисты в зависимости от выбора травителя для Al . Если применен щелочной травитель (раствор едкого кали или едкого натра), фоторезист должен быть негативным, щелочестойким. В случае позитивного фоторезиста для травления Al можно применять кислотные травители (50% ортофосфорную кислоту или соляную кислоту, разбавленную в отношении 1:4, или смесь 3,8 л хлорного железа (40° Боме) и 360 мл 38% раствора соляной кислоты).

При травлении Cu применяют позитивные фоторезисты, так как Cu очень хорошо травится разбавленной (1:1) соляной кислотой.

При травлении Au применяют позитивные фоторезисты, так как травителем служит "царская водка" - смесь соляной и азотной кислот ($HCl + HNO_3$).

Травление Ta отличается своими особенностями. Пленка тантала всегда покрыта окислом этого металла. Этот окисел травится щелочами, а металл Ta только кислотами. Поэтому для работы с танталом применяют негативные щелочестойкие и кислотоустойкие фоторезисты. Сначала в щелочи травят пленку Ta_2O_5 , а после этого травят пленку тантала в плавиковой кислоте.

В зависимости от выбора фоторезиста готовят соответствующие фотосаблон: - негативные или позитивные.

Травление двуокиси кремния. Двуокись кремния хорошо травится водным раствором плавиковой кислоты, но при этом из-за интенсивного выделения пузырьков SiF_4 пленка защищающего фоторезиста отслаивается от SiO_2 и разрывается у границ вытравливаемых окон. В результате этого наблюдается сильное растравливание слоя SiO_2 . Для устранения этого недостатка применяют травители, содержащие в своем составе, кроме HF, также соли плавиково-кислоты (NH_4F , KF , NaF), называемые буферными. Типовой буферный травитель состоит из 10 мл 48% HF и 100 мл раствора NH_4F (450 г NH_4F : а 680 мл воды). Скорость травления пленки SiO_2 в этом травителе составляет 6,8-9,5 Å/сек. Если в пленку SiO_2 вводятся новые составляющие, скорость ее травления значительно изменяется. Например, при наличии в пленке окисла примеси P_2O_5 (над эмиттерными n^+ -областями) скорость травления в буферном травителе возрастает до 259 Å/сек. После травления пластины кремния промываются в деионизованной воде с применением ультразвука, затем сушатся при температуре 120°C.

6. Диффузия примесей в полупроводниках.

Особенности процесса диффузии

В технологии ИС диффузия, как метод введения примесей в полупроводники для получения р-п-переходов, имеет первостепенное значение. Так как от свойств р-п-переходов зависят основные характеристики ИС, а свойства р-п-переходов зависят от распределения примесей в структурах полупроводников, получаемых методами диффузии, то к процессам диффузии предъявляются жесткие требования: выдерживание толщины диффузионных слоев в пределах 1 мкм

и высокая точность поверхностной концентрации примесей, для чего необходимо регулировать температуру и время диффузионных процессов.

Диффузией называется процесс переноса молекул или атомов вещества, происходящий в результате их хаотического теплового движения. Этот процесс наблюдается в любом агрегатном состоянии вещества, но скорости диффузии очень сильно зависят от состояния вещества. В твердых телах скорости процессов диффузии в миллиарды раз медленнее, чем в газах, и в миллионы раз медленнее, чем в жидкостях. Если в твердом теле создать градиент концентрации атомов другого элемента, то, несмотря на хаотический характер движения отдельных частиц, будет существовать составляющая скорости, направленная в сторону уменьшения концентрации, до тех пор пока концентрация частиц другого элемента не выравняется по всему объему твердого тела. Необходимо отметить, что сколь угодно заметные процессы диффузии в твердом теле происходят только при достаточно высоких температурах (свыше 800-1000°C). При обычной "комнатной" температуре процессов диффузии в твердых телах практически не наблюдается.

Теория процесса диффузии

Основные уравнения процесса диффузии выведены аналитически посредством макроскопического подхода к явлению, что не противоречит атомистическому строению вещества.

Если в некотором объеме полупроводника создать повышенную по отношению к другим его частям концентрацию атомов примесей, то в результате процесса диффузии установится поток частиц примеси в область с меньшей концентрацией. Этот процесс описывается уравнением первого закона Фика

$$J = -D \operatorname{grad} N, \quad (П.70)$$

где J - поток частиц примеси через единицу плоскости, нормальную к направлению градиента концентрации, в единицу времени, $\text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$;
 D - коэффициент диффузии, $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$;
 N - концентрация частиц примеси, см^{-3} .

Знак минус в правой части уравнения означает, что диффузия происходит в направлении уменьшения концентрации примеси. Первый закон Фика показывает, что наличие градиента концентрации вызывает диффузию примеси из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией.

В общем случае процесс диффузии может быть анизотропным, но в кремнии и в других полупроводниках из-за симметрии кубической решетки диффузия практически изотропна и коэффициент диффузии является скалярной величиной. В технологии ИС применяются монокристаллические полупроводники и в теории диффузии не учитываются неоднородности структуры (границы зерен и т.д.), которыми можно пренебречь, так же как и изменениями объема образца, поскольку концентрации вводимых примесей достаточно малы. Кроме того, в технологии полупроводниковых ИС в основном создаются плоскопараллельные структуры и можно для анализа ограничиться одномерной моделью процесса диффузии (рис. II.18), для которой уравнение (II.20) примет вид

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} . \quad (II.21)$$

Из рис. (II.18) следует, что число частиц, проходящих вдоль оси X через единицу площади плоскости S_1 , равно

$$J_1 = -D \frac{\partial N}{\partial x} , \quad (II.22)$$

а через единицу площади плоскости S_2 , отстоящую от S_1 на расстоянии dx

$$J_2 = J_1 + \frac{\partial J}{\partial x} dx , \quad (II.23)$$

или подставляя значения величин из формулы (II.22),

$$J_2 = -D \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial N}{\partial x}) dx . \quad (II.24)$$

Разность потоков через плоскости S_1 и S_2 дает скорость изменения концентрации примеси в объеме между плоскостями

$$J_1 - J_2 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi \frac{\partial N}{\partial x} \right) dx. \quad (\text{II.25})$$

С другой стороны, скорость изменения концентрации между плоскостями S_1 и S_2 можно выразить как

$$\frac{\partial N}{\partial t} dx. \quad (\text{II.26})$$

Уравнения (II.26) и (II.25) характеризуют одну и ту же величину и могут быть приравнены

$$\frac{\partial N}{\partial t} dx = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi \frac{\partial N}{\partial x} \right) dx \quad (\text{II.27})$$

или окончательно

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \varphi \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}. \quad (\text{II.28})$$

Выражение (II.28) представляет собой аналитическое выражение второго закона Фика, который устанавливает связь между изменением градиента концентрации примеси в пространстве и изменением концентрации во времени при диффузии.

Решая уравнение (II.28) для определенных граничных условий, получим выражения для концентрации примеси N как функцию координаты пространства x и времени t , т.е. характер распределения примеси в образце. В процессах диффузии при производстве ИС условием является то, что примеси диффундируют в тело полупроводника только с одной стороны и не достигают противоположной его границы. Это дает возможность выбрать для анализа модель полубесконечного образца, ограниченного плоскостью с координатой $x=0$. Поскольку электрические свойства полупроводника

определяются разными концентрациями примесей донорного или акцепторного типов, считаем при анализе значение концентрации акцепторных примесей положительными, а донорных - отрицательными. Тогда при определении суммарной концентрации ее знак будет определять тип проводимости в данной точке. И кроме того, полагаем, что при диффузии разные примеси не взаимодействуют друг с другом и каждая примесь диффундирует независимо от других.

В практических задачах при производстве полупроводниковых ИС представляют интерес следующие нижеперечисленные случаи диффузии.

1. Диффузия из бесконечного (постоянного) источника примеси.

Диффузия происходит в полупроводниковую пластину, диаметр которой много больше ее толщины, на глубину, много меньшую толщины самой пластины. Под бесконечным, или постоянным, источником понимается такое состояние системы, когда количество примеси, уходящей из поверхностного слоя полупроводника в его объем, равно количеству примеси, поступающей в поверхностный слой. Этому требованию удовлетворяет источник примеси с бесконечно большим содержанием атомов, которые в источнике и у поверхности полупроводниковой пластины имеют скорости значительно большие, чем в материале пластины. Начальные граничные условия для этого случая

$$N(x > 0, 0) = 0; \quad N(0, t \geq 0) = N_0, \quad (\text{П.29})$$

где x - расстояние от поверхности;

$x=0$ - координата поверхности, через которую проводится диффузия;

N_0 - поверхностная концентрация примеси, поддерживаемая постоянной в течение всего процесса;

$N(x, t)$ - концентрация диффундирующей примеси на любой глубине в любое время;

t - время диффузии.

При этих условиях решение уравнения второго закона Фика (II.28) имеет вид

$$N(x, t) = N_0 \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-\lambda^2) d\lambda \right], \quad (\text{II.30})$$

где λ - переменная интегрирования.

Второй член в квадратных скобках представляет собой выражение функции ошибок в уравнение (II.30) можно записать

$$N(x, t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (\text{II.31})$$

или

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (\text{II.32})$$

где erfc - символ, обозначающий дополнение функции ошибок до единицы (*error function complement*).

Формула (II.32) описывает распределение концентрации примеси в зависимости от координаты (т.е. глубины от поверхности пластины) и времени (рис. II.19). Из формулы (II.32) видно, что распределение примеси определяется поверхностной концентрацией примеси N_0 , коэффициентом диффузии D и временем диффузии t . Если процесс диффузии прервать, а затем возобновить, то общее распределение примеси примет вид

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2}}. \quad (\text{II.33})$$

В этом выражении индексы 1 и 2 относятся соответственно к первой и второй стадиям процесса.

2. Диффузия из конечного (ограниченного) источника примеси.

Условия этого способа диффузии выполняются следующим образом: в тонком приповерхностном слое полупроводниковой пластины h создается избыточная концентрация примеси N_0 ("загонка"), после чего поверхность пластины покрывается материалом с значительно меньшим, чем у полупроводника, коэффициентом диффузии (например, SiO_2) и подвергается нагреву, во время которого

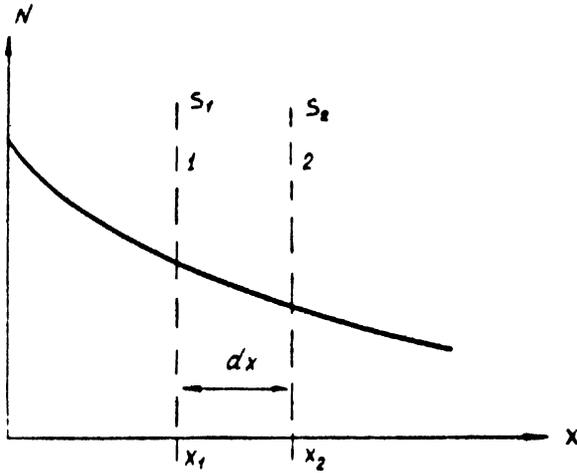


Рис. П.18. Одномерная модель процесса диффузии

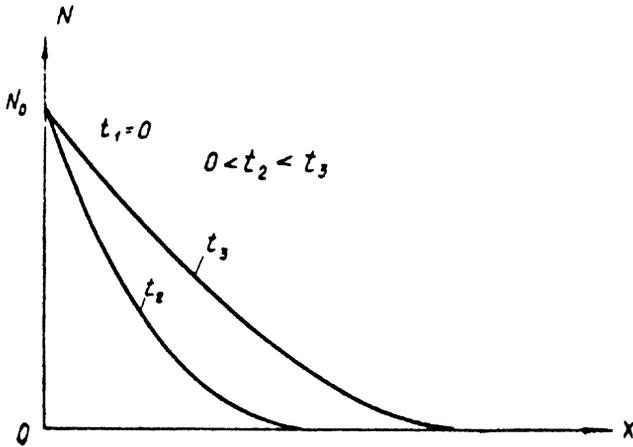


Рис. П.19. График распределения атомов примеси в полупроводнике по закону функции ошибок

происходит диффузия примеси вглубь пластины ("разгонка"), а на ее границе (при $X=0$) поток примеси практически равен нулю в течение любого времени.

Начальные граничные условия для этого случая

$$N(x, 0) = \begin{cases} N_0, & 0 \leq x < h \\ 0, & x > h \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

При этих условиях решение уравнения второго закона Фика (II.28) имеет вид

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{D t}} \right)^2 \right], \quad (\text{II.35})$$

где Q - общее количество примеси в полупроводниковой пластине в любой момент времени.

Уравнение (II.35) представляет собой функцию распределения Гаусса и показывает распределение примеси в зависимости от глубины и времени (рис. II.20).

Из сравнения уравнений (II.32) и (II.35), описывающих распределение примеси для двух основных типов граничных условий, видно, что в первом случае концентрация примеси на границе пластины остается постоянной, а внутри пластины все время повышается и при $t \rightarrow \infty$ $N(x, t) \rightarrow N_0$. Во втором случае концентрация примеси на поверхности все время постоянно уменьшается и при $t \rightarrow \infty$ общее количество примеси в пластине Q стремится к равномерному распределению на всей глубине пластины. Для случая диффузии из бесконечного источника рассмотрим несколько частных примеров.

Скорость потока примеси через любую плоскость, перпендикулярную оси x на единицу площади, можно определить, подставив формулу (II.32) в (II.21) и проведя дифференцирование по x под знаком интеграла

$$J(x, t) = \frac{D N_0}{\sqrt{\pi D t}} \exp \left(- \frac{x^2}{4 D t} \right). \quad (\text{II.36})$$

Скорость потока примеси, например, через поверхность пластины (при $x=0$) будет равна из уравнения (II.36)

$$J(t) = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (\text{II.37})$$

Общее количество примеси, диффундировавшей в пластину на единицу площади ее поверхности за время t с учетом вырежения (II.37), можно описать как

$$Q = \int_0^t J(t) dt = \int_0^t N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} dt = 2 N_0 \sqrt{\frac{D t}{\pi}}. \quad (\text{II.38})$$

Когда в пластине полупроводника, в которую проводится диффузия, уже имеется равномерно распределенная по всему объему примесь противоположного знака с концентрацией

$$N_6(x, t) = \text{const}, \quad (\text{II.39})$$

распределение суммарной концентрации примеси, или остаточную концентрацию, на основании формул (II.32) и (II.39) можно записать как

$$N_{\text{ост}} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - N_6. \quad (\text{II.40})$$

Из этого уравнения следует, что на некотором расстоянии от поверхности $x = x_j$ кривая распределения диффундирующей примеси пересечет линию, характеризующую начальную концентрацию примеси противоположного знака в пластине (рис. II.21). В этой точке концентрации примесей будут равны и компенсируют одна другую. Слева от x_j будет преобладать примесь одного знака, справа - другого. Эта точка является границей р-п-перехода, глубина залегания которого x_j может быть определена из уравнения (II.40) при условии равенства нулю остаточной концентрации примесей

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_6}{N_0} \right). \quad (\text{II.41})$$

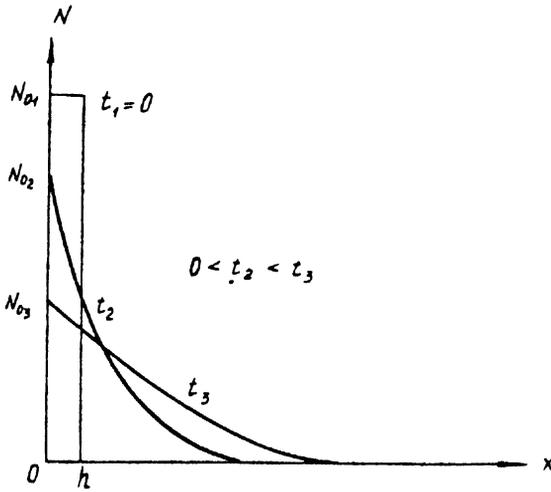


Рис. П.20. График распределения атомов примеси в полупроводнике по закону Гаусса

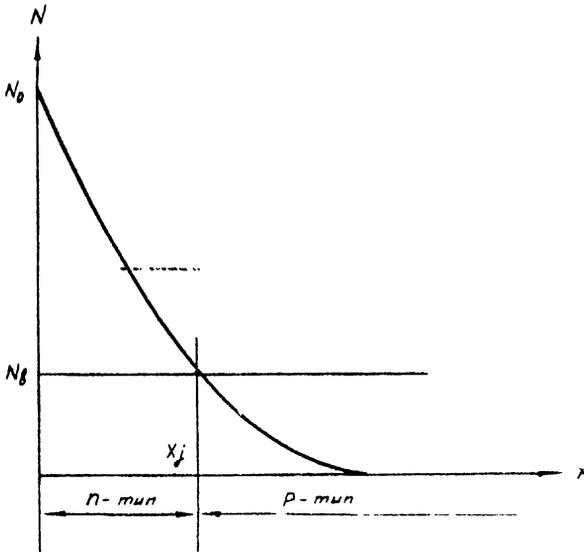


Рис. П.21. График распределения донорной примеси в полупроводнике p -типа с равномерной концентрацией акцепторов N_8

Если пластину полупроводника полубесконечной формы, имеющую равномерно распределенную примесь концентрации N_0 , нагревать и поддерживать поверхностную концентрацию равной нулю, из пластины начнется процесс диффузии и концентрация примеси в ней будет убывать. Граничные условия для данного случая

$$N(x > 0, 0) = N_0 \quad ; \quad N(0, t \geq 0) = 0. \quad (\text{II.42})$$

Решение уравнения (II.28) для данных граничных условий имеет вид

$$N(x, t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t}} \right). \quad (\text{II.43})$$

Формула (II.43) описывает распределение концентрации примеси в пластине при диффузии наружу (рис. II.22).

Если в полупроводниковую пластину с начальной однородной концентрацией основной примеси N_0 провести диффузию примеси противоположного знака с поверхностной концентрацией N_1 и учитывать диффузию основной примеси наружу (рис. II.23), то на основании формул (II.32) и (II.43) суммарное распределение примеси в пластине будет определяться выражением

$$N_{\text{ост}}(x, t) = N_1 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} + N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t}} - N_0, \quad (\text{II.44})$$

где D_0 - коэффициент диффузии основной примеси.

При данных условиях диффузии р-п-переход будет образован на расстоянии x_j от поверхности, где остаточная концентрация примеси обращается в ноль. Для случая, когда коэффициенты диффузии основной примеси и диффундирующей внутрь равны (для фосфора и бора это приближенно выполняется), глубина р-п-перехода определяется выражением

$$x_j = 2\sqrt{D_0 t} \operatorname{erfc}^{-1} \frac{N_0}{N_1 + N_0}. \quad (\text{II.45})$$

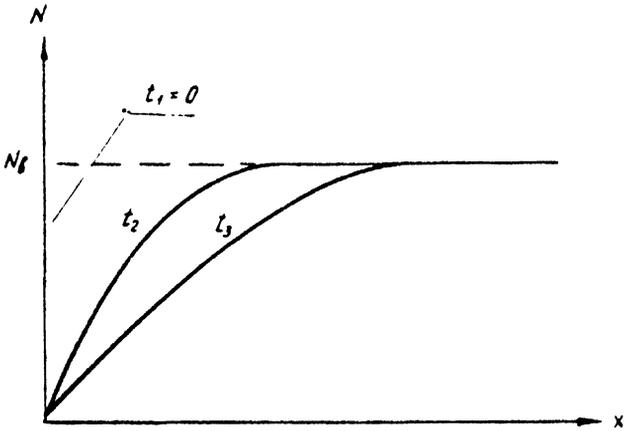


Рис. П.22. График распределения примеси в полупроводнике при диффузии наружу

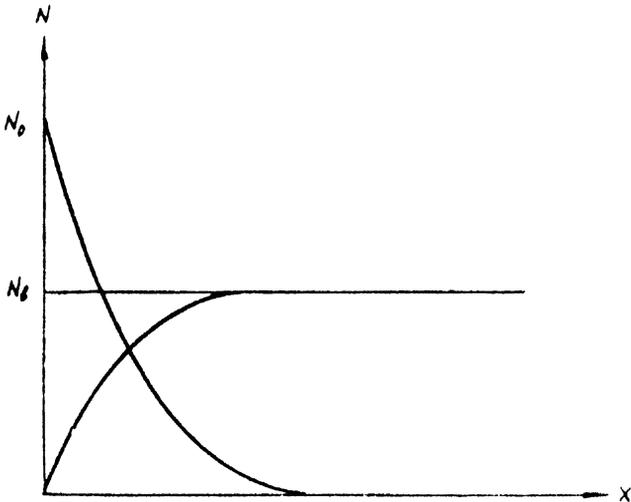


Рис. П.23. График распределения примесей в полупроводнике при одновременной диффузии внутрь и наружу

При создании многослойной структуры полупроводниковой ИС иногда необходимы три последовательные стадии диффузии в одной области пластины. Последующая диффузия может осуществляться при высоких температурах и влиять на глубину залегания р-п-переходов, созданных в предыдущих циклах. Для учета этих влияний вносятся поправки для коэффициентов диффузии и времени диффузии в различных циклах, в результате чего получаются выражения профиля суммарной концентрации примесей.

Приведенные выше теоретические формулы, описывающие процесс диффузии в полупроводниках, иногда в какой-то степени расходятся с экспериментальными данными. Это объясняется тем, что принятые в описанной выше модели диффузии граничные условия выполняются не строго в реальных условиях. Кроме того, коэффициент диффузии при практическом ее осуществлении зависит как от концентрации примеси, так и от взаимодействия между атомами примеси и других причин. Поэтому при проектировании технологического процесса производства интегральных схем окончательные решения о его параметрах необходимо принимать после опытной проверки.

Факторы, влияющие на процесс диффузии

Растворимость диффузанта в твердой фазе полупроводника. Диффузия примесей тесно связана с явлением растворимости одного вещества в другом. Известно, что все вещества и твердые тела в том числе образуют растворы друг с другом по определенным законам. Фазовые состояния этих растворов характеризуются диаграммой состояний, которая представляет собой графический способ описания фаз, находящихся в равновесии, при различных сочетаниях переменных величин (состава, давления и температуры). При определенной температуре в данном веществе может раствориться строго определенное количество другого вещества.

Растворимость в твердой фазе — это максимально возможная концентрация элемента в твердом теле при любой температуре. Растворимость в твердой фазе определяет верхний предел концентрации примеси данного типа в полупроводнике.

Требуемая максимальная концентрация диффузанта должна быть меньше твердой растворимости данного диффузанта в данном полупроводниковом материале.

В табл. II.II приведены максимальные растворимости примесей в Si.

Т а б л и ц а II.II

Максимальная растворимость примесей в кремнии

Элементы	Максимальная растворимость, атом/см ³	Температура максимальной растворимости, °C
1	2	3
Алюминий	$10^{19} - 10^{20}$	1150
Бор	$5 \cdot 10^{20}$	1200
Фосфор	$1.3 \cdot 10^{21}$	1150
Галлий	$4 \cdot 10^{19}$	1250
Индий	$> 10^{19}$	1300
Сурьма	$6 \cdot 10^{19}$	1300
Мышьяк	$2 \cdot 10^{21}$	1150
Золото	10^{17}	1300

Кристаллическая структура полупроводника и чистота его поверхности. Эти факторы оказывают существенное влияние на диффузионный процесс, особенно на распределение примесей в локализованных областях внутри диффузионных зон.

Если на поверхности пластины будут посторонние частицы или нарушения структуры, это может привести к нарушению равномерности распределения примесей, к образованию р-р-переходов с изменяющейся глубиной залегания, а в транзисторных структурах это приводит к неравномерности толщины базы и изменению свойств транзисторов.

Дефекты кристаллической структуры могут явиться центрами местной концентрации примеси и изменить электрические свойства получаемых р-п-переходов.

Если материал одного вида - примесь - диффундирует в материал другого вида, то, очевидно, в кристаллической (атомной) решетке основного материала все узлы заняты основными атомами и только в некоторых узлах или междоузлиях находятся атомы примеси. Механизм перемещения атомов примеси в материале можно выяснить, основываясь на наших представлениях об атомном строении вещества, поскольку непосредственно наблюдать перемещение одного атома невозможно. Так как атомы в решетке находятся в переменном потенциальном поле, то они могут двигаться скачками длиной, равной одному атомному диаметру, т.е. нескольким ангстремам. В сумме эти прыжки обеспечивают перемещения атомов на большие расстояния. Существует несколько возможных схем движения частиц.

Движение вакансий (рис. II.24). Этот механизм возможен, когда в решетке имеются вакансии и атомы обмениваются с ними местами. Процесс зависит от двух факторов: образования вакансий и их перемещения.

Обменный механизм движения (рис. II.25). При этом механизме атомы просто меняются местами. Существует несколько способов обмена: обмен местами двух атомов и кольцевой механизм обмена, при котором местами могут меняться последовательно три, четыре и большее число атомов.

Движение атомов внедрения (рис. II.26) или междоузельный механизм диффузии. Атом примеси внедряется в междоузлие основной решетки и движется по междоузлиям скачками.

Обычно диффузия осуществляется несколькими механизмами, но с точки зрения энергетической наиболее вероятен вакансионный механизм. В случае, если диаметр атомов примеси значительно меньше диаметра атомов основного материала, происходит очень быстрая диффузия по междоузлиям. Например, металлы литий и калий очень быстро диффундируют в полупроводниках (коэффициент диффузии лития в германии при температуре 800°C равен $8,6 \cdot 10^{-5}$ см²/сек.).

Неоднородности в кристаллах оказывают существенное влияние на механизмы диффузии и, следовательно, на величины коэффициента

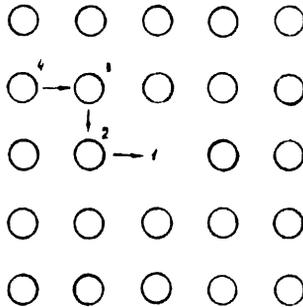


Рис. П.24. Схема движения вакансий

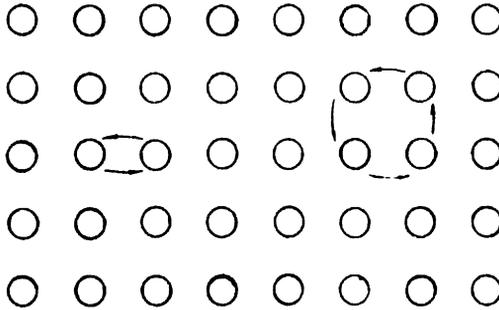


Рис. П.25. Обменный механизм движения

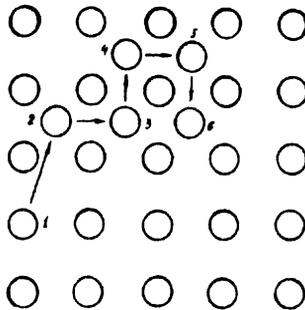


Рис. П.26. Схема движения атомов внедрения

диффузии. Наличие дислокаций ускоряет процессы диффузии и возникают области с повышенной концентрацией носителей. Кроме того, при изменении температуры дислокации перемещаются, генерируя вакансии в кристаллической решетке, что также ведет к увеличению скорости диффузии.

Замечена также зависимость коэффициента диффузии от предельной концентрации примеси в полупроводнике. Если при высоких температурах достигается предельная концентрация примеси в полупроводнике, то при снижении температуры примесь переходит в новую фазу с другим (большим или меньшим) удельным объемом, чем у основного кристалла. Это вызывает деформации и появление дислокаций (облака Коттрелла). Дислокации движутся, генерируя вакансии, что приводит к локальному увеличению коэффициента диффузии.

Кроме того, вакансии и примеси могут быть электрически активными, что ведет к образованию электрических полей, которые оказывают иногда существенное влияние на коэффициент диффузии (например, эмиттерная диффузия проводится в электрическое поле, созданное примесью в базе).

Может наблюдаться даже восходящая диффузия, диффузия против градиента концентрации, за счет сильных электрических полей, существующих в кристалле.

Температура диффузии. Коэффициент диффузии сильно зависит от температуры. Чем выше температура, тем выше энергия атомов диффузанта и больше их скорость через решетку кристалла. Эта зависимость выражается уравнением Аррениуса

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{\Delta E}{kT} \right), \quad (II.46)$$

где ΔE - энергия активации, эв;
 T - абсолютная температура, $^{\circ}K$;
 D_0 - постоянная величина ($cm^2/сек$), зависящая от частоты прыжков атомов, длины прыжков и количества возможных мест, которые может занять атом в решетке. Это кажущаяся величина коэффициента диффузии при $T^0 \rightarrow \infty$.

D_0 не зависит от T^0 .

$k=8,6 \cdot 167 \cdot 10^{-5}$, эв.град $^{-1}$ - постоянная Больцмана.

Постоянные величины, входящие в уравнение (II.46), определяются экспериментально и даны в табл. II.12 для Si и Ge.

Т а б л и ц а II.12
Значения постоянных для определения \mathcal{D}

Материал	\mathcal{D}_0 , см ² /сек	ΔE , эв
<u>Для диффузии в кремний</u>		
Бор	2,5	3,51
Алюминий	4,8	3,36
Индий	1,5	3,90
Мышьяк	68,6	4,23
Сурьма	12,9	3,98
Висмут	10,30	4,64
Золото	$1.1 \cdot 10^{-3}$	1,12
<u>Для диффузии в германий</u>		
Бор	4,0	4,5
Галлий	$5,0 \cdot 10^{-2}$	2,5
Индий	$6,0 \cdot 10^{-2}$	2,5
Фосфор	2,0	2,5
Мышьяк	6,0	2,5
Сурьма	12,0	2,5

Коэффициент диффузии фосфора в кремний может быть определен по эмпирическим формулам

$$\mathcal{D} = 10^{-3} \exp\left(-\frac{2,52}{kT}\right), \quad (\text{П.47})$$

или $\mathcal{D} = 10,5 \exp\left(-\frac{3,69}{kT}\right), \quad (\text{П.48})$

коэффициент диффузии галлия в кремний по формуле

$$\mathcal{D} = 3,6 \exp\left(-\frac{3,51}{kT}\right), \quad (\text{П.49})$$

значения k и T в этих формулах такие же, как в формуле (П.46).

Из приведенных данных видно, что коэффициенты диффузии различных элементов в полупроводниках экспоненциально зависят от температуры и при изменении температуры на несколько градусов значение коэффициента диффузии может измениться вдвое. По этой причине при производстве ИС в зонах, где проводится диффузия, необходимо очень точно поддерживать температуру в интервале 1000–1300°C с точностью до $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Время диффузии. Как в случае диффузии по дополняющей функции ошибок, так и в случае распределения Гаусса время входит в формулы только в произведении с коэффициентом диффузии $D t$, поэтому изменение времени диффузии оказывает такое же влияние на глубину залегания p-n-переходов, как и изменение коэффициента диффузии. Время, как параметр процесса, легко поддается контролю, но в реальных условиях необходимо учитывать инерционные свойства процесса, время разогрева и остывания образцов. На практике в технологии диффузии всегда используют одну неизменную термическую массу системы и устанавливают постоянные скорости загрузки и выгрузки образцов.

Методы диффузии

В технологии изготовления полупроводниковых ИС диффузию примесями осуществляют следующими методами: диффузия в открытой трубе в потоке газа-носителя, диффузия в ампулах, в вакууме и бокс-метод. Диффузия для кремниевых ИС часто проводится в две стадии. Вначале на поверхности пластины создается относительно тонкий диффузионный слой с высокой концентрацией примеси, а затем пластина нагревается в атмосфере, не содержащей примеси, и происходит перераспределение примеси в пластине из приповерхностного слоя. Этот способ диффузии имеет ряд преимуществ перед способом проведения диффузии в одну стадию: 1) лучше осуществляется контроль параметров получаемого диффузионного профиля и воспроизводимость ИС, так как на второй стадии можно, управляя процессом, вносить поправки для устранения погрешностей, имевших место на первой стадии; 2) легче осуществлять маскировку, так как предварительную стадию—"загонку" можно проводить при более низкой температуре и иметь для маскировки более тонкий слой пленки; 3) получаемое при этом способе распределение примеси по функции Гаусса чаще более желательно, чем распре-

ление по дополняющей функции ошибок, получаемое при диффузии в одну стадию.

Метод открытой трубы. Этот метод в технологии кремниевых ИС применяется наиболее широко. Диффузия осуществляется в кварцевой трубе с открытым выходным концом (рис. II.27). Входной конец трубы соединен с системой подачи газа-носителя, которая дает возможность подавать в трубу газ-носитель с необходимыми скоростью и составом. Труба помещается в двух нагревательных печах, создающих зоны с высокой температурой (бывают установки с одной зоной нагрева). В низкотемпературной зоне, первой по ходу газа-носителя, помещают источник примеси, а в высокотемпературной зоне ближе к выходу из трубы помещают в специальной кварцевой лодочке пластины кремния. Газ-носитель, поступающий из системы подачи газа, вытесняет из трубы воздух. Проходя сначала в зоне источника примеси, захватывает испарившиеся атомы примеси и переносит их в зону, где находятся пластины. Атомы оседают на поверхности пластин кремния и диффундируют внутрь пластин. Источники примеси могут быть твердыми, жидкими и газообразными и в зависимости от этого существуют разные способы введения примеси в систему. При твердом источнике примеси применяется метод введения диффузанта в систему, описанный выше, т.е. частицы твердого источника помещаются в лодочке в зоне нагрева в реакционной трубе. При использовании жидких источников примеси применяют специальные питатели двух типов (рис. II.28). В первом газ-носитель проходит над поверхностью жидкого источника и захватывает испарившиеся атомы примеси, во втором газ-носитель проходит через жидкий источник примеси в виде пузырьков (барборирует) и насыщается атомами диффузанта. Если применяется газообразный источник примеси, то газ-диффузанта из специальных баллонов подается в систему и смешивается с газом-носителем в необходимой пропорции.

В технологии кремниевых ИС в качестве источников при диффузии фосфора используются: газообразные - фосфин PH_3 ; жидкие - хлор-окись фосфора POCl_3 , испаряется при температуре от 2 до 40°C , трибромид фосфора PBr_3 , испаряется при температуре 170°C и применяется в атмосфере без кислорода, а также трихлорид фосфора PCl_3 ; твердые - пятиокись фосфора P_2O_5 , испаряется при темпе-

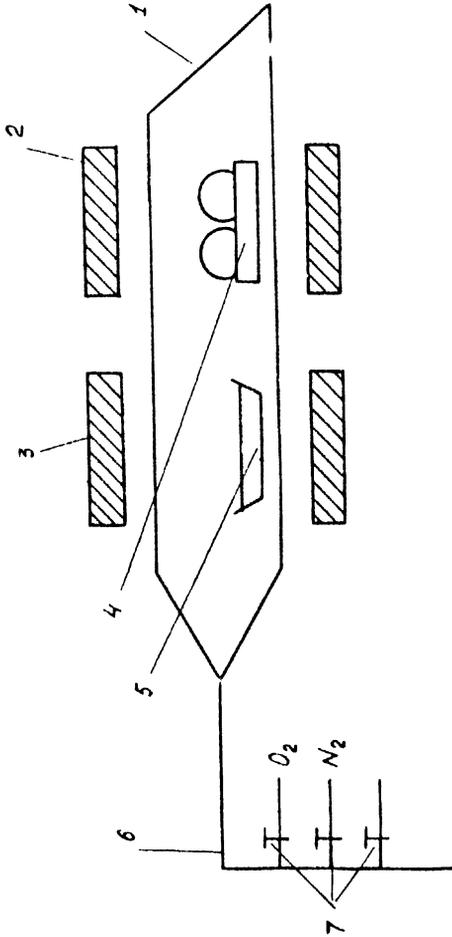


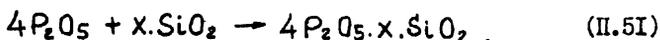
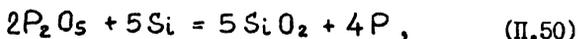
Рис. П.27. Схема установки для диффузии методом открытой трубки:

1 - кварцевая труба; 2 - высокотемпературная печь; 3 - низкотемпературная печь; 4 - лодочка с пластинами кремния; 5 - лодочка с диффузантом; 6 - газовая система; 7 - краны

ратуре 215-300°C, фосфаты аммония одноосновный $NH_4H_2PO_4$ и двуосновный $(NH_4)_2HPO_4$, испаряются при температуре 450-900°C, а также элементарный красный фосфор (редко) в атмосфере без кислорода, так как они бурно реагируют друг с другом. Источниками при диффузии бора являются: газы - BCl_3 , BF_3 , B_2J_3 и диборан B_2H_6 ; жидкие - BBr_3 , метилборат; твердые - окись бора B_2O_5 и борная кислота H_3BO_3 . В качестве источников примеси также применяют трехокись мышьяка As_2O_3 и арсин AsH_3 для диффузии As , четырехокись сурьмы Sb_2O_4 для диффузии Sb , CoO_3 для диффузии галлия.

В процессе диффузии примесей, если источниками их служат P_2O_5 или B_2O_3 , на поверхности кремния образуются сложные соединения фосфорносиликатные или боросиликатные стекла.

Например, для P_2O_5



Образовавшиеся стекла тонкой пленкой покрывают поверхность кремния и, находясь в жидком состоянии, являются как бы промежуточным источником примеси, которая поступает к поверхности кремния более равномерно. Кроме того, пленка стекла защищает поверхность кремния от испарения и попадания посторонних частиц.

Ампульный метод. При этом способе диффузии пластины кремния вместе с некоторым количеством примеси помещают в сосуды-ампулы из кварцевого стекла, которые либо заполняются инертным газом до определенного давления, либо в них создается высокий вакуум, после чего ампула запаивается (рис. II.29). Запаиваемая ампула нагревается до высокой температуры и выдерживается определенное время (от нескольких минут до нескольких суток), при этом диффузانت испаряется и в виде пара переносится на поверхность пластины и диффундирует в кремний. К недостаткам этого метода нужно отнести: затраты большого количества времени на запаивание ампул, высокая стоимость ампул, используемых только однократно, невозможность по-

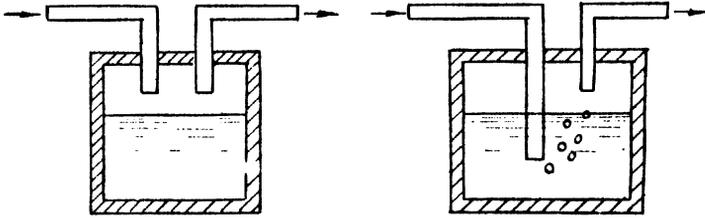


Рис. П.28. Питатели для диффузанта

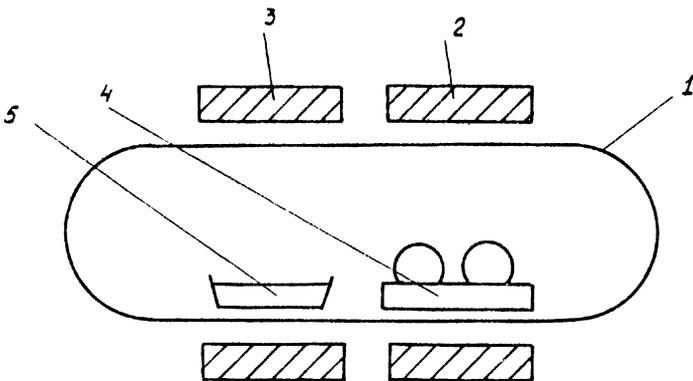


Рис. П.29. Схема ампульного метода диффузии:
1 - ампула; 2 - высокотемпературная печь;
3 - низкотемпературная печь; 4 - лодочка с
пластинами полупроводника; 5 - лодочка с диф-
фузантом

вышения температуры выше предела, при котором ампула разрушается, и кроме того, любое вещество, которое случайно попадает в ампулу, при загрузке будет диффундировать в кремний.

Другие методы диффузии. Существует метод диффузии, аналогичный ампульному, но с поддержанием в системе высокого вакуума в течение всего технологического цикла.

Предложен также бокс-метод диффузии, в основе которого лежит предположение о том, что между окислом на поверхности пластины кремния и находящимся рядом с ним окислом кремния, смешанным с примесями, если их поместить в замкнутый объем и нагреть, устанавливается стехиометрическое равновесие. Испаряющиеся примеси попадают на поверхность пластины кремния и адсорбируются до тех пор, пока содержание их на поверхности не станет равно содержанию их в смеси. Образовавшийся на поверхности пластины окисел превращается в источник легирующей примеси. По этому методу можно осуществлять одновременную диффузию двух примесей. Если в противоположных концах бокса поместить источники, содержащие в одном конце 3% Sb, в другом 0,1% В, а в центре бокса поместить пластины кремния, то при соответствующем регулировании температуры источников и пластины во времени можно на подложке п-типа получить п-р-п - структуру.

Существует также метод диффузии из нанесенного источника, при котором на одну из сторон полупроводниковой пластины наносится слой источника примеси (например, термическим напылением в вакууме), после этого пластина нагревается в печи по методу открытой трубы в неокисляющей атмосфере и примесь диффундирует в пластину. Эта методика используется при проведении диффузии золота в кремний.

Диффузией Au в Si создают рекомбинационные центры, понижающие время жизни неосновных носителей в полупроводнике. Это делают при создании интегральных схем, работающих в ключевом режиме с высоким быстродействием. При диффузии золота в кремнии наблюдается междоузельный механизм диффузии с очень высокими скоростями, на несколько порядков превышающими скорости диффузии элементов III и V групп. Например, при нанесении золота напылением на пластину кремния толщиной 150 мкм и выдерживания в атмосфере сухого азота

в течение 48 мин при 970°C золото диффундирует сквозь всю пластину. На практике диффузию золота проводят последней по окончанию всех термообработок кремниевых пластин и после диффузии пластины быстро охлаждают, чтобы золото не выделилось из решетки кристалла.

Оборудование для осуществления процессов диффузии

Диффузия примесей осуществляется в диффузионных печах. Схема двухзонной диффузионной печи представлена на рис. II.30. Печь состоит из реакционной кварцевой трубы 1, низкотемпературной печи 2, высокотемпературной печи 3, системы подачи газов 4, системы очистки газов 5 и системы регулирования температуры 6. Диффузионные печи применяются в технологии ИС не только для осуществления диффузии, но и для проведения операции окисления поверхности пластин, а также для других видов термической обработки (отжиг, пиролиз и т.д.).

К диффузионным печам предъявляются следующие основные требования:

возможность точного установления, поддержания и воспроизведения температуры в камерах печи. Колебания температуры в камере источника не должны превышать $\pm 1^\circ$, в камере диффузии - не более $\pm 0,5^\circ$. Это вызвано тем, что коэффициент диффузии экспоненциально зависит от температуры и изменение температуры на 1° вызывает изменение коэффициента диффузии на 10-20%;

обеспечение максимальной рабочей температуры 1250 - 1400°C;

обеспечение равномерного поля температуры в камерах источника и диффузии на длине 300-400 мм;

исключение попадания посторонних примесей в реакционную трубу;

высокая надежность работы.

Характеристики некоторых диффузионных печей, выпускаемых нашей промышленностью, приведены в табл. II.13.

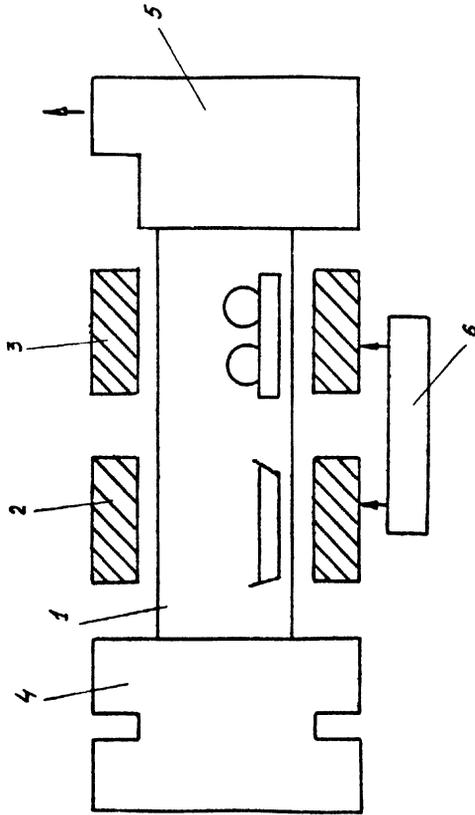


Рис. П.30. Схема двухзонной диффузионной печи

Т а б л и ц а П.13

Характеристики диффузионных печей

Тип печи	Диапазон рабочих температур в камерах: И-источника, Д-диффузии, °С	Длина рабочей зоны, мм	Точность поддержания температуры
			равномерность температуры в рабочей зоне, °С
Однозонная СДО-13	700-1300	300	$\pm 0,5/\pm 1$
Однозонная СДО-130/1	Д 700-1300	400	$\pm 0,5/\pm 1$
Двухзонная СДД-13	И 300-1200	120	$\pm 1,0/\pm 1,5$
	Д 700-1300	370	$\pm 0,5/\pm 1,0$
Двухзонная СДД-125	Д-700-1250	400	$\pm 0,5/\pm 1,0$
Двухзонная ОКБ-1117А	И 1200	200	$\pm 2/\pm 2$
	Д 1400	400	$\pm 2/\pm 2$

Исследование параметров диффузионных слоев

Основными параметрами диффузионных слоев являются: глубина залегания р-п-переходов, проводимость поверхностного слоя, поверхностная концентрация атомов примеси, диффузионный профиль слоев, т.е. закон распределения примесей в полупроводнике.

Глубина залегания р-п перехода. В основе методов измерения глубины залегания слоев лежит свойство окрашивания в различные цвета и оттенки областей р- и п-типов при химическом воздействии различными реактивами. Это дает возможность получать зримые очертания р-п-переходов. При этом методе на пластине кремния производится вышлифовка лунки сферическим (или цилиндрическим) инструментом большого диаметра. Этот шар вырезает в диффузионном слое углубление, пересекающее границу перехода (рис.11.31). После очистки пластины производится окрашивание лунки и измерение линейных размеров с помощью микроскопа с

микрометрическим отсчетом. По результатам измерений глубина залегания перехода определяется следующим образом:

$$x = a - b \quad (\text{П.52})$$

$$y = a + b \quad (\text{П.53})$$

$$xy = a^2 - b^2 \quad (\text{П.54})$$

$$x_j = \sqrt{R^2 - b^2} - \sqrt{R^2 - a^2} = R \left(\sqrt{1 - \frac{b^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{a^2}{R^2}} \right). \quad (\text{П.55})$$

Для случая, когда линейные размеры a и b значительно меньше R

$$x_j \approx R \left(1 - \frac{b^2}{2R^2} - 1 + \frac{a^2}{2R^2} \right) = \frac{a^2 - b^2}{2R} = \frac{xy}{2R} = \frac{xy}{D}; \quad (\text{П.56})$$

(все значения приведены на рис. II.31).

Для окрашивания лунки можно использовать:

1. Травитель, состоящий из концентрированной HF с добавкой 0,1% HNO_3 . Области р-типа в этом травителе темнеют, а области п-типа не меняют цвет. В HF можно добавлять не только HNO_3 , но и нитрат натрия, двуокись азота или фосфорную кислоту.

2. Лунку заполнить плавиковой кислотой, разбавленной дистиллированной водой, а к переходу приложить обратное смещение (рис. II.32). В этом случае темнеет п-область вместо р-области. Если к этому образцу приложить прямое или нулевое смещение, то темнеет р-область, а на границе между областями остается узкий светлый участок — область пространственного заряда р-п перехода, которую также можно измерить.

3. Избирательное окрашивание электрохимическим осаждением с замещением. Кремний стоит в ряду активности элементов впереди меди, серебра и золота и он замещает их металлические ионы. Так как электрохимический потенциал кремния зависит от типа проводимости, то замещение с осаждением этих элементов на поверхности кремния происходит сначала на п-области, затем уже на р-области. На практике осаждение ведут до тех пор, пока р-п-переход не выявится отчетливо и после этого процесс прерывают удалением растворов.

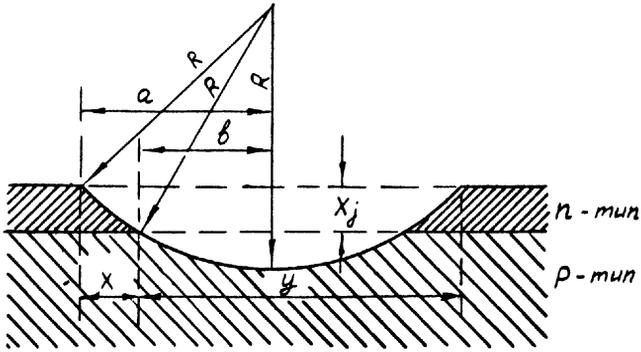


Рис. П.31. Поперечное сечение углубления в полупроводниковой пластине

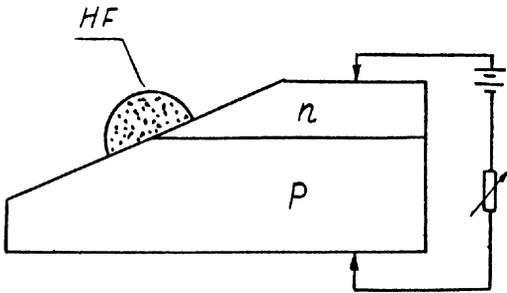


Рис. П.32. Схема окраивания p-n перехода

Поверхностное сопротивление. Поверхностное сопротивление диффузионных слоев определяют четырехзондовым методом, который заключается в следующем (рис. 11.33): четыре равноотстоящих друг от друга металлических зонда, установленных в одну линию, опускают на поверхность пластины до образования электрического контакта. Через наружные зонды пропускают измеряемый ток, а между внутренними измеряют падение напряжения. Из полученных значений тока и напряжения определяют поверхностное сопротивление слоя по формуле

$$\rho_{cl} = 4,5324 \frac{U}{I}, \quad (11.57)$$

где ρ_{cl} в ом/квадрат; U в в; I в а.

При измерениях необходимо, чтобы толщина слоя, сопротивление которого измеряется, была значительно меньше расстояния между зондами, что на практике всегда выполняется.

Диффузионный профиль. На рис. 11.21 представлен диффузионный профиль распределения примеси n-типа в равномерно легированной p-типа пластине кремния по закону дополнительной функции ошибок. Зная концентрацию примеси p-типа в пластине N_c и измерив глубину перехода x_j , можно определить одну точку диффузионного профиля. Если известен коэффициент диффузии, то по формуле (11.32) вычисляется поверхностная концентрация примеси N_0 .

Можно также определить коэффициент диффузии, если он неизвестен. Для этой цели берут две пластины кремния с различными, но известными начальными концентрациями легирующей примеси N_{c1} и N_{c2} , проводят в них диффузию примеси противоположного знака в одинаковых условиях (одинаковы N_0 и t), определяют глубину залегания p-n-переходов x_{j1} и x_{j2} методом окрашивания и после этого составляют систему уравнений на основании формулы (11.32)

$$N_{c1} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x_{j1}}{2\sqrt{Dt}}, \quad (11.58)$$

$$N_{c2} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x_{j2}}{2\sqrt{Dt}}. \quad (11.59)$$

Решение этой системы дает возможность получить значение D .

Недостатки процесса диффузии

В заключение необходимо указать на некоторые недостатки, свойственные процессу диффузии:

1. Невозможность получения линейного профиля распределения примеси в образце.

2. Образование р-п-переходов может происходить только при компенсации примесей разного типа.

3. Из-за предела растворимости примесей в твердом теле невозможно выполнить более трех последовательных диффузий. При каждой последующей диффузии для образования р-п-перехода число атомов примеси, необходимое для компенсации ранее введенной примеси, увеличивается по экспоненте.

4. При значительном увеличении количества примесей подвижность электронов и дырок в образце уменьшается, а это ухудшает электрические свойства структур.

7. Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых пленок

Термин "эпитаксия" греческого происхождения. Он образован из двух слов: *epi*, что означает "на" и прошедшего времени глагола *teinen* - "располагать в определенном порядке". Под термином "эпитаксия" понимают процесс кристаллизации, при котором атомы, выделяющиеся из среды, занимают упорядоченное положение и становятся частью растущей пленки, в точности повторяя кристаллическую структуру подложки.

Применение методов эпитаксиального наращивания пленок в технологии полупроводниковых ИС дает целый ряд преимуществ:

возможность получения монокристаллических пленок полупроводников с заданной ориентацией кристаллографических осей ;

возможность осуществления равномерного распределения примесей в пленке (при диффузии примесей это практически невозможно осуществить);

сокращение стадий диффузии до двух при получении четырехслойных транзисторных структур в ИС;

получение транзисторных структур с лучшими, чем при тройной диффузии, характеристиками и упрощение операций по изоляции компонентов р-п-переходами;

сокращение длительности операций получения транзисторных структур (скорость роста эпитаксиальных пленок относительно высокая).

В настоящее время разработан целый ряд методов получения эпитаксиальных слоев полупроводников. Все методы принято делить на две группы: прямые и непрямые (косвенные).

В прямых методах частицы полупроводника переносятся от источника к подложке без промежуточных химических реакций путем испарения из жидкой фазы, сублимации, реактивного распыления.

В не прямых методах атомы полупроводников получаются на поверхности подложки путем разложения паров полупроводниковых соединений. К таким методам относятся методы, основанные на восстановлении в водороде хлоридов, бромидов, иодидов полупроводников кремния и германия, пиролизического разложения силана и органических соединений кремния и германия.

Хлоридный метод

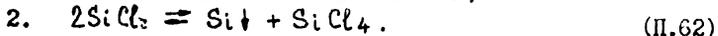
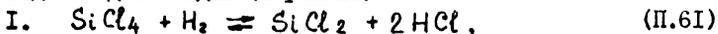
Этот метод получения эпитаксиальных пленок распространен наиболее широко. Принципиальная схема установки для получения пленок этим методом представлена на рис. П.34.

Установка состоит из реакционной камеры (цилиндрическая кварцевая труба), помещенной в поле индукционной катушки ВЧ-нагрева. Внутри трубы полупроводниковые подложки размещают на теплопроводящем элементе из графита. Для подачи газов в реакционную камеру служит специальная газовая система. Отработанные газы отводятся из реакционной камеры на сжигание.

В реакционную камеру установки, где поддерживается температура 1150–1300°C, подается смесь газов тетрахлорида кремния $SiCl_4$ и водорода, выполняющего роль восстановителя и газаносителя. Реакция восстановления $SiCl_4$ с водородом



происходит в две стадии (вероятно)



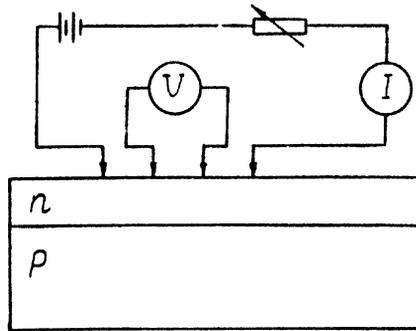


Рис. П.33. Схема четырехзондового метода

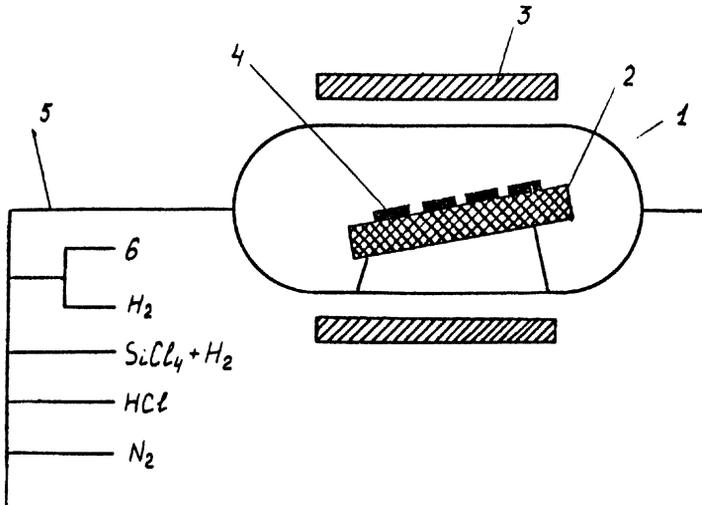


Рис. П.34. Схема установки эпитаксиального наращивания пленок:

1 - кварцевая труба; 2 - теплопроводящий элемент; 3 - индуктор ВЧ-нагрева; 4 - пластины полупроводника; 5 - газовая система; 6 - подача леггирующей примеси

Первый этап реакции идет в газовой фазе, а второй возможен только при наличии третьего тела, способного поглотить выделяющуюся энергию, и происходит только на поверхности пластины. Скорость роста пленки при этом $\sim 0,5$ мкм/мин.

В процессе выращивания эпитаксиальных пленок легко осуществляется легирование их примесями. Примеси подаются в реакционную камеру вместе с газами, несущими полупроводник, и, регулируя подачу диффузанта, можно получать необходимую концентрацию примеси в полупроводниковой эпитаксиальной пленке. Легирование можно осуществлять двумя способами:

1) из раствора, добавляя к жидкому $SiCl_4$ летучие примеси (PCl_5 или $SbCl_5$), которые испаряются вместе с ним и поступают в реакционную камеру;

2) газовое легирование - примесь вводится в реакционную камеру отдельным газовым потоком. Например, в качестве донорных примесей вводят фосфин PH_3 , арсин AsH_3 , а в качестве акцепторной примеси - диборан B_2H_6 . Эти газы разбавляют водородом и вводят в реакционную камеру.

Очень важный фактор при эпитаксиальном выращивании пленок - чистота поверхности подложек. После механической шлифовки и химической полировки пластины подвергают химической очистке в реакционной камере перед эпитаксиальным наращиванием, обдувая их смесью водорода и HCl . При содержании в газе-носителе $1 + 5\%$ HCl скорость травления пластин лежит в пределах $0,5 + 2$ мкм/мин.

Например, типовой процесс получения эпитаксиальной пленки кремния толщиной 22 мкм с концентрацией донорной примеси 10^{17} см^{-3} ($\rho = 0,1$ ом.см) на монокристаллической подложке с концентрацией акцепторной примеси $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\rho = 2$ ом.см) включает в себя следующие операции:

Кремниевые пластины после шлифовки и полировки помещают в реакционную камеру на тепловоспринимающий элемент, герметизируют систему и наполняют азотом, вытесняющим воздух.

В камеру подают поток водорода со скоростью 30 л/мин, включают ВЧ-нагрев и повышают температуру пластин до $1200^\circ\text{C} \pm 2^\circ$.

Подают в систему HCl в соотношении $H_2 : HCl = 100:1$ в течение 6 мин. За это время травливается слой кремния ~ 3 мкм.

Прекращается подача HCl . В систему подается $SiCl_4$ в соотношении $SiCl_4 : H_2 = 1:800$ и PH_3 в соотношении $PH_3 : H_2 = 1:5 \cdot 10^8$. Реакция продолжается в течение 44 мин и на подложке р-типа выращивается эпитаксиальная пленка п-типа толщиной 22 мкм.

Прекращается подача фосфина и тетрахлорида кремния, пластины охлаждаются в потоке чистого водорода.

Другие методы

Эпитаксиальные пленки кремния получают также при реакции восстановления тетрабромид кремния водородом. Аппаратура почти не отличается от описанной выше для процесса восстановления $SiCl_4$. Основная реакция восстановления



Температура реакции более низкая $\sim 1050^\circ C$, скорость роста пленки кремния 0,2+0,4 мкм/мин.

Применяется также метод восстановления трихлорсилана $SiHCl_3$ водородом



Реакция идет при температуре $\sim 1000+1250^\circ C$, скорость роста пленки кремния 0,4+5,0 мкм/мин.

Эпитаксиальное выращивание пленок полупроводников можно осуществлять пиролизическим разложением их соединений с водородом GeH_4 и силана SiH_4 .

Разложение силана производят при сравнительно низких температурах $\sim 1000^\circ C$, что позволяет получать резкие перепады концентраций легирующей примесей в пленках, так как коэффициенты диффузии бора и фосфора при снижении температуры от 1100 до $1000^\circ C$ уменьшаются на порядок и их диффузия из подложки в пленку, и наоборот, резко уменьшается. Скорость роста пленки 1+3 мкм/мин. Реакция разложения силана



Основная трудность этого метода связана с получением, очисткой и сохранением силана, вещества пирофорного, самовоспламеняющегося при соприкосновении с воздухом, летучего, агрессивного, взрывоопасного.

Для хранения силан разбавляют инертными газами или водородом до содержания его менее 5% по объему и хранят в баллонах при давлениях до 60 атм.

Эпитаксиальные пленки германия можно получать пиролитическим разложением GeH_4 при температурах 400–900°C. На подложках из германия и на ситалловых подложках получаются монокристаллические пленки Ge высокого качества с очень гладкой поверхностью без дефектов упаковки при скорости роста 7 мкм/час.

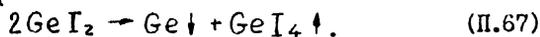
Процесс эпитаксиального наращивания пленок полупроводников можно осуществлять не только в проточной системе, но и в закрытой – в запаянной ампуле (рис. 11.35).

В кварцевую ампулу помещают подложки из полупроводникового материала, материал-источник и заполняют ее реагентом – иодом. Ампулу помещают в двухзонную печь и нагревают подложки и источник до разных температур. Пары иода взаимодействуют с источником, образуя газообразные химические продукты, которые перемещаются к подложкам, на их поверхности разлагаются с выделением кремния (или германия), который кристаллизуется на подложке, создавая эпитаксиальную пленку. Реакции выделения полупроводникового материала на подложке:

для кремния



для германия



Типичные температуры зон источника и подложек при наращивании эпитаксиальных пленок данным методом приведены в табл. II.14.

Т а б л и ц а П.14

Температуры зон в ампуле

Материал	Температура в зоне источника, °С	Температура в зоне подложки, °С
Кремний	1100	800-900
Германий	550-500	400-300
Арсенид галлия	~ 500	~ 300

Влияние различных факторов на рост эпитаксиальных пленок

Эпитаксиальный рост полупроводниковых пленок и их качество зависят от целого ряда факторов.

Влияние температуры. При хлоридном методе с ростом температуры растет скорость наращивания совершенной эпитаксиальной пленки, так как с ростом температуры увеличиваются скорости миграции атомов полупроводника по подложке и они быстрее занимают соответствующие места в кристаллической решетке. Скорость роста пленки в зависимости от температуры следующая:

- при 1100°С - 0,1 мкм/мин,
- при 1200°С - 1,0 мкм/мин,
- при 1270°С до 5,0 мкм/мин.

В зависимости от температуры изменяется и внешний вид пленки под микроскопом; при 900°С наблюдается рост нитевидных кристаллов, при 950-1100°С - треугольных фигур, а при температуре выше 1150°С поверхность пленки принимает волнистый характер. При получении эпитаксиальных пленок в запаянных ампулах при повышении температуры в зоне подложки выше так называемой "критической температуры осаждения" происходит не рост кристаллов, а травление подложки.

Влияние кристаллографической ориентации подложки. Экспериментальными исследованиями установлено, что скорость роста пленок зависит от ориентации и степени разориентировки подложки по кристаллографическим осям. Медленнее всего растут пленки в направлениях $\langle 100 \rangle$, а быстрее всего в направлениях $\langle 110 \rangle$.

При эпитаксиальных процессах необходима высокая чистота газовых реагентов. Например, содержание в реагентах примесей кислорода, воды или органических соединений в количестве 0,0025% делает невозможным рост пленок с совершенными структурами ни при каких температурах.

Существует очень сложная зависимость между соотношением концентраций примесей в газовой фазе и в полученной эпитаксиальной пленке. Еще не найдено удовлетворительное теоретическое решение задачи и в настоящее время пользуются опытными данными. Установлено, что легирующие примеси оказывают большое влияние на скорость осаждения кремниевых эпитаксиальных пленок. Скорость роста пленок кремния при восстановлении хлоридов и бромидов кремния, легированных трехбромистым бором BBr_3 , заметно больше, чем скорость роста при восстановлении чистых хлоридов и бромидов. Легирующие примеси на рост эпитаксиальных пленок германия не влияют.

Влияние скоростей газовых потоков и концентраций реагентов. Экспериментальными исследованиями установлено, что скорость роста кремниевой пленки зависит от скорости потока газа-носителя водорода (рис. II.36), а также отношения H_2 и $SiCl_4$ (рис. II.37). Из рис. II.36 видно, что при потоке водорода со скоростью 1 л/мин скорость пленки имеет оптимальное значение 1,4-1,5 мкм/мин. Увеличение молярной концентрации $SiCl_4$ ведет к росту скорости осаждения пленки, которая достигает максимального значения при молярной доле $SiCl_4$ в H_2 , равной 0,1. При дальнейшем увеличении концентрации $SiCl_4$ скорость осаждения эпитаксиально* пленки уменьшается (рис. II.37). Скорость осаждения эпитаксиальных пленок кремния и германия при восстановлении тетрабромидов водородом также зависит от концентраций $SiBr_4$ и $GeBr_4$ (рис. II.38). На практике обычно при эпитаксиальном процессе скорости реагентов и их концентраций поддерживают постоянными, а для получения пленок разной толщины изменяют время процесса.

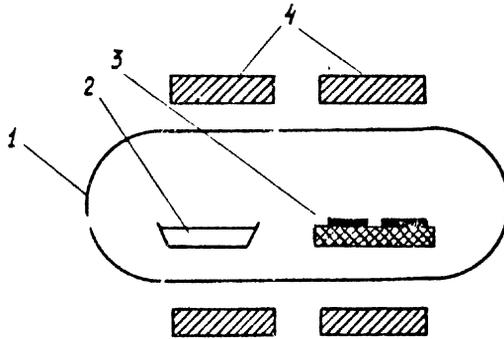


Рис. П.35. Схема установки эпитаксиального наращивания в закрытой системе:

1 - ампула; 2 - исходный материал; 3 - подложка; 4 - нагреватели двухзонной печи

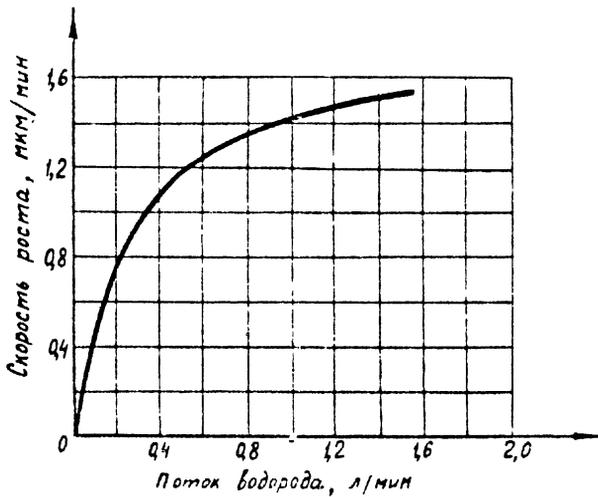


Рис. П.36. График влияния скорости потока водорода на рост эпитаксиальной пленки

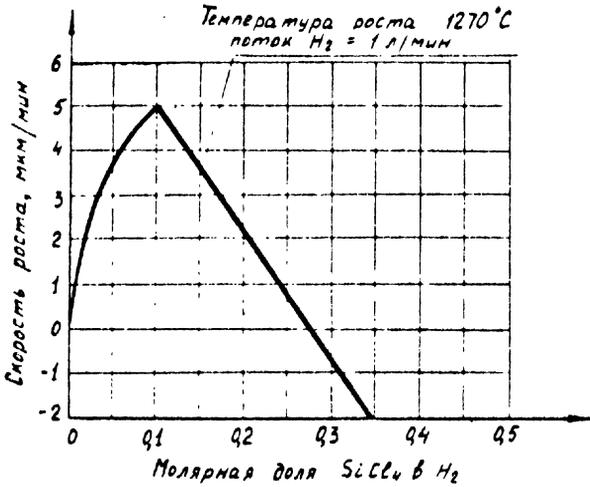


Рис. П.37. График влияния молярной доли SiCl_4 в H_2 на рост эпитаксиальной пленки кремния

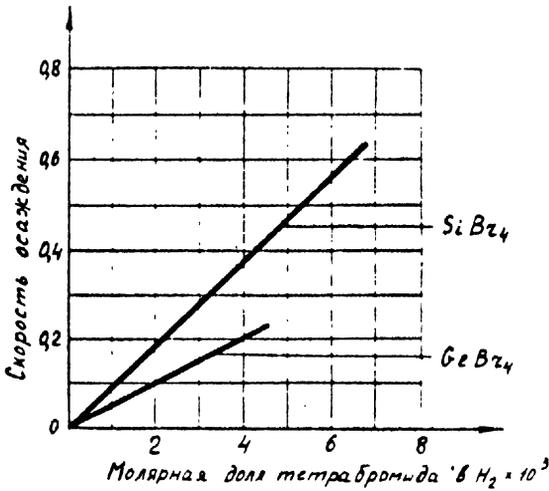


Рис. П.38. Зависимость скорости осаждения Ge и Si из бромидов от концентрации тетрабромидов. Температуры образцов для Ge - 840°C , для Si - 1200°C

Влияние аэродинамических факторов. Экспериментами установлено, что толщина эпитаксиальной пленки на краю подложки, находящемуся ближе к стенке реакционной камеры, меньше, чем на край, который находится ближе к середине реакционной трубы. Это объясняется тем, что скорость потока у стенки камеры меньше, чем в ее середине, и концентрация полупроводникового материала в потоке у стенки уменьшается (истощается), скорость роста пленки также уменьшается. Замечена тенденция к уменьшению толщины эпитаксиальной пленки и увеличению концентрации легирующих примесей от передних пластин в трубе, по ходу потока реагентов, к последним. Это объясняется истощением концентрации $SiCl_4$ в газе-носителе у выходного отверстия реакционной камеры и обратной диффузией примесей из пластин. Для устранения влияния неравномерной концентрации $SiCl_4$ и легирующих примесей на рост эпитаксиальных пленок подложки устанавливаются под углом $5-10^\circ$ к потоку. Это обеспечивает соприкосновение поверхности каждой пластины со свежей струей реагентов.

Необходимо отметить, что в процессе роста эпитаксиальной пленки все факторы действуют одновременно, поэтому нужно учитывать их комплекс: и концентрацию реагентов, и скорость потоков, и температуру в реакционной камере и т.д.

Перераспределение примесей в процессе эпитаксиального наращивания

В случае выращивания эпитаксиальных пленок, когда концентрации легирующих примесей в подложке и пленке значительно различаются, происходят процессы диффузии примесей из областей с высокой концентрацией в области с низкой концентрацией. Знание распределения примесей в окрестности раздела "пленка-подложка" имеет существенное значение, так как данная область часто является структурным элементом ИС. Экспериментами установлено, что профиль распределения примесей вблизи раздела "пленка-подложка" определяется только фактором диффузии примесей в твердом состоянии с известными значениями коэффициентов диффузии. Например,

при выращивании слаболегированной эпитаксиальной пленки на сильнолегированной подложке процесс роста сопровождается диффузией примеси из подложки в пленку. На рис. II.39 представлена идеализированная картина граничных условий для данного случая. Решение уравнения второго закона Фика (II.28) для данных граничных условий дает выражение для концентрации примеси $N(x, t)$ на расстоянии x от границы раздела "пленка-подложка"

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (\text{II.68})$$

где N_0 - начальная концентрация примеси в подложке;
 D - коэффициент диффузии примеси в кремнии при температуре эпитаксиального процесса;
 t - время выращивания эпитаксиальной пленки.

Из уравнения (II.68) следует, что через некоторое время после начала диффузии концентрация примеси в подложке на границе "пленка-подложка" падает до половины начальной концентрации (рис. II.39).

Основным параметром, определяющим глубину диффузии в данном случае, является температура эпитаксиального процесса. Снижение температуры ведет к снижению коэффициента диффузии, но в то же время и к снижению скорости роста эпитаксиальной пленки. Следовательно, для заданной толщины пленки глубина диффузии примеси из подложки остается практически неизменной.

Оборудование для эпитаксиального наращивания пленок

В настоящее время разработано несколько типов установок для осуществления эпитаксиального наращивания пленок полупроводников, выпуск которых освоен отечественной промышленностью. Реакционные камеры этих установок, как правило, кварцевые трубы с вертикальным или горизонтальным расположением, с графитовыми тепловоcпринимающими элементами для размещения подложек и с нагревом токами высокой частоты. В табл. II.15 приведены характеристики трех отечественных установок для эпитаксиального наращивания пленок.

Т а б л и ц а П.15

Характеристики установок для эпит. эксимельного наращивания

Установки	Параметры							производительность за смену, пластин
	реакционная камера	газовая система		система нагрева		точность поддержания, ос		
тип	число подложек	газы	число контрольных газов, %	стабильность расхода воды, м ³ /час	индуктор		точность	ос
УНЭС-1	Вертикальная труба, 1 шт.	24	6	±5	2,5	Цилиндрический	± 3	80-100
УНЭС-2	Вертикальная труба, 2 шт.	24-24	II	-"-	2,5	-"-	± 3	150-20
Г.089.01	Горизонтальная труба, 1 шт.	9-12	10	-"-	6	-"-	± 5	50-60

8. Изоляция компонентов в полупроводниковых ИС

Современная технология полупроводниковых ИС позволяет размещать на одной пластине кремния значительное количество интегральных схем, каждая из которых может содержать десятки и более компонентов. Чтобы ИС нормально функционировала, необходимо все компоненты электрически изолировать друг от друга. Поэтому обеспечение изоляции компонентов является одной из важнейших проблем разработки и изготовления ИС. В настоящее время изоляция компонентов в ИС осуществляется двумя методами: с помощью обратнo смещенных р-п-переходов и с помощью диэлектрика.

Изоляция р-п-переходами

Данный метод изоляции заключается в том, что объем полупроводниковой пластинки, в котором образован тот или иной компонент схемы, отделяется от остального объема пластинки замкнутым р-п-переходом. Этот переход представляет собой диод и, если на него подать обратное смещение, то данная область будет изолирована от остальной пластинки за счет высокого сопротивления постоянному току смещенного в обратном направлении диода. В настоящее время разработано несколько модификаций изоляции компонентов р-п-переходом.

1. Самый простой способ заключается в создании областей одного типа проводимости в пластине другого типа проводимости методом диффузии. Последовательность технологических операций этого метода и эквивалентная электрическая схема, поясняющая способ изоляции, представлены на рис. 11.40. В исходную пластину р-типа через маску SiO_2 в открытые участки проводится диффузия донорной примеси. Этой операцией создаются изолированные области п-типа, которые могут служить коллекторными областями, или в них последующими операциями могут быть созданы резисторы, диоды или емкости. Если на подложку подать самый отрицательный потенциал схемы, то изолирующие переходы будут всегда в запортом состоянии и созданные диффузионные области п-типа будут изолированы от подложки и друг от друга. Использование данного метода изоляции ухудшает свойства полученной транзисторной структуры.

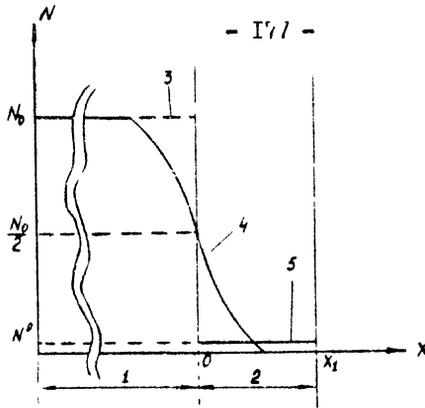


Рис. П.39. График распределения примесей в процессе эпитаксиального наращивания:

1 - подложка; 2 - эпитаксиальная пленка; 3 - начальное распределение примеси в подложке; 4 - диффузия примеси из подложки; 5 - концентрация основной легирующей примеси в эпитаксиальной пленке

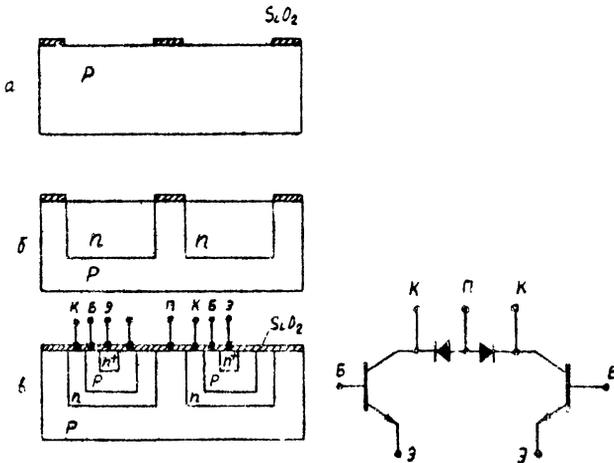


Рис. П.40. Схема изоляции компонентов созданием областей одного типа проводимости в пластине другого типа проводимости:

а - исходная пластина кремния р-типа; б - созданные диффузионные области п-типа; в - компоненты схемы; г - эквивалентная электрическая схема (Э - эмиттер; Б - база; К - коллектор)

Во-первых, при проведении диффузии, создающей коллекторную область, получаем относительно низкий уровень концентрации легирующей примеси у изолирующего перехода по сравнению с легированием вблизи поверхности. При работе транзистора весь коллекторный ток должен протекать от базы к коллекторному контакту на поверхности пластины в горизонтальном направлении через эту слаболегированную область, имеющую большое сопротивление (до тысяч ом). Во-вторых, изолирующий переход действует как емкость между коллектором и подложкой и на высоких частотах связывает изолированную область со всеми другими областями структуры. В-третьих, при образовании изолированных областей диффузией концентрация примесей на поверхности достигает высокого значения, и при проведении базовой диффузии необходимо для перекомпенсации примеси в этой области создавать высокий градиент концентрации, а это ведет к снижению пробивного напряжения перехода коллектор-база.

2. Другой разновидностью этого метода является использование встречной диффузии (рис. II.41). На поверхности пластины п-типа создается маска из SiO_2 , а противоположная нижняя сторона пластины окислом не защищается. После этого проводится двухсторонняя диффузия примеси р-типа на глубину, равную половине толщины пластины, т.е. до встречи диффузионных потоков примеси, идущих с разных сторон пластины.

В результате этой операции в верхней половине структуры получаются изолированные р-п-переходами п-области, в которых последующими операциями создаются различные компоненты схемы. Этим методом можно создавать изолированные области по несколько иной технологии (рис. II.42). Пластина кремния маскируется пленкой

SiO_2 с двух сторон и изолирующая прослойка р-типа распространяется от одной и другой поверхностей пластины до их встречи, отделяя участки пластины п-типа.

У этого метода есть преимущество по сравнению с описанным выше. Можно изготавливать транзисторы на материале исходной подложки кремния, задавая ее свойства такими, чтобы были более высокими пробивное напряжение переходов и более низкими значения распреде-

ленных сопротивлений материала коллектора. Но этот метод имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что для осуществления диффузии сквозь пластины толщина их должна быть малой, но и для малой толщины требуется длительное время диффузии (40-60 час).

3. Наиболее широко в настоящее время применяется метод изоляции компонентов с использованием эпитаксии и диффузии. Ему присущи все преимущества двух предыдущих методов и он свободен от их недостатков. Суть метода состоит в том, что на исходной пластине кремния р-типа (рис. II.43) выращивается эпитаксиальный слой п-типа, в котором создаются изолированные коллекторные области путем диффузии примеси р-типа через эпитаксиальную пленку до подложки р-типа. В этом методе возможно получение необходимых распределений примесей в коллекторе и в подложке независимо друг от друга, что обеспечивает оптимальное значение емкости перехода коллектор-база и пробивного напряжения этого перехода при минимальной емкости перехода коллектор-подложка.

Хотя методу изоляции компонентов р-п-переходами свойственны известные недостатки (паразитная емкость перехода, пробивное напряжение обратно пропорционально концентрации примесей, необходимость приложения к р-п-переходу запорного смещения, наличие токов утечки через р-п-переход, возникновение паразитных транзисторных структур, чувствительность к радиации), в подавляющем большинстве случаев для изоляции компонентов в ИС применяется этот метод из-за его легкой осуществимости и экономичности.

Изоляция диэлектриком

Диэлектрической изоляции компонентов присущи значительные преимущества по сравнению с изоляцией р-п-переходами: повышение рабочих частот в линейных и быстродействия в цифровых ИС, повышение рабочих напряжений, примерно в 25 раз снижается емкость перехода коллектор-подложка и возрастает пробивное напряжение этого перехода, ток утечки между коллектором и подложкой не превышает 10^{-11} А, улучшается радиационная стойкость ИС. В настоящее время предложено несколько способов изоляции компонентов в ИС диэлектриком.

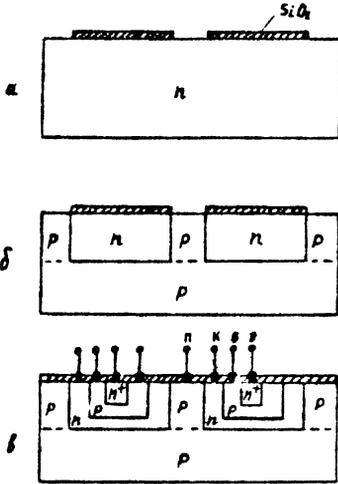


Рис. П.41. Схема изоляции с использованием встречной диффузии:
 а - исходная пластина кремния p-типа; б - двухсторонняя диффузия компенсирующей акцепторной примеси; в - создание компонентов схемы

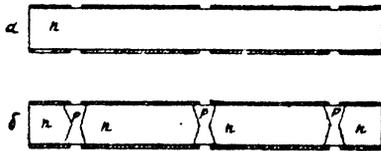


Рис. П.42. Схема двусторонней изолирующей диффузии:
 а - исходная пластина кремния p-типа; б - двусторонняя диффузия компенсирующей акцепторной примеси

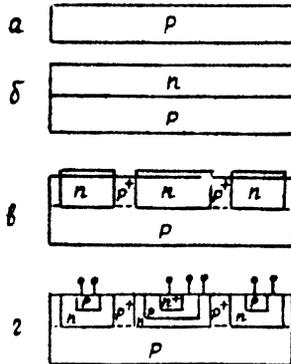


Рис. П.43. Схема изоляции компонентов с применением эпитаксии и диффузии:
 а - исходная пластина кремния p-типа; б - эпитаксиальное наращивание коллекторной области; в - проведение изолирующей диффузии; г - создание компонентов схемы

1. Метод получения изолированных диэлектриком областей монокристаллического кремния в поликристаллической подложке состоит в следующем. На подложке из кремния p -типа (рис. II.44) и на некоторых других в изолированной области присутствует слой кремния p -типа, создаваемый для увеличения проводимости тела коллектора интегрального транзистора (о чем подробные объяснения даны в следующем разделе), покрытой пленкой SiO_2 методом фотолитографии и травления, в пленке окисла вскрывают окна и полученные открытые участки кремния травят на глубину ~ 25 мкм; после этого на вытравленных участках наращивается пленка SiO_2 толщиной $\sim 1+1,5$ мкм; вслед за этим наращивается слой поликристаллического кремния p -типа толщиной ~ 175 мкм с удельным сопротивлением менее $0,01$ ом.см, затем поверхность исходной пластинки p -типа шлифуется до окисла. Получаем структуру, в которой участки исходного монокристаллического кремния оказываются изолированными друг от друга и от поликристаллического кремния пленкой SiO_2 . В этих изолированных участках обычными методами создают компоненты ИС. Этот метод в литературе часто называется элик-процессом.

2. Применяется метод, аналогичный элик-процессу, но с добавлением еще пленки карбида кремния (рис. II.45). В подложке p -типа, маскированной пленкой SiO_2 , вытравливаются участки на глубину ~ 25 мкм. После этого вытравленная поверхность окисляется и на пленку окисла наносится слой карбида кремния, а поверх него наращивается толстый слой поликристаллического кремния. Производится шлифовка исходной пластины, как в элик-процессе, до необходимого уровня. В результате получается структура, в которой участки монокристаллического кремния p -типа изолированы от поликристаллического основания пленкой, состоящей из SiO_2 и карбида кремния, в которых формируются компоненты ИС.

3. Предложен метод изолирования областей с разными типами проводимости (рис. II.46), размещенными в поликристаллическом кремнии, который благодаря наличию границ между зернами является диэлектриком. В пластине монокристаллического кремния p -типа диффузией донорной примеси создаются участки p -типа, производится

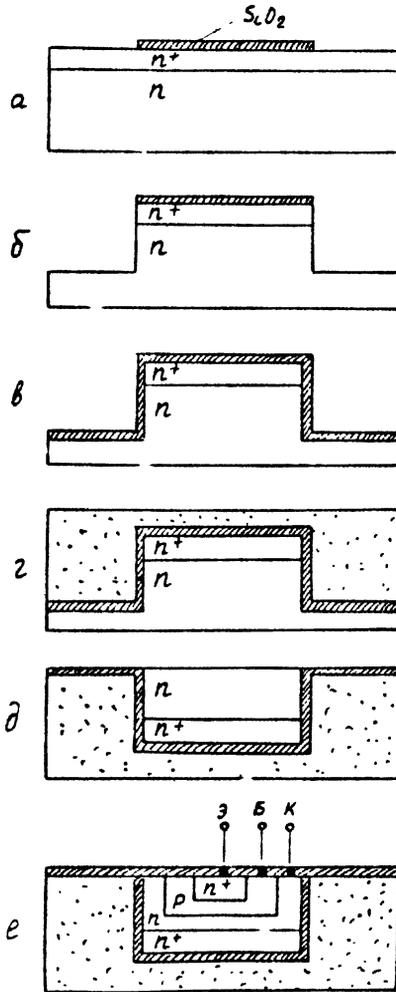


Рис. П.44. Схема изоляции компонентов пленкой диэлектрика SiO_2 :
а - исходная пластина кремния p-типа; б - травление кремния; в - окисление; г - наращивание поликристаллического кремния; д - удаление материала p-типа; е - создание компонентов схемы

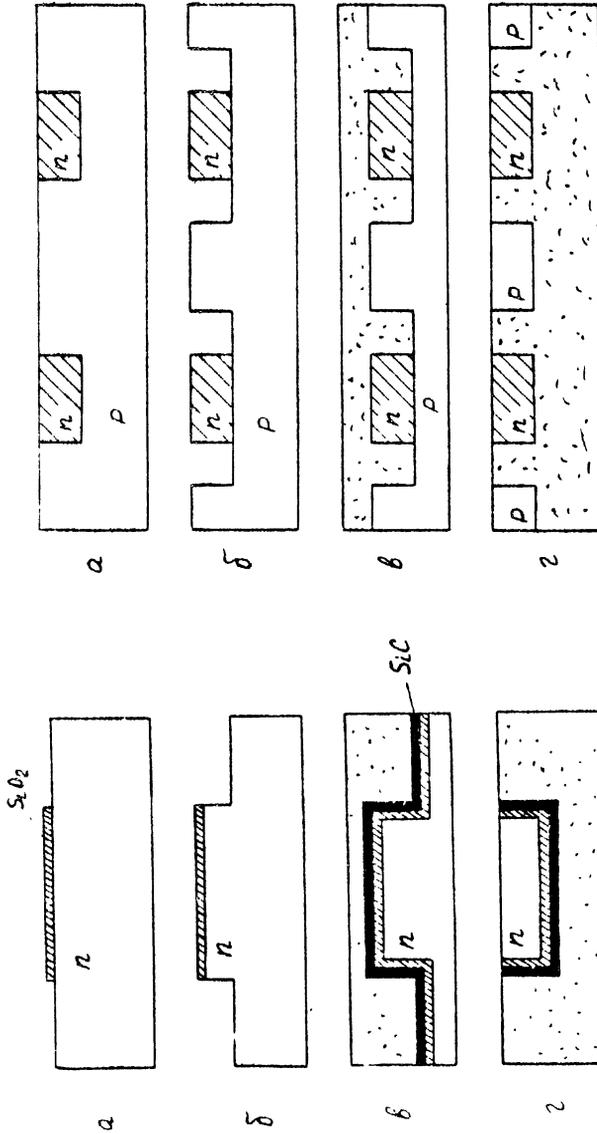


Рис. П.45. Схема изоляции с применением каротида кремния:

а - исходная пластина кремния П-типа; б - травление кремния; в - наращивание SiO_2 , каротида кремния; г - удаление каротида кремния; д - удаление материала П-типа

Рис. П.46. Схема изоляции областей с разными типами проводимости:

а - диффузия поперочной примеси в пластину П-типа; б - изотермическое травление; в - наращивание поликристаллического кремния; г - удаление материала П-типа

избирательное травление кремния в местах прохождения вертикальных границ между зонами с разным типом проводимости ; после этого наращивается достаточно толстый слой поликристаллического кремния и производится шлифовка исходной монокристаллической пластины до поликристаллического кремния. В результате получают участки монокристаллического кремния различных типов проводимости, разделенные диэлектриком – поликристаллическим кремнием, в которых обычным способом создаются компоненты ИС.

4. Предложен метод изоляции созданием меза-структур, где диэлектриком является воздух (рис. II.47). В пластине кремния *p*-типа методом диффузии формируются компоненты ИС, осуществляются их межсоединения. После этого пластина при помощи слоя стекла прикрепляется к подложке лицевой стороной, а с обратной стороны путем селективного травления создаются изолированные островки кремния, в которых сформированы компоненты ИС.

5. Изолирование с использованием вспомогательной пластины (рис. II.48). В пластине монокристаллического кремния *p*-типа формируются компоненты схемы и сверху защищаются пленкой SiO_2 . После этого избирательным травлением кремния создаются на пластине выступы, в которых сформированы компоненты схемы и к ним приплавляется вспомогательная пластина, покрытая слоем SiO_2 . Основная пластина монокристалла кремния сошлифовывается с противоположной стороны до образования выступов, припавленных к вспомогательной пластине. После этого производится запрессовка выступов в стекло и стравливание вспомогательной пластины. В результате этих технологических операций получаем структуру, в которой области кремния с сформированными в них компонентами ИС изолированы друг от друга стеклом.

6. Предложен метод изоляции с помощью керамики. В начальной стадии выполняются те же операции, что и в предыдущем методе, только производится не запрессовка выступов, припавленных к вспомогательной пластине в стекло, а заполнение промежутков между ними керамической связкой и после стравливания вспомогательной пластины получаем структуру, в которой изоляция компонентов ИС осуществляется керамикой (рис. II.49).

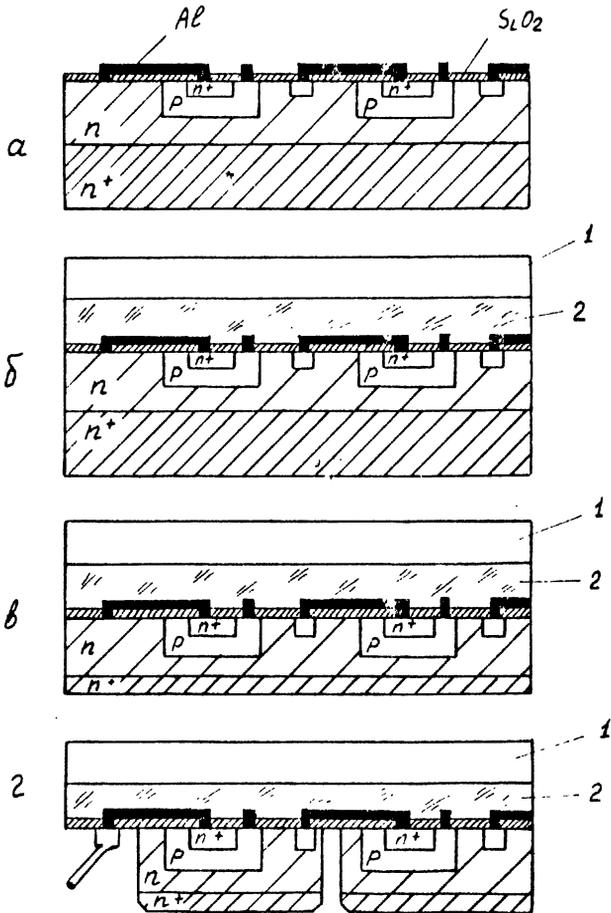


Рис. П.47. Схема изоляции созданием меза-структур:

а - формирование компонентов ИС в пластине кремния p -типа; б - прикрепление пластины кремния к подложке; в - удаление материала p^+ -типа; г - создание меза-структур (1 - подложка; 2 - стекло)

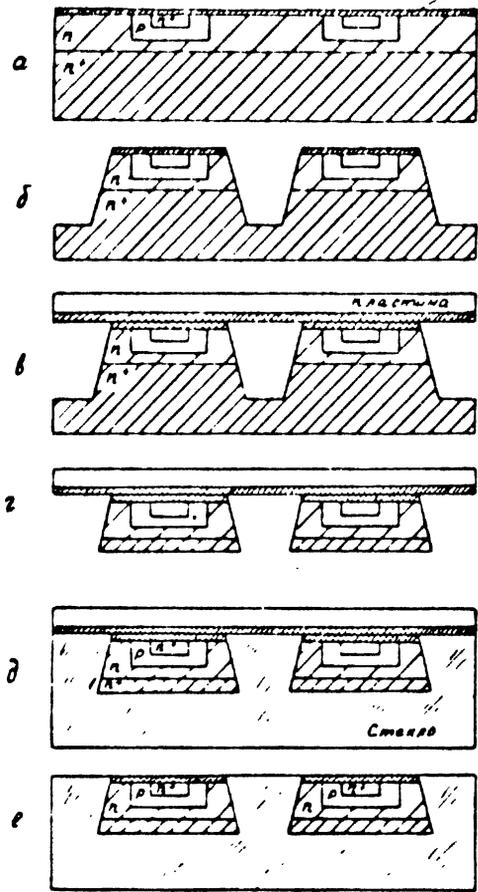


Рис. П. 48. Схема изоляции стеклом с использованием вспомогательной пластины:
 а - создание компонентов ИС и защита их 3CaO_2 ; б - травление выступов; в - приклеивание вспомогательной пластины; г - удаление части основной пластины; д - запрессовка в стекло; е - удаление вспомогательной пластины

7. Изолирование ИС с балочными выводами осуществляется следующим образом (рис. II.50). В пластине монокристаллического кремния n -типа формируются компоненты схемы и поверхность ее защищается окисно-нитридным слоем, создаются контакты из оксида платины; после этого производится напыление золота на подслои титана и электроосаждение балочных выводов. Когда коммутационные слои сформированы, производится травление металлических слоев для создания коммутации и с обратной стороны пластины кремния создаются островки с сформированными в них компонентами ИС путем травления Si . Выводы обеспечивают как электрическую, так и механическую связь между компонентами.

Предложены и другие методы изоляции компонентов ИС диэлектриком.

Наряду с положительными качествами, о которых сказано выше, процессу изоляции диэлектриком свойственны и недостатки: очень сложная технология (до 30 операций); схемы занимают площадь на $\sim 80\%$ больше, чем при изоляции p - n переходами; в настоящее время трудно получать пластины с высокой плоскостностью, которая требуется в этом методе. По мере совершенствования технологии метод изоляции компонентов диэлектриком, видимо, будет применяться более широко в производстве ИС.

9. Методы создания полупроводниковых интегральных схем

В зависимости от последовательности выполнения отдельных операций и их набора можно выделить в настоящее время четыре основных метода создания интегральных схем, четыре отличающиеся друг от друга технологии: 1) планарную технологию; 2) планарно-эпитаксиальную технологию; 3) технологию с диэлектрической изоляцией компонентов и 4) совмещенную технологию.

Наиболее сложным компонентом ИС является транзистор, поэтому общим для всех технологий является получение четырехслойной транзисторной структуры, а различия заключаются в операциях, которыми достигается реализация этой структуры.

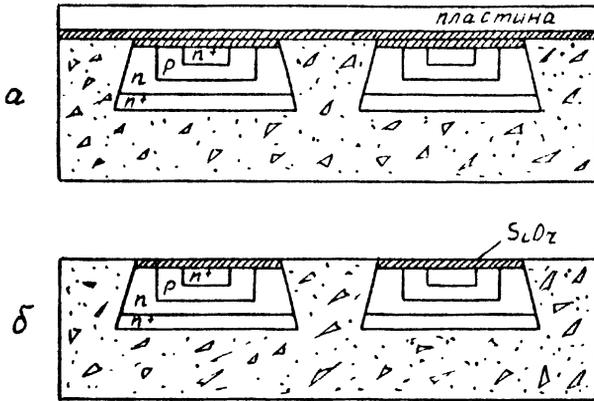


Рис. П.49. Схема изоляции керамикой:
 а - заполнение промежутков керамической связкой; б - удаление вспомогательной пластины

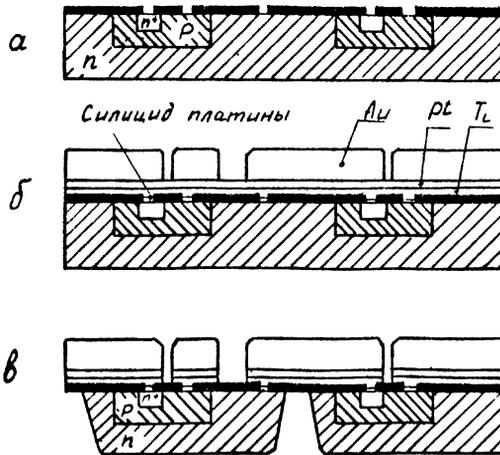


Рис. П.50. Схема изоляции в ИС с балочными выводами:
 а - создание компонентов ИС и окисно-нитридного слоя; б - создание контактов и осаждение балочных выводов; в - травление металлических слоев и кремния

Планарная технология

Последовательность технологических операций приведена на рис. II.51.

Исходным материалом интегральной схемы является пластина монокристаллического кремния р-типа диаметром ~ 25 мм и толщиной $0,2+0,3$ мм. Легирующей примесью, как правило, является бор. Пластина подвергается предварительно операциям шлифовки, полировки, обезжиривания и промывки. На поверхности пластины термическим окислением выращивают пленку двуоксида кремния толщиной $0,5$ мкм (до 1 мкм). Методом фотолитографии и селективным травлением пленки SiO_2 в ней вскрываются окна, обнажающие участки кремния для проведения локальной диффузии. После этого проводится диффузия донорной примеси (фосфор) на глубину около 14 мкм. При этом образуются области полупроводника п-типа проводимости, на границе которых с материалом пластины р-типа создаются р-п-переходы, изолирующие области п-типа друг от друга и от основной пластины кремния. Эти изолированные области могут быть коллекторами транзисторов или методом диффузии в них могут быть сформированы резисторы, диоды или конденсаторы. В процессе диффузии поверх диффузионной области р-типа вырастает новый слой SiO_2 , который защищает пластину. Для формирования баз транзисторов (а также диффузионных резисторов, конденсаторов) проводят новый цикл операций фотолитографии и селективным травлением в пленке SiO_2 вскрывают новые окна. В эти окна проводится вторая диффузия, но уже акцепторной примеси (бор) на глубину $\sim 5+7$ мкм и тем самым создаются базы транзисторов р-типа. После этого еще раз проводится окисление поверхности кремния, фотолитографическим методом вскрываются окна для формирования эмиттеров транзисторов и контактов к коллекторной области. Формирование контактов к коллекторной области необходимо потому, что материалом контакта и межсоединений служит алюминий, являющийся для кремния примесью р-типа и имеющий максимальную растворимость $\sim 10^{19}+10^{20}$ атом/см³ (табл. II.II). Поэтому для предотвращения образования р-п-переходов при сплавлении алюминия, поверхностная концентрация фосфора в этих местах должна

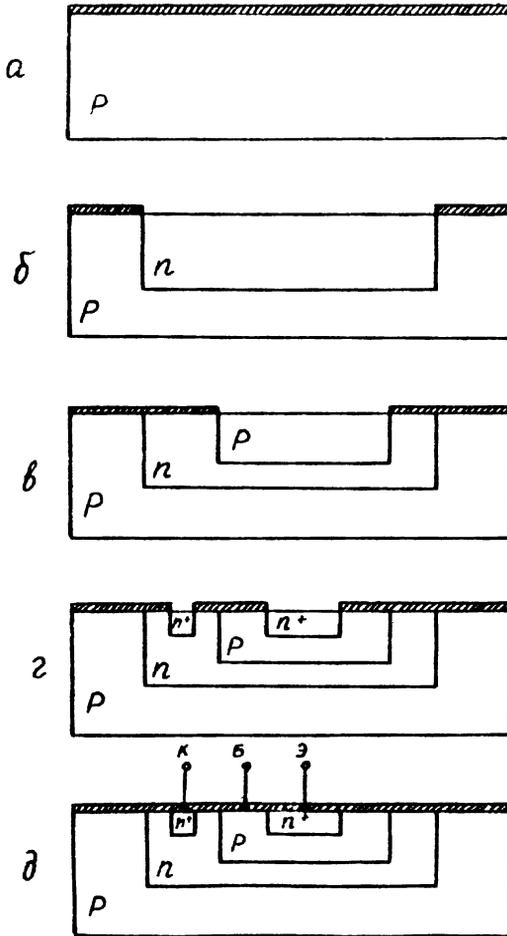


Рис. П.51. Схемы планарного технологического процесса:

а - исходная пластина кремния p-типа; б - диффузия примеси n-типа, создание коллектора; в - диффузия примеси p-типа, создание базы транзистора; г - диффузия примеси n⁺-типа, создание эмиттера и коллекторного контакта; д - вскрытие окон под контакты

ость высокой, практически более $2 \cdot 10^{20}$ атом/см³.

Эмиттерная диффузия проводится при высокой поверхностной концентрации фосфора, тем самым создаются области n^+ - типа на глубину $\sim 3,5-4,5$ мкм. Эта операция завершает формирование четырехслойной транзисторной структуры в пластине кремния. Для обеспечения коммутации компонентов схемы проводят еще раз окисление поверхности кремния в имеющихся отверстиях пленки

SiO_2 и фотолитографическим методом и травлением окисла вскрывают окна под контакты в соответствующих местах. Последующими операциями создается коммутация.

Диффузионный профиль полученной структуры представлен на рис. П.52.

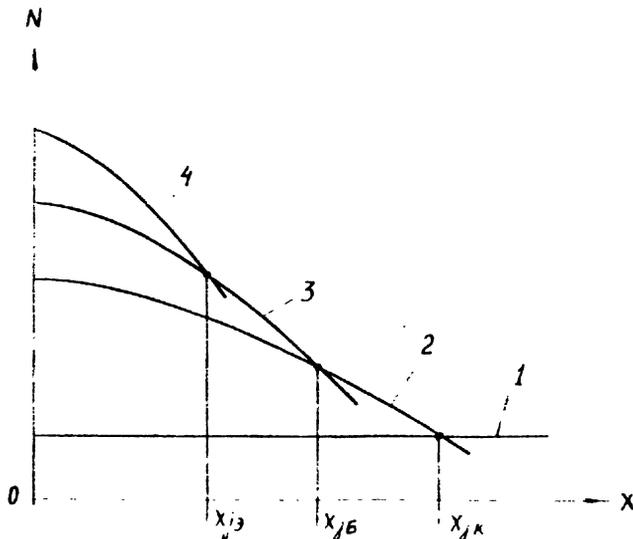


Рис. П.52. Диффузионный профиль планарной структуры:

1 — концентрация примеси в исходной пластине; 2 — профиль коллекторной диффузии; 3 — профиль базовой диффузии; 4 — профиль эмиттерной диффузии; x_{jk} — глубина изолирующего перехода; $x_{jб}$ — глубина перехода К-Б; $x_{jэ}$ — глубина перехода Э-Б

Основным преимуществом данной технологии является относительно простая технология всех процессов. Но интегральные схемы, полученные по этой технологии, имеют существенные недостатки. Так как концентрация примесей в коллекторе с глубиной подложку убывает, в транзисторе пробивное напряжение перехода коллектор-база оказывается низким, а емкость этого перехода высокой. Транзисторы интегральной схемы с таким распределением примесей имеют большое сопротивление тела коллектора. Кроме того, по данной технологии в объем полупроводниковой пластины проводятся три последовательные диффузии примесей и их суммарная концентрация достигает большой величины. Это снижает подвижность носителей и ухудшает электрические свойства транзисторов.

Планарно-эпитаксиальная технология

Отличительной особенностью этой технологии является то, что коллекторные области транзисторной структуры создаются не методом диффузии, а эпитаксиальным выращиванием слоя кремния n -типа проводимости на подложке p -типа с последующей изоляцией этих областей p - n -переходами. Последовательность технологических операций изготовления ИС по данной технологии описана выше. Данная технология имеет ряд преимуществ перед чисто планарной технологией. Можно получить необходимые концентрации примесей в подложке и в коллекторной области независимо друг от друга и тем самым обеспечить оптимальные значения емкости коллектор-база, пробивного напряжения этого перехода и минимальную емкость перехода коллектор-подложка. Коллекторное сопротивление также значительно снижается (до 25-30 ом). Кроме того, при этой технологии легче осуществляется изоляция компонентов схемы. Общее количество последовательных компенсирующих диффузий сокращается до двух, что снижает общее количество примесей, вводимых в пластину, и улучшает электрические свойства транзисторов.

Для снижения эффективного сопротивления слоя коллектора, без ухудшения других характеристик транзистора, применяют модификацию данного метода с введением скрытого слоя. Последовательность технологических операций получения скрытого слоя методом

диффузии представлена на рис. П.53. В пластине кремния р-типа проводимости операциями фотолитографии и диффузии создается область с низким сопротивлением p^+ -типа. Для создания этой области необходимо использовать диффузаны с малыми, по сравнению с бором и фосфором, коэффициентами диффузии, чтобы при последующих операциях диффузии, проводимых при повышенных температурах, не происходило заметного "расползания" скрытого слоя. Такими донорными примесями являются сурьма и мышьяк, имеющие коэффициенты диффузии на порядок меньше, чем у бора и фосфора. Глубина скрытого слоя ~ 2 мкм. После создания этого слоя удаляется слой SiO_2 и производится наращивание слоя п-типа проводимости методом эпитаксии. Последующие операции по созданию транзисторной структуры проводятся обычным для планарно-эпитаксиальной технологии способом. В результате в полученной структуре параллельно с коллекторной областью оказывается включенным скрытый слой, имеющий низкое сопротивление, что дает возможность снизить сопротивление слоя коллектора до единиц ома. Кроме того, толщина эпитаксиальной пленки при этом может быть уменьшена до 10 мкм.

Скрытый слой может быть создан методом селективного эпитаксиального наращивания. На рис. П.54 иллюстрируется этот процесс. В подложке кремния р-типа через маску SiO_2 селективным травлением удаляют слой кремния там, где необходимо получить скрытый слой. После этого эпитаксиальным наращиванием это углубление заполняется кремнием p^+ -типа. Затем с пластины удаляется пленка SiO_2 и эпитаксиально наращивается слой кремния п-типа проводимости. После этого проводятся обычные операции создания транзисторной структуры.

Планарно-эпитаксиальный метод изготовления ИС в настоящее время распространен наиболее широко.

Технология с диэлектрической изоляцией компонентов

В предыдущих методах компоненты ИС изолировались друг от друга р-п-переходами. Это создает описанные выше недостатки при изоляции компонентов и в необходимых случаях применяется изоляция компонентов диэлектриком. Методы такой изоляции подробно

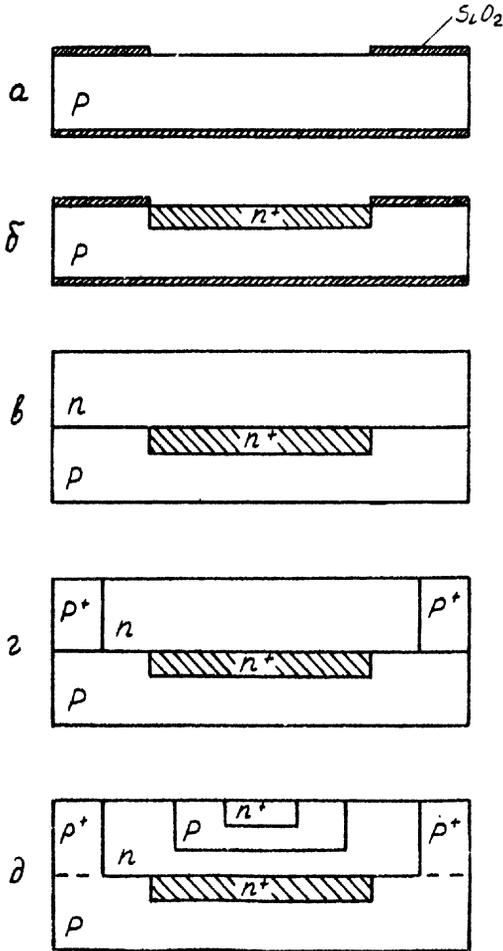


Рис. П.53. Схема получения скрытого слоя:

а - исходная пластина p-типа; б - получение диффузионного скрытого слоя p⁺-типа; в - удаление окисла и нанесение эпитаксиального слоя n-типа; г - проведение изолирующей диффузии; д - создание компонентов ИС

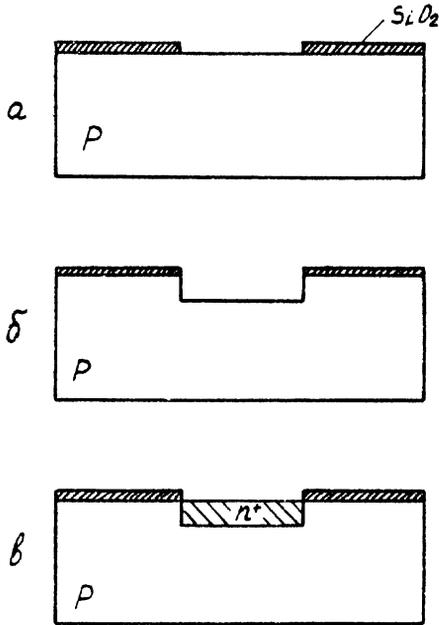


Рис. П.54. Схема получения скрытого слоя методом селективной эпитаксии:

а - исходная пластина кремния р-типа; б - травление кремния; в - селективное нанесение эпитаксиального скрытого слоя p^+ -типа

освещены в разделе П.8, а для создания транзисторной структуры используется обычная планарная технология.

Совмещенная технология

Эта технология характеризуется тем, что все активные компоненты схемы создаются по планарной, планарно-эпитаксиальной технологии или с изоляцией компонентов диэлектриком, а пассивные компоненты создаются пленочной технологией путем напыле-

ния резистивных, проводящих и диэлектрических пленок на поверхность полупроводниковой ИС, покрытую слоем двуоксида кремния. При совмещенной технологии предполагается использование противоположных сторон полупроводниковой и тонкопленочной технологий. Но изготовление ИС по данной технологии требует дополнительных технологических операций и несколько усложняется.

10. Завершающие операции изготовления полупроводниковых ИС

После выполнения всех основных технологических операций по созданию ИС на полупроводниковой пластине мы получаем пластины, каждая из которых может содержать до нескольких сотен отдельных ИС. Для получения готовой ИС необходимо создать межсоединения в схемах, разделить пластины на отдельные ИС, поместить кристаллы в корпус, присоединить выводы и герметизировать.

Создание межсоединений

В первых образцах ИС соединения между компонентами осуществлялись с помощью тонких проволочек, присоединяемых к контактному участку методом термокомпрессии. Но такие соединения были дорогими и не технологичными. После появления планарной структуры ИС межсоединения выполняются с помощью тонких пленок, наносимых на изолирующий слой двуоксида кремния. Тонкая металлическая пленка, которая используется в качестве проводников внутрисхемной коммутации, должна обладать необходимыми свойствами: обеспечивать невыпрямляющий контакт с полупроводником, иметь хорошую адгезию с кремнием и двуокисью кремния, иметь достаточно низкое удельное сопротивление, давать возможность присоединения выводов ИС. Для осуществления коммутации могут применяться золото, никель, свинец, серебро, хром, алюминий и системы $Cu - Au$; $Ti - Au$; $Mo - Au$; $Ti - Pt - Au$ и т.д. В кремниевых ИС для создания коммутации в настоящее время широко применяется алюминий.

Алюминий обладает целым рядом положительных свойств, необходимых для создания коммутации:

можно изготавливать ИС с металлизацией одним металлом, что упрощает технологию;

высокая проводимость, близкая к проводимости объемного материала;

хорошая адгезия к Si и SiO_2 ;

хорошо испаряется в вакууме;

пленки Al хорошо обрабатываются при проведении операций фотолитографии для получения нужной конфигурации проводников, они хорошо поддаются травлению, которое не действует на Si и SiO_2 ;

вступает в реакцию с SiO_2 , которая частично остается на контактных площадках;

образует низкоомные контакты с кремнием p^+ -типа и n -типа;

в системе $Al-Si$ никаких хрупких химических соединений не образуется;

кремний, находящийся в Al в виде твердого раствора, почти не уменьшает его электропроводность;

к пленке Al хорошо присоединяется золотая и алюминиевая проволока;

выдерживает циклические изменения температуры (достаточно пластичен);

стойк к окислению в атмосфере;

достаточно хороший материал для схем, стойких к радиации;

дешевый материал.

Обнаружено еще одно положительное свойство Al . При локальном пробое пленки SiO_2 под пленкой Al алюминий плавится и отходит в стороны от места пробоя, это обеспечивает мгновенную изоляцию места пробоя.

Метод металлизации алюминием имеет и целый ряд недостатков, которые необходимо учитывать при выполнении межсоединений:

1) при одновременном использовании с другими металлами возможна коррозия Al из-за гальванического эффекта;

2) при температурах $\sim 500^\circ C$ происходит довольно интенсивная реакция Al с SiO_2 .

3) при соединении с Al возможно появление хрупких контактов с плохой проводимостью;

4) пленка Al легко может быть повреждена из-за мягкости алюминия;

5) в напыленных пленках имеются механические напряжения (растяжения $\sim 1,5 \cdot 10^9$ дин/см²);

6) у Al значительно больший коэффициент теплового расширения, чем у Si , что вызывает значительные механические напряжения при термоциклировании.

Коммутацию с помощью пленок Al осуществляют по следующей технологии. Когда завершены все операции по созданию структур в объеме полупроводниковой пластины, она покрывается слоем SiO_2 . Методом фотолитографии в пленке SiO_2 в местах, где должны быть контакты к кремнию, вскрывают окна соответствующих размеров. После этого методом термического испарения в вакууме наносится на пластину сплошная пленка алюминия толщиной ~ 1 мкм. Для специальных случаев толщина пленки колеблется от 0,5 до 2 мкм. В случае многослойной металлизации первый слой металла наносится более тонким, чем последующий слой диэлектрика и второй слой металла. Пленка Al имеет удельное сопротивление $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ ом.см, т.е. на 10-20% больше сопротивления объемного Al ($2,7 \cdot 10^{-6}$ ом.см). Сопротивление в омах на квадрат составляет $10^{-2} + 10^{-3}$.

Необходимый рисунок проводов и контактных площадок создается методом фотолитографии. Ширина линий проводников и промежутков между ними равна 10-13 мкм. В настоящее время вполне доступно создание проводящих полосок шириной $\sim 2,5$ мкм и продемонстрирована возможность изготовления полосок Al шириной чуть больше 1 мкм.

После нанесения рисунка пластину подвергают термообработке для получения низкоомных контактов к кремнию. В обычном случае пластину нагревают до температуры 550° и выдерживают несколько минут. Жидкой фазы при этом не образуется, так как эта температура лежит ниже температуры эвтектической точки, что можно видеть из фазовой диаграммы системы $Al - Si$ (рис. П.55). Эта операция приводит к растворению кремния в алюминии. Более высокая температура (выше температуры эвтектической

точки 576°C) приводит к появлению жидкой фазы на границе раздела, в которой оба материала растворяются в соответствующей пропорции. При повышении температуры может наступить момент,

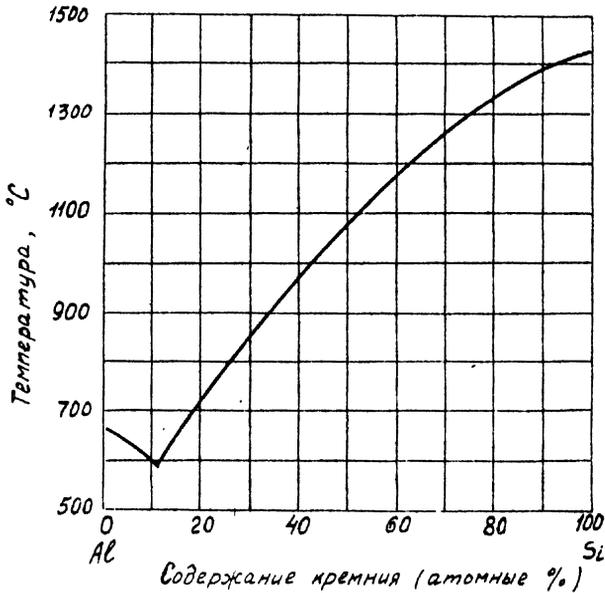


Рис.П.55. Фазовая диаграмма системы $\text{Al}-\text{Si}$

когда весь алюминий (пленка Al тонкая) будет растворен в кремнии. При снижении температуры из жидкой фазы выделяется кремний, образуя рекристаллизационный слой на поверхности раздела с концентрацией алюминия $\sim 5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, а так как алюминий является для кремния акцепторной примесью, то полученный рекристаллизационный слой будет иметь проводимость р-типа. Таким образом, при образовании контакта к области кремния с проводимостью р-типа примесь Al только увеличит концентрацию этой примеси; при образовании контакта к области крем-

ния с проводимостью *n*-типа, если ее концентрации будет меньше $\sim 5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, диффундирующий в кремний *Al* изменит проводимость кремния на *p*-тип и в данном месте образуется *p-p*-переход, т.е. выпрямляющий контакт. Эмиттерные области транзисторов *p-p-p*-типа в ИС имеют концентрацию примесей обычно $\sim 10^{21}$ атом/см³, что значительно больше $5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, поэтому контакт к этой области будет невыпрямляющим. В месте контакта к коллекторной области, где концентрация примеси *n*-типа может быть ниже $5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, необходимо создать локальный участок проводимости *p*⁺-типа. Операция сплавления должна выполняться при строгом соблюдении технологического режима, в противном случае могут появляться разрывы токоведущих дорожек из *Al*.

Разделение пластин на кристаллы

Разработано несколько способов разделения пластин кремния на отдельные пластинки-кристаллы, содержащие ИС.

Наиболее широко применяется метод скрайбирования и раскалывания. При этом методе кремниевую пластину помещают на вакуумный патрон специального скрайберного станка. Патрон может перемещаться в горизонтальной плоскости и поворачиваться относительно вертикальной оси. На этом станке алмазным резцом проводят линии резов между ИС на пластине в одном направлении, затем пластина поворачивается на 90° и линии резов между ИС проводят в другом направлении. После этого пластина снимается со станка, помещается на упругое основание (резина) лицевой стороной и прокатывается валиком. При этом происходит разламывание ее на отдельные ИС, которые после промывки от частичек, образовавшихся при этой операции, готовы для сборки в корпус.

Пластины можно разделять на отдельные ИС травлением. Для этого пластины покрывают защитным для травителя материалом (парафин, фоторезист), за исключением тех мест, по которым должно осуществляться разделение. После этого незащищенные участки травят и происходит разделение пластин.

Можно разделять пластины на отдельные ИС и с помощью ультразвука.

Прикрепление кристаллов к корпусу и присоединение выводов

Прикрепление кристаллов к корпусу осуществляется либо мягким припоем, либо эвтектическими сплавами (типа $Al-Si$; $Au-Ge$) Эвтектические сплавы имеют более высокую температуру плавления, нечувствительны к термоциклированию, но имеют сравнительно высокую стоимость, высокую хрупкость, что затрудняет получение сложных форм.

Для получения эвтектического сплава $Au-Si$ обратную сторону кристаллика с ИС покрывают золотом методом термического испарения в вакууме, помещают кристаллик на основание корпуса и нагревают до температуры точки эвтектики системы $Au-Si$ $358^{\circ}C$. Образующийся эвтектический сплав прочно прикрепляет пластинку кремния к корпусу. Эта операция осуществляется в установках двух типов:

1. Непрерывной - печь в виде длинной полой трубы, с определенным профилем температуры вдоль ее оси, в которой интегральные схемы, установленные на ножках или основаниях корпусов, помещаются на конвейерную ленту и проходят через печь с определенной скоростью.

2. Однопозиционной - в установке имеется только одна позиция, в которую помещается корпус с ИС с помощью манипулятора и производится нагрев до расплавления припоя.

В обоих случаях пайка производится в инертной атмосфере.

Для крепления кристаллов используют также пирокерамику - легкоплавное стекло (с температурой плавления $400-500^{\circ}C$).

Электрические соединения между выводами корпуса и внешними контактами ИС осуществляют с помощью тонкой золотой проволоки, которая присоединяется к контактными площадкам ИС методом термокомпрессии. Если для этой цели применяется алюминиевая проволока (обычно содержащая 1% Si), присоединение выводов производят ультразвуком.

При создании выводов ИС, когда для этой цели используется золотая проволока и алюминиевые контактные площадки, возникает проблема металлургической совместимости. Система $Au-Al$

дает хороший контакт между собой и кремнием, пластична и устойчива к коррозии (Au), но до температуры $\sim 200^{\circ}C$. При нагреве $Au - Al$ до $300^{\circ}C$ на их контакте образуется красное вещество ($AuAl_2$) с хорошей электропроводностью и высокой прочностью (получившее название "красная чума"). При нагреве системы $Au - Al$ выше $300^{\circ}C$, кроме фазы красного цвета, образуется пленка белого вещества - очень хрупкое вещество (Au_2Al) с плохой электропроводностью, что значительно ухудшает контакты (называют "белая чума"). Причем полагают, что кремний в данном случае является катализатором.

Сборка в корпус

Интегральная схема в период транспортировки, хранения и эксплуатации должна быть надежно защищена от действия влаги, механических повреждений и других факторов, способных вывести ее из строя. Для этой цели ИС помещают в корпуса и герметизируют. Основные требования к корпусам и операции по герметизации полупроводниковых ИС аналогичны изложенным в главе УП для пленочных гибридных ИС. В настоящее время применяются металлические круглые (типа ТО-5), металлические плоские и пластмассовые корпуса.

Г л а в а Ш

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

І. Общие положения

Процесс разработки микросхемы можно условно разделить на три этапа.

Первый подготовительный этап – до изготовления микросхемы. К нему относятся: формулировка требований, предъявляемых к микросхеме в целом, определение функционального состава и формулировка требований к отдельным функциональным узлам; выбор метода реализации заданных функций для каждого функционального узла; выбор принципиальной схемы и расчет ее элементов (для каждого функционального узла); проверка работоспособности принципиальной схемы на макете из дискретных элементов; комплекс расчетов, связанных с реализацией разрабатываемых функциональных узлов в микроэлектронном исполнении; выбор топологии микросхемы, расчет ее отдельных элементов и соединений между ними. Если разрабатывается полупроводниковая интегральная схема, изготавливаемая методом диффузии примесей в полупроводник, то предварительно рассчитывается распределение примесей, определяются режимы технологического процесса, необходимого для получения заданного распределения примесей. Далее производится проверка характеристик микросхемы в целом расчетным путем (обычно при помощи ЦВМ) либо экспериментальным путем на моделях; исследуется работоспособность микросхемы в интервале воздействий различных дестабилизирующих факторов: при изменении температуры, напряжений источников питания, с учетом отклонений параметров технологических процессов, неточности изготовления и т.д. Этот первый этап условно можно назвать "этапом проектирования".

Второй этап – изготовление микросхемы.

Третий этап – испытания готовой микросхемы: отбраковка негодных микросхем, проверка электрических и тепловых характеристик; механические и климатические испытания; проверка надежности и др. В результате испытаний может оказаться, что готовая микросхема не удовлетворяет требованиям технического задания. В этом случае, после выявления причин несоответствия, микросхема проектируется, изготавливается и испытывается заново, т.е. цикл разработки повторяется.

Важная особенность интегральных схем состоит в том, что их необходимо рассматривать как единое целое. Действительно, микросхема изготавливается в едином технологическом процессе^{х)}, расположена на единой подложке, либо изготовлена в единой полупроводниковой пластине. Ее элементы находятся в непосредственной близости друг от друга. Это означает, что отдельные элементы микросхемы связаны друг с другом электромагнитными и тепловыми связями. Микросхема не может быть изменена по частям. Если характеристики готовой микросхемы не удовлетворяют требованиям технического задания, ее необходимо изготовить заново. Испытывается микросхема также как единое целое. Ее электрические характеристики измеряются на внешних выводах. Хотя в отдельных случаях и предусматриваются дополнительные выводы от элементов микросхемы, но число таких "тестовых" микросхем составляет обычно только небольшой процент от общего числа микросхем, изготавливаемых в едином технологическом процессе. Кроме того, изучение характеристик отдельных элементов не всегда дает исчерпывающую информацию об их функционировании в схеме.

Если в процессе проектирования не удастся получить исчерпывающей информации о будущей микросхеме либо оказывается, что во время проектирования получены неверные сведения о ней, в этом случае микросхема должна быть спроектирована и изготовлена заново. Изготовление микросхемы, как известно, является трудоемким процессом, требующим значительных затрат времени и средств. Отсюда ясно, что увеличивается значение и ответственность этапа проектирования в общем процессе разработки микросхемы.

При разработке микроэлектронных устройств во многих случаях могут быть использованы известные принципы построения макроэлектронных устройств^{хх)}. Это относится к вычислительной технике и к устройствам приема-передачи информации. Однако методы проектирования макрохем не могут быть без изменений использованы для проектирования микрохем.

Предположим, для микроэлектронного приемника мы хотим использовать принципиальную схему усилителя промежуточной частоты, займ-

х) Если речь идет о гибридной интегральной схеме, то в едином технологическом процессе изготавливается ее пассивная часть.

хх) Под термином "макроэлектронные" будем подразумевать устройства, в которых используются дискретные элементы.

ствованную из макросхемотехники, в которой используются дискретные элементы. Пусть этот усилитель содержит несколько каскадов, в которых избирательность по частоте достигается за счет связанных LC-контуров. Проектирование аналогичного микросхемного устройства имеет ряд отличительных особенностей. Прежде всего, микросхемы имеют плоскую конфигурацию. Методы расчета параметров элементов микросхем имеют свою специфику. Частотные свойства резисторов, конденсаторов, индуктивных элементов существенно отличаются от частотных свойств дискретных элементов. Далее, электромагнитные и тепловые связи между элементами в микросхеме также существенно отличаются от аналогичных связей в макросхеме. Может оказаться, что величины некоторых параметров вообще не могут быть достигнуты при существующей технологии изготовления. Например, индуктивность плоских спиралей обычно ограничивается величиной в несколько микрогенри. Так что, например, выполнение индуктивных элементов для связанных контуров усилителя на 465 кГц в виде плоской спирали в едином технологическом цикле с остальными элементами схемы наталкивается на очевидные трудности. Это же относится к конденсаторам с большой емкостью. Если в едином технологическом цикле изготавливаются и пассивные и активные элементы (как в полупроводниковых интегральных схемах), то номиналы элементов подчинены еще более жестким ограничениям.

Таким образом, в процессе проектирования "на уровне" разработки принципиальной схемы появляются особенности, присущие микросхемной электронике.

Поиски путей преодоления трудностей создания микросхем по аналогии с макросхемами привели к широкому фронту исследований как в области технологии, так и в области схемотехники. Возьмем для примера индуктивный элемент микросхемы. С одной стороны, тщательное изучение технологии изготовления тонкопленочных плоских спиралей позволило существенно увеличить их добротность. С другой стороны, исследования в области схемотехники идут по пути усовершенствования RC-схем с активными элементами, с помощью которых могут быть получены избирательные устройства без индуктивностей.

Далее, в микросхемотехнике находят применение некоторые конфигурации, не имеющие аналогов в схемотехнике с дискретными элементами. К ним относятся структуры с распределенными параметра-

ми (многослойные РС-структуры, однородные и неоднородные длинные линии). Выбор зажимов для ввода и съема сигналов позволяет получать множество схем, обладающих различными частотными и импульсными свойствами. Таким образом, использование структур с распределенными параметрами в качестве схемных элементов вносит дополнительную специфику в проектирование микросхем.

До сих пор речь шла об использовании принципов построения функциональных элементов, заимствованных из макросхемотехники. Особенности группового метода производства микросхем привели к разработке новых принципов создания функциональных устройств обработки, хранения и передачи информации. При групповом методе производства микросхем целесообразно разрабатывать устройства, содержащие большое число однотипных элементов. Выполняя различные соединения однотипных элементов, можно во многих случаях по-новому построить функционирование устройства. Так, например, в последнее время разрабатываются "однородные системы", содержащие большое число однотипных элементов.

Для расчета принципиальной схемы необходимо иметь информацию о зависимости параметров ее элементов от их размеров, свойств материалов, взаимного расположения и т.д. Кроме того, активные и пассивные элементы должны быть представлены своими эквивалентными схемами. Это позволяет составить общую схему функционального узла и рассчитывать ее известными методами расчета электрических цепей.

Во многих случаях параметры элементов микросхем могут быть определены в результате решения краевых задач математической физики. В других случаях более эффективными оказываются различные виды моделирования.

Для расчета сложных микросхем широко применяется вычислительная техника.

В результате расчета принципиальной схемы устанавливаются связи между схемными функциями и параметрами элементов схемы. После этого правильность функционирования принципиальной схемы может быть проверена на макете из дискретных элементов. Здесь важно отметить, что макет из дискретных элементов не дает достаточно достоверной информации о свойствах будущей микросхемы.

Параметры элементов, электромагнитные и тепловые связи между ними, электрические и тепловые режимы существенно различны в микросхемах и в макете, собранном из дискретных деталей. Это обстоятельство послужило причиной разработки методов моделирования микросхем на основе теории подобия. В таких моделях между характеристиками модели и "натуры" (микросхемы) имеется однозначное соответствие, позволяющее получить более достоверную информацию о ее свойствах.

После проверки функционирования принципиальной схемы изучается возможность ее реализации в микроэлектронном исполнении. На этом этапе должны учитываться схемотехнические, технологические и конструктивные факторы. При составлении топологии микросхемы учитываются различные ограничения схемотехнического и технологического характера.

Спроектированная микросхема должна удовлетворять требованиям технического задания в смысле сохранения работоспособности в интервале воздействия дестабилизирующих факторов: при изменении температуры, влажности, напряжений источников питания, под действием радиации и т.д. Исследование области работоспособности микросхемы может быть выполнено в процессе проектирования при помощи ЦВМ, которая моделирует отклонения параметров в указанных пределах и выдает информацию о соответствующих отклонениях параметров функционального узла. Для этого необходимо, прежде всего, знать пределы изменения параметров эквивалентных схем активных и пассивных элементов микросхемы в интервале воздействий дестабилизирующих факторов. ЦВМ играет здесь двоякую роль. Во-первых, оказывается возможным получить точные решения систем уравнений (часто нелинейных), составляющих математическую модель явлений в изучаемом объекте. При этом часто удается "нащупать" и обосновать приближения, необходимые для вывода упрощенных рабочих формул. Во-вторых, ЦВМ выполняет статистический анализ, в результате которого устанавливаются отклонения параметров структуры (например, транзистора), зависящие от случайных изменений технологического режима, от разброса параметров материалов и т.д.

В практике проектирования микросхем широкое применение нашел метод расчета работоспособности по наихудшему сочетанию параметров. При проектировании микросхем такой метод приводит к неоправданно заниженному проценту выхода годных изделий. При большом числе параметров в микросхемах вероятность одновременного наихудшего сочетания параметров очень мала.

Дискретные элементы проходят отбраковку на заводе-изготовителе, поэтому пределы изменения параметров пассивных элементов обычно бывают известными. В микросхемах закон распределения обычно бывает неизвестен. Для изучения отклонений параметров в общую партию микросхем вводятся специальные тестовые микросхемы, снабженные контактными площадками для измерения параметров элементов.

Остановимся далее кратко на проблеме автоматизации проектирования микросхем при помощи ЦВМ.

Выше уже отмечалось, что ЦВМ используются для решения краевых задач с целью расчета параметров элементов микросхемы и их зависимостей от различных факторов, а также для расчета сложных электрических схем. Имеются алгоритмы расчета чувствительности схемных функций к изменению параметров схемы. Такие расчеты позволяют выявить "слабые места" схемы, поскольку отклонение параметра за допустимые пределы может привести к нарушению функций микросхемы. Более того, при помощи ЦВМ может быть выполнен процесс оптимизации схемы по заданному критерию качества. Так, например, при помощи ЦВМ можно выбрать режимы диффузии примесей и обеспечить такую структуру транзистора в монолитной интегральной схеме, при которой разброс параметров будет минимальным. Имеются различные алгоритмы минимизации длины соединительных проводников и т.д.

В известном смысле расчеты на ЦВМ могут заменить этап макетирования для проверки функционирования принципиальной схемы. Например, выполняется расчет частотных характеристик усилителя, который позволяет сделать выводы о пригодности выбранной принципиальной схемы, о зависимости усиления от частоты и от изменения режима питания активных элементов.

До сих пор речь шла о таком проектировании микросхем, в основе которого лежал метод анализа. Это означает, что разработчик выбирал объект (полупроводниковую структуру, принципиальную схему и т.д.), после чего исследовал свойства доступными средствами. Если полученные в результате этого исследования характеристики

не удовлетворяли поставленным требованиям, объект изменялся, цикл исследования повторялся. Такой процесс не всегда является "сходящимся", т.е. не всегда ведет к достижению поставленной цели.

Учитывая важность проектирования в процессе разработки микросхемы, следовало бы использовать методы синтеза, т.е. такой алгоритм, при котором проектируется система, удовлетворяющая заданным характеристикам (например, синтез функционального блока по заданным частотным или временным характеристикам). Оказывается, что существующие методы синтеза макросхем в большинстве случаев не могут быть использованы для проектирования микросхем. Это происходит по разным причинам. Отметим некоторые из них. Прежде всего наиболее детально разработаны методы синтеза электрических цепей с сосредоточенными параметрами, а элементы интегральной схемы, вообще говоря, являются структурами с распределенными параметрами. В этом случае схемные функции выражаются через гиперболические функции комплексного переменного и имеют приемлемые методы реализации только в частных случаях (например, заданная частотная зависимость комплексного сопротивления двухполюсника может быть реализована комбинацией RC-линий).

Проблема аппроксимации также имеет свою специфику. Обычная аппроксимация заданных частотных зависимостей при помощи дробно-рациональных функций от оператора Лапласа не может быть использована без дополнительных преобразований.

Если есть возможность рассматривать интегральную схему с сосредоточенными параметрами (на низких частотах) и воспользоваться известными методами синтеза, то все равно этап реализации не всегда выполним из-за трудностей создания плоских индуктивных элементов и трансформаторов, трудностей реализации больших значений RC, из-за паразитных связей и других специфических особенностей микросхем.

Трудоемким этапом проектирования интегральных схем является разработка топологии, которая должна учитывать многие факторы и ограничения. В частности, соединения между элементами должны выполняться так, чтобы по возможности избежать пересечений и минимизировать длину соединительных проводников.

Для примера рассмотрим метод, разработанный для автоматического проектирования печатных плат. Подготовка входных данных заключается в разбивке принципиальной схемы на клетки так, чтобы каждый

элемент полностью содержался бы в некотором квадрате. Каждая соединительная шина, ее изгиб или пересечение с другой шиной также заключается в отдельный квадрат. Элементы обозначаются на схеме символами. ЦВМ опознает эти символы, определяет их положение и составляет перечень элементов, подключенных к каждому узлу.

Элементы на плате размещаются "силовым" методом. Для этого вводится четыре вида сил. Сила притяжения между элементами стремится их сблизить и тем самым минимизировать длину соединительных проводников. Однако в действительности они должны быть сближены на расстояния, определяемые технологическими допусками. Поэтому вводятся силы отталкивания, действующие на близких расстояниях и препятствующие чрезмерному сближению элементов. Третий вид сил вводится для повтора элементов. Силы четвертого вида отталкивают элементы от краев платы, тем самым препятствуют перемещению элементов за ее пределы. Перемещение элементов пропорционально приложенным силам.

В результате взаимодействия всех сил элементы располагаются так, что длина проводников минимизируется, но допуски на сближение выполняются.

Таким образом, роль ЦВМ сводится к решению системы уравнений, описывающих силовое взаимодействие элементов. Это решение определяет положение элементов, соответствующее равновесию всех сил.

Соединения между элементами выполняются "топографическим" методом, при котором минимизируется число пересечений проводников. Вся площадь платы изображается в виде топографической карты. Места соединений обозначаются пиками (вершинами), между которыми находятся склоны и долины. Соединение прокладывается по пути наибольшей крутизны. Поэтому для выполнения соединения между двумя точками одна из них сохраняется в виде пика, а другая "уталливается", т.е. выступ заменяется впадиной. После прокладки путей соединения выступ восстанавливается, поэтому вторичное соединение с этой точкой оказывается невозможным.

С помощью ЦВМ компоновка печатной платы существенно ускоряется. Если при обычном методе проб и ошибок требуется, например, несколько недель работы, то ЦВМ выполняет компоновку платы за несколько минут.

Проектирование межсоединений в интегральной схеме имеет свою специфику.

Во-первых, размеры и форма элементов более разнообразны. Во-вторых, допуски в интегральной схеме более жестки. В литературе имеется сообщение о разработке усовершенствованных алгоритмов проектирования топологии и межсоединений в интегральных схемах.

После того как электрическая часть интегральной схемы спроектирована, решен вопрос о размещении элементов и соединений между ними, необходимо изготовить шаблоны (фотооригиналы). Разработка фотооригиналов является трудным и дорогим этапом в производстве микросхем. И здесь на помощь разработчику приходит ЦВМ, которая может управлять координатографом в процессе вычерчивания фотошаблонов. Особенно большой выигрыш во времени и средствах получается при разработке больших интегральных схем (БИС).

В литературе имеются также сообщения о разработке системы избирательного монтажа, которая позволяет выполнять межсоединения в БИС в зависимости от состояния отдельных пластин, на которых могут быть годные и неисправные элементы. В этой системе используются специальные тестовые устройства, управляемые ЦВМ. Результаты испытаний отдельных элементов запоминаются ЦВМ, которая составляет карты годных ячеек для каждой пластины. Только после этого ЦВМ выполняет межсоединения (с учетом информации о неисправных элементах). В этой системе уже имеется непосредственная связь между проектированием и изготовлением микросхемы, и эта связь осуществляется ЦВМ.

Таким образом, вычислительные машины оказывают большую помощь разработчикам микросхем. Нужно, однако, иметь в виду, что разработка метода использования ЦВМ, алгоритма и машинных программ, отладка этих программ занимают много времени. А время разработки новой аппаратуры может явиться иногда решающим фактором. Поэтому в процессе проектирования необходимо разумно сочетать использование ЦВМ с моделированием на основе теории подобия, аналоговым моделированием и экспериментом.

2. Моделирование при проектировании интегральных схем

Обычный процесс проектирования нового устройства (например, приемника) в общих чертах состоит в следующем. Разработчик получает техническое задание, в котором указаны требования, предъяв-

ляемые к приемнику. Для того, чтобы обеспечить выполнение этих требований, ему необходимо изучить различные варианты, которые могут отличаться функциональным составом (т.е. иметь различные блок-схемы функциональных узлов), принципиальными схемами отдельных функциональных узлов и т.д. Для сравнения различных вариантов разработчику придется проделать предварительные расчеты, для чего он воспользуется учебной и справочной литературой, своим личным опытом, а может быть также и "инженерной интуицией". Эти предварительные расчеты чаще всего проверяются на макетах, имеющих переменные сопротивления, емкости или индуктивности. Вариация их величин позволяет уточнить результаты приближенных расчетов и быстрее найти решения, удовлетворяющие требованиям технического задания.

Такой расчетно-экспериментальный метод возможен благодаря двум обстоятельствам. Во-первых, в распоряжении разработчика уже есть расчетные формулы, которые показывают "что от чего зависит" и дают необходимую информацию для целенаправленной разработки. Во-вторых, экспериментальная проверка и "доработка" на макетах приносят большую пользу в том случае, если в дальнейших этапах разработки, при выборе конструкции и в процессе изготовления разрабатываемый объект не претерпевает существенных изменений.

Однако расчетные формулы, в которых отражены проверенные на практике количественные связи между различными явлениями, появляются в результате большой научно-исследовательской работы, в процессе которой эти связи выявляются и изучаются. В начальной стадии таких исследований может быть неясной не только количественная, но и качественная картина явлений. В этих условиях большую роль играет так называемое теоретическое моделирование, примеры которого рассмотрены ниже. На основании существующих представлений об основных физических процессах, происходящих в изучаемом объекте, формулируется "теоретическая" модель. Эта модель содержит ряд допущений и предположений, позволяющих упростить задачу, выделить изучаемое явление "в чистом виде" и избавиться от второстепенных факторов.

Такая модель может быть названа "теоретической" только условно. В действительности она является "гипотетической" моделью. Гипотеза становится теорией только после ее проверки практикой. С этой оговоркой мы сохраним термин "теоретическая модель", так как он часто используется в периодической и учебной литературе. Информация о

свойствах теоретической модели может быть получена различными путями.

Часто физические процессы в теоретической модели удается описать математическими уравнениями. В этом случае мы имеем математическую модель объекта. Дальнейшая информация может быть получена в результате решения уравнений и изучения свойств этих решений. Другими словами, вся информация получается при этом только средствами математики. На этом пути иногда встречаются большие трудности. В обход этих трудностей принимаются упрощающие допущения, которые необходимо проверить экспериментальным путем, когда они не очевидны из смысла задачи. Если математическая модель представлена в виде системы уравнений, то вместо того, чтобы решить эти уравнения, может оказаться более целесообразным изучить другой физический объект, в котором процессы описываются аналогичными уравнениями. Например, можно использовать электромеханические аналогии или тепловые и диффузионные процессы изучать в электрических цепях. Такое моделирование условно назовем аналоговым. Большое значение в технике имеет моделирование на основе теории подобия явлений. В отличие от аналогового моделирования, в этом случае изучается такой же физический объект, как и заданный, но с измененными параметрами, более удобными для экспериментального изучения. Например, изучаются свойства уменьшенной плотины или самолета. В микроэлектронике, наоборот, изучаются увеличенные модели микросхемы.

При использовании теории подобия между величинами, описывающими объект и модель, существует однозначное соответствие. Более того, существуют инварианты преобразования, т.е. величины, численно одинаковые для модели и "натуры" (изучаемого объекта). Характеристики, зависящие от этих величин, также инвариантны. При использовании моделирования на основе теории подобия основная трудность состоит в реализации критериев подобия. Для этого необходимо подобрать материалы модели, ее размеры и другие параметры в таких соотношениях, которые "диктуются" критериями подобия, а это не всегда можно сделать.

Микроэлектроника является новым научно-техническим направлением. Опыт проектирования макросхем, в которых используются дискретные элементы, не может быть непосредственно и полностью использован для проектирования микросхем. Необходимые для проектирования коли-

чественные зависимости еще только устанавливаются, а расчетные формулы далеко не всегда имеются в распоряжении разработчика. Экспериментальное изучение микросхем является несравненно более трудным делом, чем схем на дискретных элементах. Выявление функциональных зависимостей между характеристиками микросхемы в целом и свойствами ее элементов прямым экспериментальным путем затруднено из-за большого числа элементов, сложности электромагнитных связей между ними, "недоступности" отдельных элементов, невозможности произвольно изменять их параметры и связи между ними. Методы "неразрушающих испытаний" микросхем еще только разрабатываются. Макет, составленный из дискретных элементов, не дает достаточно достоверной информации о свойствах микросхемы. Характеристики макета и микросхемы совпадают только в частных случаях. Поэтому на макете отрабатываются в основном только принципиальные схемы. Трудности прямых экспериментов над микросхемами приводят к необходимости такого планирования экспериментальной работы, которое позволяет получить необходимую информацию при минимальном числе экспериментов, минимальных затратах времени и средств. Для этой цели находят применение математические методы планирования экспериментов.

Уменьшение роли и значения прямого экспериментального метода неизбежно приводит к увеличению роли и значения различных видов моделирования. Разумный выбор метода моделирования или совокупности методов позволяет еще в стадии проектирования, до изготовления микросхем, получить о ней необходимую информацию. А это, в свою очередь, дает возможность уменьшить число повторных циклов изготовления и изменения параметров микросхемы в процессе последовательных улучшений ее характеристик.

3. Теоретическая модель полевого транзистора

Сущность теоретического моделирования лучше всего усвоить на примерах. Рассмотрим важные для микросхемотехники теоретические модели активных элементов: полевых и биполярных транзисторов. Принцип действия полевого транзистора иллюстрируется на рис. 3.1. В цепи с последовательно включенными сопротивлениями R_k и R_{np} протекает постоянный ток. Величина сопротивления R_k может изменяться под воздействием сигнала (источник сигнала условно отображен на рисунке в виде источника с переменной ЭДС). При этом постоянный ток

становится пульсирующим и, следовательно, состоит из переменной и постоянной составляющих. За счет переменной составляющей выделяется мощность переменного тока в сопротивлении приемника $R_{пр}$. Если она больше той мощности, которую источник сигнала затрачивает на изменение сопротивления R_k , то изображенный на рисунке четырехполюсник является параметрическим услителем мощности. В зависи-

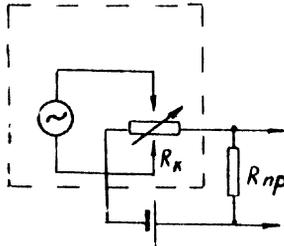


Рис. III.1. Схема параметрического усилителя

мости от характера сигнала он может работать в режиме усиления синусоидальных колебаний, либо в импульсном режиме.

В полевых транзисторах имеется проводящий канал, сопротивление которого может изменяться (модулироваться) под действием управляющего сигнала. Ток в канале протекает за счет напряжения, приложенного к электродам, один из которых назван истоком, а другой - стоком. Между этими электродами и каналом образованы омические (невыпрямляющие) контакты. Напряжение сигнала приложено между управляющим электродом - затвором и истоком. Модуляция сопротивления канала осуществляется электрическим полем источника сигнала. Для этой цели используется либо область объемного заряда р-п-перехода с обратным (запорным) смещением (рис. III.2), либо "эффект поля" (рис. III.3). В первом случае управляющее напряжение, приложенное к р-п-переходу (на рис. III.2 - к двум параллельно включенным р-п-переходам), изменяет ширину области пространственного заряда, который, "внедряясь" в проводящий канал, изменяет его форму и сечение, а значит, и сопротивление. При этом ток в цепи канала также меняется. Во втором случае управляющее напряжение

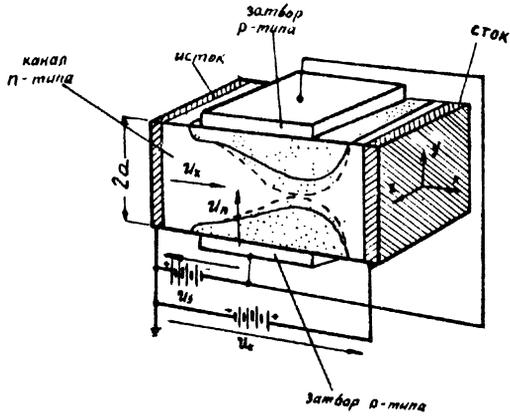


Рис.Ш.2. Схема полевого транзистора с модуляцией канала при помощи р-п-перехода

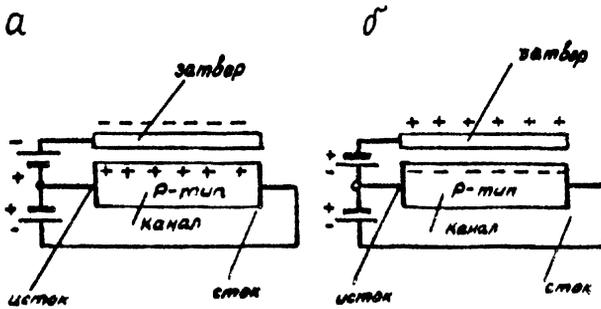


Рис.Ш.3. Схема полевого транзистора с изолированным затвором

приложено к "конденсатору", одной обкладкой которого служит металлическая пластина, а другой - полупроводник p - или n - типа. Если к такому конденсатору приложено напряжение от внешнего источника, то на его обкладках появляются избыточные заряды противоположных знаков. Появление избыточного (по сравнению с равновесным) заряда не может изменить заметно сопротивление металлической пластины, так как концентрация подвижных носителей заряда в металле достаточно велика. В полупроводнике, наоборот, концентрация подвижных носителей заряда сравнительно мала и появление избыточного заряда существенно изменяет проводимость канала. При этом возможны два режима работы канала: режим обогащения и режим истощения. В режиме обогащения (рис. 3.3,а) проводимость канала увеличивается за счет избыточного заряда. Для случая, показанного на рис. 3.3, носителями в канале являются дырки. При отрицательном потенциале на затворе в канале индуцируется положительный заряд. Это означает, что в него вводится дополнительное (к равновесному) количество дырок, увеличивающее проводимость. В режиме истощения, наоборот, проводимость канала уменьшается, так как при положительном потенциале на затворе (рис. 3.3,б) часть дырок вытесняется из канала и его проводимость уменьшается.

Таким образом, полевые транзисторы могут быть использованы в качестве усилителей и переключателей. Действительно, входная цепь полевого прибора замыкается через малую по величине емкость затвора и сопротивление канала. Она имеет большое по модулю полное сопротивление емкостного характера. Потери в этой цепи невелики. Глубокая модуляция сопротивления канала позволяет обеспечить значительные мощности переменного тока, а следовательно, и большое усиление по мощности. Возможность использования полевого прибора в переключательных схемах обеспечивается резким изменением сопротивления канала (в сотни и тысячи раз), в зависимости от напряжения на затворе.

В процессе выяснения принципа действия полевого прибора нам уже пришлось привлечь на помощь упрощенную модель физических явлений, которая опиралась на известные нам сведения о свойствах p - n -переходов, о проводимости полупроводников, о контактах между металлом и полупроводником и, наконец, об "эффекте поля" в структуре "металл-диэлектрик-полупроводник" (МДП).

Выясним, какие характеристики должен иметь полевой прибор.

Начнем с неизменных во времени процессов (статических характеристик) и рассмотрим вольт-амперную характеристику $I_c(U_c)$, т.е. зависимость тока от напряжения между истоком и стоком с напряжением между затвором и истоком в качестве параметра. Рассмотрим симметричный полевой прибор с двумя р-п-переходами (рис. 3.2). Вначале предположим, что внешнее напряжение на затворе равно нулю и, следовательно, ширина р-п-перехода определяется только равновесной разностью потенциалов. Если ток между истоком и стоком не протекает ($U_c=0$), то ширина р-п-переходов всюду одинакова, а канал эквипотенциален. Если ток I_c протекает в канале, потенциал в нем возрастает в направлении оси x . Внешнее напряжение на р-п-переходе (рис. 3.2) в точке x равно U_x и приложено к переходам в запорном направлении. Поэтому обедненные области р-п-переходов будут иметь форму, показанную на рис. 3.2 сплошной линией. По мере увеличения напряжения U_c канал будет сужаться, а его сопротивление - увеличиваться. Следовательно, крутизна вольт-амперной характеристики должна уменьшаться. Непрерывное увеличение напряжения U_c должно, по-видимому, привести к соприкосновению (смыканию) р-п-переходов (на рис. 3.2 показано пунктирными линиями). В соответствии с нашей моделью в канале имеются подвижные носители (электроны) и, следовательно, свободные заряды. В "обедненных" областях р-п-переходов свободных носителей нет, а имеются неподвижные ионы примеси, следовательно, неподвижные заряды. Если произойдет смыкание переходов, то картина протекания тока в канале должна существенно измениться. В канале появится участок, обедненный электронами и обладающий поэтому несравненно большим сопротивлением, чем остальная часть канала. Ток через этот участок должен протекать под действием "тянущего" поля стока, подобно тому как протекает коллекторный ток через обедненную область коллекторного р-п-перехода в диффузионно-дрейфовых транзисторах. Однако после смыкания р-п-переходов дальнейшее увеличение напряжения стока уже не должно заметно влиять на величину тока I_c , так как все добавочное напряжение будет поглощаться добавочным сопротивлением канала в месте смыкания. Перераспределение напряжений в канале приведет к тому, что форма канала, его сопротивление и ток I_c перестанут изменяться с изменением напряжения U_c . В характеристике $I_c(U_c)$ должен появиться пологий участок "насыщения" тока и, следовательно, она должна иметь "пентодный", а не "триодный" вид. К такому выводу мы пришли, приняв допущение о смыкании р-п-переходов.

Теперь предположим, что смыкания не происходит. По мере увеличения напряжения U_c узкая часть канала еще более сужается, а его сопротивление в этой части растет. Поскольку ток во всех сечениях канала одинаков (мы рассматриваем постоянный ток), на суженный участок приходится соответственно большая часть напряжения. Другими словами, и в этом случае имеет место перераспределение напряжений в канале, хотя и не в такой степени, как в случае смыкания. Теперь обратим внимание на то обстоятельство, что проводимость в разных точках канала $\sigma = qn\mu$ зависит от величины подвижности электронов, а подвижность зависит от величины напряженности поля. С увеличением E свыше $(1+2)$ кВ/см подвижность начинает быстро уменьшаться. Следовательно, проводимость также уменьшается, а сопротивление суженного участка растет не только за счет уменьшения сечения, но и за счет уменьшения подвижности. Можно предположить, что именно это обстоятельство является причиной такого перераспределения напряжений в канале, при котором форма канала перестает меняться и наступает "насыщение" тока.

Остается отметить, что напряжение на затворе U_3 увеличивает ширину р-п-переходов и участок "насыщения" наступает при меньших напряжениях U_c , чем при $U_3 = 0$.

В канале полевого транзистора выделяется мощность. Это происходит в основном в области с увеличенным сопротивлением вблизи стока. Под действием выделившегося тепла могут увеличиться обратные токи переходов из-за увеличения генерации электронно-дырочных пар. Кроме того, подвижность носителей заряда также зависит от температуры, а от величины подвижности зависит проводимость полупроводников. Следовательно, вопросы отвода тепла из канала также должны быть рассмотрены разработчиком прибора.

Далее, если к прибору приложен переменный во времени сигнал, его частотные и импульсные свойства будут зависеть от величины емкостей р-п-переходов, а также сопротивлений между рабочей частью канала и контактами (с истоком и стоком). Величина емкости обратнорасположенного р-п-перехода зависит, как известно, не только от напряжений, но и от распределения примесей в обедненной области.

Теперь рассмотрим - также "на уровне" гипотезы - модель полевого транзистора с изолированным затвором. Схематическое изображение упрощенной модели показано на рис. Ш.4. Канал п-типа соединен

омическими контактами с истоком и стоком. К затвору приложено напряжение U_3 , а к стоку U_c . Положительные направления напряжений показаны стрелками на рис. Ш.4. Напряжение на слое диэлектрика U_y в каждой точке вдоль оси X равно $U_y = U_3 - U_x$.

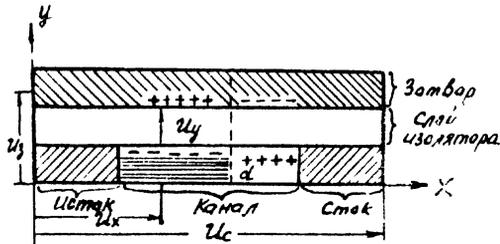


Рис.Ш.4. Упрощенная модель полевого транзистора с изолированным затвором

По каналу течет ток под действием напряжения U_c . Потенциал вдоль оси X меняется, а потенциал затвора всюду одинаков.

В точке d , где $U_x = U_3$, имеем $U_y = 0$. Слева от точки d (т.е. при $U_3 > U_x$) напряжение на диэлектрическом слое положительно. Это значит, что на затворе скапливаются положительные заряды, а в канале - отрицательные (направление стрелки указывает более высокий потенциал). Следовательно, часть канала левее точки d обогащается подвижными носителями - электронами (с концентрацией порядка $10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и ее проводимость велика. Справа от точки d (т.е. при $U_x > U_3$) на диэлектрике отрицательное напряжение. Это значит, что на затворе скапливаются отрицательные заряды, а в канале - положительные. При этом электроны вытесняются из правой части канала, она оказывается обедненной носителями, а ее сопротивление становится большим. Таким образом, мы приходим к следующей грубой модели: проводящая часть канала похожа на фиктивный (виртуальный) катод вакуумной лампы, а истоженная часть канала напоминает промежуток катод-анод той же лампы. Величина объемного заряда в обогащенной части канала управляется напряжением на затворе, подобно тому как объемный заряд фиктивного катода в вакуумной лампе управляется напряжением на сетке. Ток в сильной степени зависит от напряжения на управляющем электроде $I_c \sim U_3^2$ и слабо - от напряжения на стоке (так же как анодное напряжение в вакуумной лампе слабо влияет на анодный ток).

Во всех сечениях канала ток одинаков. В левой части $J = q n_1 \mu E_1$, а в правой $J = q n_2 \mu E_2$ или $n_1 E_1 = n_2 E_2$. Поле в правой части на два-три порядка больше, чем в левой (концентрации электронов во столько же раз меньше). Статические характеристики $I_c(U_c)$ с параметром U_3 могут иметь "пентодный" вид. Это можно объяснить, пользуясь упомянутой выше грубой аналогией с вакуумной лампой. Ток в канале $I = \rho \mu E_x$ зависит как от объемной плотности подвижных зарядов ρ , так и от напряженности поля вдоль оси канала E_x . Емкость между затвором и стоком много больше, чем между стоком и обогащенной частью канала. Приращение потенциала стока вызывает появление близких по величине и противоположных по знаку зарядов на стоке и затворе и только незначительная часть дополнительного заряда появится в канале. Таким образом, заряд затвора оказывает экранирующее действие, так что дополнительное поле в обогащенную область канала почти не проникает. Поэтому приращение тока в этой части канала в первом приближении определяется постоянным полем E_x и приращением объемного заряда ρ . Величина этого заряда управляется, в основном, потенциалом затвора, а не стока.

Помимо эффекта экранирования, насыщению тока может способствовать перераспределение напряжений в канале, в результате которого все добавочное напряжение приходится на обедненный участок.

До сих пор рассматривались явления в моделях с качественной стороны. Перейдем к количественным зависимостям для модели с р-п-переходом. Прежде всего необходимо получить статические вольт-амперные характеристики. Зависимость ширины р-п-перехода от напряжения на нем известна (см. ниже модель р-п-перехода). Например, для резкого р-п-перехода

$$d = \left(\frac{2 \epsilon_a U_n}{q N} \right)^{1/2}, \quad (\text{III.1})$$

где U_n - полное напряжение на р-п-переходе; N - концентрация примесей на слабо легированной стороне перехода. Эту формулу можно использовать при условии, что потенциал во всех точках канала одинаков. Такое условие выполняется с любой степенью точности на бесконечно малом участке канала длиной dx . Считая, что р-п-переход внедряется в канал на глубину d (затвор сильно легирован), можно найти напряжение смещения U_{no} из условия $d = a$:

$$U_{no} = \frac{q N a^2}{2 \epsilon_a}, \quad \text{откуда} \quad \frac{d}{a} = \left(\frac{U_n}{U_{no}} \right)^{1/2}. \quad (\text{III.2})$$

Сопротивление участка канала длиной dx , толщиной $2a-2d$ и единичной шириной выразится формулой

$$dR = \frac{dx}{2(a-d)\sigma} = \frac{dx(1 - \sqrt{U_n/U_{n0}})^{-1}}{2a\sigma}, \text{ где } \sigma = \mu q N. \quad (\text{Ш.3})$$

Как видно из рис. Ш.2, полное напряжение на переходе

$$U_n = U_3 + U_x, \quad (\text{Ш.4})$$

где U_x потенциал в точке канала x неизвестен, а напряжение на затворе U_3 известно.

Ток в канале I_c во времени не меняется, через емкость не ответвляется, и поэтому во всех точках канала одинаков. Приращение потенциала на участке dx по закону Ома

$$du_x = I_c dR. \quad (\text{Ш.5})$$

Подставляя значение dR из формулы (Ш.3) в формулу (Ш.5), получаем уравнение относительно U_x с разделяющимися переменными. Решая уравнение (Ш.5) с граничным условием $U_x(0) = 0$, полагая $x = l$ и $U_x(l) = U_c$, получим зависимость $I_c(U_c)$ в виде

$$I_c = \frac{2a\sigma}{l} \left[U_c + \frac{2}{3} \frac{U_3^{3/2} - (U_3 + U_c)^{3/2}}{U_{n0}^{1/2}} \right]. \quad (\text{Ш.6})$$

Далее можно найти дифференциальные параметры (для случая воздействия малого сигнала): крутизну характеристики $I_c(U_3)$ и сопротивление стока, т.е. величины

$$r_c = \frac{\partial U_c}{\partial I_c} \quad \text{и} \quad S = \frac{\partial I_c}{\partial U_3}.$$

Ток, соответствующий напряжению омыкания переходов U_{n0} , найдем, подставив в формулу (Ш.6) напряжение стока $U_{c0} = U_{n0} - U_3$:

$$I_{c0} = \frac{2a\sigma}{l} \left[\frac{1}{3} U_{n0} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{n0}}} \right) \right]. \quad (\text{Ш.7})$$

При выводе формул (Ш.6) и (Ш.7) предполагалось, что зависимость ширины р-п-перехода от напряжения на нем $d(U_n)$ нам известна. Эта зависимость легко определяется (см. раздел 4), если в области р-п-перехода потенциал можно получить из решения одномерного уравнения Пуассона, что справедливо при условии $l \gg d$. В нашем случае это условие может не выполняться и, кроме того, ширина перехода d не остается постоянной, а меняется вдоль оси

канала. Таким образом, формулу (Ш.1) можно использовать только для плавно изменяющегося канала, для которого приближенно выполняется условие $d(x) = \text{const}$.

Возможность применения полученных соотношений для режимов, близких к смыканию р-п-переходов, лучше всего установить экспериментальным путем.

Теперь предположим, что канал настолько плавный ($l \gg d$), что даже в месте наибольшего искривления р-п-перехода (рис. Ш.5) одномерность поля нарушается незначительно и, следовательно,



Рис.Ш.5. Плавно-меняющийся канал

формулу (Ш.6) можно приближенно считать справедливой. Тогда, построив кривые $\bar{I}_c(U_c)$ по формуле (Ш.6), убеждаемся в том, что пологий участок "насыщения" тока \bar{I}_c на них отсутствует.

При выводе формул (Ш.6) и (Ш.7) использовалось еще выражение (Ш.5). При постоянной подвижности в канале оно выполняется и, следовательно, применимость формул (Ш.6) и (Ш.7) не ограничивается другими условиями. Если эксперимент покажет наличие участка насыщения - значит его причиной является смыкание р-п-переходов.

Далее можно учесть влияние зависимости $\mu(E)$. При этом проводимость канала $G = qn\mu$ станет функцией напряженности $E_x = -\frac{dU_x}{dx}$ (для плавного изменения канала). Выкладки, аналогичные приведенным выше, дают возможность и в этом случае найти статические вольт-амперные характеристики. Соответствующие расчеты для случая, когда поле в канале не превышает "критической" величины $(10+20) \frac{кВ}{см}$, приведены в литературе. Модель в этом случае обладает рядом особенностей. Изменяется форма вольт-амперной характеристики, ее крутизна, величина тока, соответствующая напряжению смыкания р-п-переходов и др. Таким образом, эту зависимость необходимо учитывать в процессе проектирования прибора. Учет зависимости

$$\mu(E) = \mu_0 \left(\frac{E_k}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (Ш.8)$$

не приводит к появлению пологого участка насыщения в кривой $I_c(U_c)$. Следовательно, и в этом случае участок насыщения может быть объяснен только смыканием переходов.

Поскольку эффект смыкания необходимо учитывать, нужно уточнить и метод анализа модели. Для области смыкания величину напряженности электрического поля приходится искать из уравнений в частных производных, причем форма границ областей, вообще говоря, неизвестна. Приближенный анализ для этого случая показал, что модель с плавномыняющимся переходом может быть использована для грубой оценки параметров полевых приборов. Это позволило перейти к проектированию опытных образцов, т.е. выбрать такие варианты сочетаний параметров модели, которые не противоречили назначению прибора и возможностям технологии. Экспериментальное изучение опытных образцов показало удовлетворительное совпадение с расчетными данными на участке до насыщения, как в случае постоянной подвижности, так и в случае $\mu = \mu_0 (E_{\kappa}/E)^{1/2}$. Здесь уместно отметить, что в полевых приборах полупроводниковых интегральных схем симметрия относительно оси x отсутствует (рис. III.6), поэтому приближение плавного симметричного канала оказывается более грубым.

После экспериментальной проверки количественных зависимостей рассматриваемая модель перестала быть "гипотезой" и стала "теоретической моделью", поскольку она правильно (хотя и грубо) отображает существо происходящих явлений.

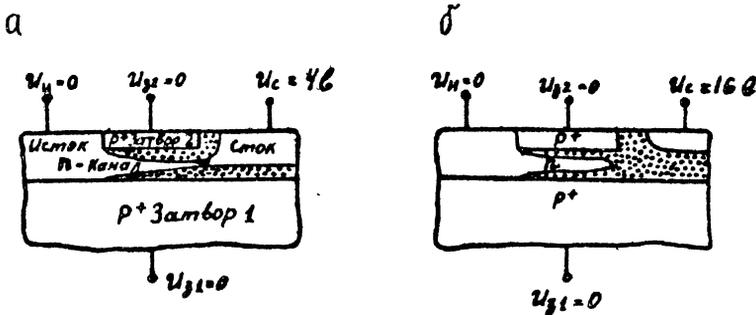


Рис. III.6. Схематическое изображение несимметричного полевого транзистора полупроводниковых интегральных схем:

а - $U_c = U_{п0}$; б - $U_c > U_{п0}$

Модель с плавным каналом не потеряла своего значения и в настоящее время, поэтому мы приводим ниже номограммы, построенные по формулам этой модели. Ясно, что использование этих номограмм в процессе проектирования позволит нам рассмотреть различные варианты все той же модели, а в экспериментальных образцах могут обнаружиться такие явления, которые не были учтены при теоретическом моделировании. В этом случае новые явления должны быть изучены, а модель усовершенствована.

В процессе проектирования полевых приборов с р-п-переходом были рассмотрены различные конфигурации (конструкции), причем расчеты велись на основе описанной выше модели плавного канала. Расчетные формулы для проводимости перекрытого полностью канала, тока в нем и напряжения перекрытия (смыкания) при $U_2=0$ приведены в табл. Ш.1.

На основе модели плавного перехода можно также оценить частотные и импульсные свойства прибора с р-п-переходом. В динамике нужно учитывать ответвление переменных токов через емкости р-п-переходов. Эквивалентной схемой в этом случае будет RC-линия (рис. Ш.7). На рис. Ш.8 показан элемент этой линии длиной dx .

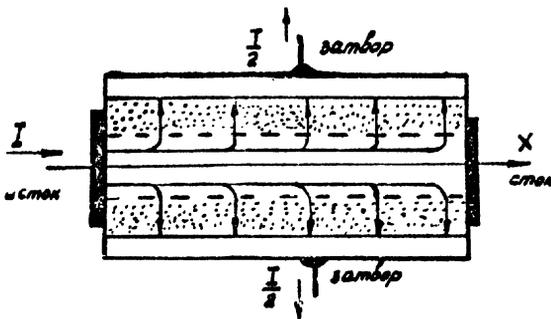


Рис. Ш.7. Ответвление тока через емкости р-п-переходов

Процессы в такой линии описываются нелинейной системой телеграфных уравнений, так как параметры линии — сопротивление и емкость — зависят от напряжения на переходе. Для выражения сопротивления имеем

формулу (Ш.3), где зависимость $d(u_n)$ определяется распределением примесей в р-п-переходе.

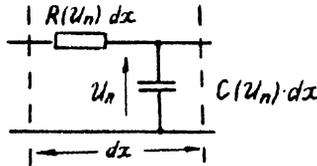


Рис.Ш.8. Элемент RC-линии

Приближенные оценки получим для плавного канала, вводя в рассмотрение средние по каналу величины емкости и сопротивления

$$\hat{C} = \frac{\epsilon_a l \cdot b}{d} ; \quad \hat{R} = \frac{l}{2\sigma b(a-d)} . \quad (\text{Ш.9})$$

Постоянная времени

$$\hat{R}\hat{C} = \frac{\epsilon_a l^2}{2\sigma d(a-d)} ,$$

симметричного прибора с двумя р-п-переходами

$$2\hat{R}\hat{C} = \frac{\epsilon_a l^2}{\sigma d(a-d)} . \quad (\text{Ш.10})$$

Частотные свойства оцениваются предельной частотой

$$f = \frac{1}{2\pi RC} . \quad (\text{Ш.11})$$

В приведенной ниже номограмме предельная частота рассчитана для клинообразного канала, полностью открытого у истока и полностью закрытого у стока. Емкость определялась по формуле

$$C \cong \frac{4\epsilon_a l b}{a} ,$$

так как средняя ширина обедненной области р-п-перехода $a/2$, и таких областей две. Эта емкость заряжается через среднее сопротивление канала

$$R = \frac{l b}{2a\sigma} .$$

Тогда для предельной частоты имеем

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{a^2 \sigma}{2l^2 \epsilon \epsilon_0} \right) . \quad (\text{Ш.12})$$

Формулы для расчета полевых приборов различных конфигураций

Распределение примесей	Геометрия транзистора	Проводимость	Напряжение перекрестия $\psi_{пер}$	Ток при перекрестии канала $I_{пер}$
Ступенчатый p-n-переход	Прямоугольный канал, два перехода, толщина канала $2a_k$	$2q_m N_D a_k \frac{b}{L}$	$\frac{q N_D a_k^2}{2\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{2q^2 m N_D^2 a_k^3 b}{3\epsilon\epsilon_0 L}$
То же	Прямоугольный канал, один переход, толщина канала a_k	$q_m N_D a_k \frac{b}{L}$	$\frac{q N_D a_k^2}{2\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{2q^2 m N_D^2 a_k^3 b}{6\epsilon\epsilon_0 L}$
То же	Кольцевой канал, радиус истока r_c , радиус стока r_s , два перехода, толщина канала $2a_k$	$\frac{4q_m N_D a_k}{\ln(r_s/r_c)}$	$\frac{q N_D a_k^2}{2\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{2q^2 m N_D^2 a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0 \ln(r_s/r_c)}$
То же	Кольцевой канал, радиус истока r_c , радиус стока r_s , один переход, толщина канала a_k	$\frac{2q_m N_D a_k}{\ln(r_s/r_c)}$	$\frac{q N_D a_k^2}{2\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{\pi q^2 m N_D^2 a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0 \ln(r_s/r_c)}$
То же	Нитридный канал, радиус r_c , длина L	$\frac{\pi 2q_m N_D}{L}$	$\frac{q N_D r_c^2}{4\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{\pi q^2 m N_D^2 r_c^4}{16\epsilon\epsilon_0 L}$
Симметричный ступенчатый переход	Прямоугольный канал, два перехода, толщина канала $2a_k$	$2q_m N_D a_k \frac{b}{L}$	$\frac{q N_D a_k^2}{\sqrt{2}\epsilon\epsilon_0}$	—
То же	Прямоугольный канал, один переход, толщина канала a_k	$2q_m N_D a_k \frac{b}{L}$	$\frac{q N_D a_k^2}{\sqrt{2}\epsilon\epsilon_0}$	—
Переход с линейно изменяющейся распределением примесей	Прямоугольный канал, один переход, толщина канала a_k , градиент концентрации примесей α	$\frac{q m \alpha a_k^2 b}{2L}$	$\frac{2q \alpha a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{2q^2 m \alpha^2 a_k^5 b}{15\epsilon\epsilon_0 L}$
Переход с линейно изменяющейся концентрацией примесей	Кольцевой канал, один переход, толщина канала a_k , градиент концентрации примесей α	$\frac{5q_m \alpha a_k^2}{\ln(r_s/r_c)}$	$\frac{2q \alpha a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{4q^2 m \alpha^2 a_k^5}{15\epsilon\epsilon_0 \ln(r_s/r_c)}$
Переход с изменением концентрации примесей по параболическому закону	Прямоугольный канал, два перехода, толщина канала $2a_k$, максимальная действующая концентрация донорной примеси в канале N_m	—	$\frac{3q N_m a_k^2}{4\epsilon\epsilon_0}$	—

На рис. Ш.9 приведена номограмма для определения напряжения смыкания переходов в зависимости от удельного сопротивления канала и его толщины. Если провести прямую между величиной N на левой шкале и величиной Q на правой шкале, то эта прямая пересечет центральные шкалы в точках U_{no} и E , где U_{no} - напряжение смыкания переходов, а E - максимальная величина напряженности электрического поля в р-р-переходе, которая не должна достигать $100+200$ кв/см (Зинеровский пробой).

На рис. Ш.10 приведена номограмма, дающая связь между величинами, с которыми приходится иметь дело в процессе проектирования. Сюда входят: отношение ширины к длине канала $\frac{a}{l}$; σ - проводимость материала канала; R_0 - сопротивление канала на единицу ширины ($\beta=1$) при $U_z=0$; $U_c=0$; предельная частота f и C соответствующее значение средней емкости для клинообразного канала. Прямая, проведенная через номограмму, пересечет различные шкалы в точках, дающих все взаимосвязанные величины. Например:

$$N = 10^{14} \text{ см}^{-3}; \quad \sigma = 0,059 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}; \quad a = 30 \text{ мкм}; \quad U_{no} = 50 \text{ в};$$
$$\frac{a}{l} = 0,2; \quad S_{mo} = \frac{1}{R_0} = 24 \frac{\text{ма}}{\text{в} \cdot \text{см}}; \quad f = 140 \text{ Мгц}.$$

Из изучения номограмм становится ясно, что выбор материала и размеров не вполне произволен. Например, желательно иметь достаточно низкое напряжение смыкания, для того чтобы: а) уменьшить токи в канале и избежать перегрева за счет выделения тепла; б) избежать больших величин напряженности поля, что приводит к уменьшению подвижности и ухудшает характеристики прибора. Для этого нужно иметь малые линейные размеры (a) и малые концентрации примеси в канале (N). Однако это, в свою очередь, приведет к малым значениям предельной частоты и крутизны. Поэтому разработчики часто принимают решение выбрать настолько малые линейные размеры a и a/l , насколько позволяет конструкция или технология, а затем выбирается такое значение N , при котором напряжение смыкания U_{no} по возможности удовлетворяет поставленным требованиям. Здесь мы имеем типичный пример проектирования, при котором выбирается вариант, удовлетворяющий заранее сформулированным требованиям. Это проектирование стало возможным благодаря расчетным формулам, полученным путем теоретического моделирования. Несмотря на то, что была ис-

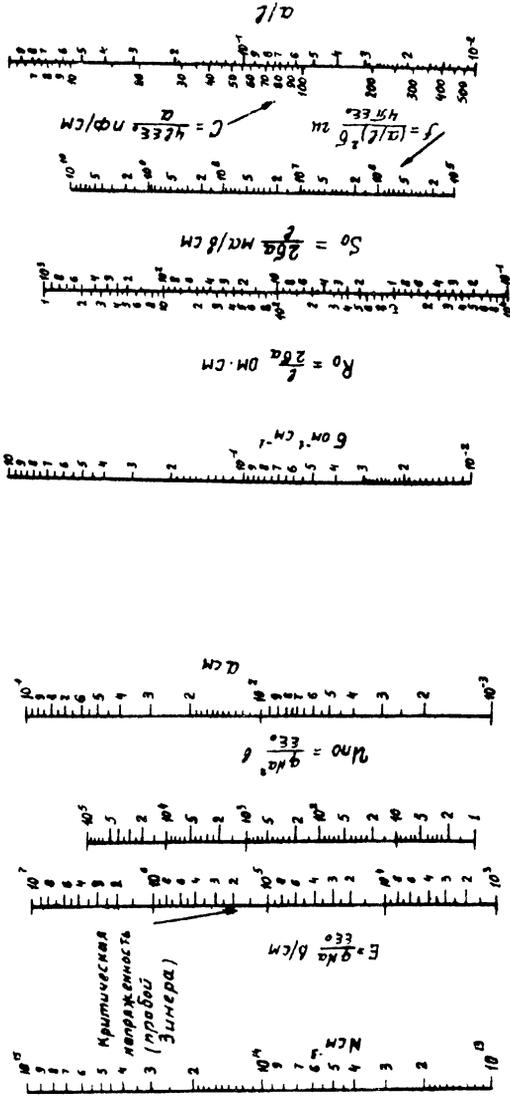


Рис. 3.9. Номограмма для определения напряжения смещения переходов

Рис. 3.10. Номограмма, используемая для проектирования транзистора

пользована грубая теоретическая модель, расчетные формулы дают ценную информацию разработчикам приборов.

Продолжим изучение модели, пользуясь номограммами и табл.Ш.І.

Для большинства приведенных в таблице вариантов крутизна зависит от отношения \bar{v}/ℓ . Поэтому целесообразно выбирать его большим. Обычно берут $\bar{v}/\ell = 5+100$. При этом нужно следить за тем, чтобы сопутствующее увеличение тока I_c не вызвало перегрева прибора. Если увеличение \bar{v}/ℓ достигается за счет уменьшения ℓ , то при этом увеличивается еще и частотный предел, но при этом нужно помнить о том, что "плавность" канала (условие $d \ll \ell$) может нарушиться и применимость формул окажется под сомнением. От величины \bar{v} частотный предел не зависит. Увеличение крутизны можно достичь за счет μ , поэтому предпочтительнее канал p -типа (подвижность электронов больше подвижности дырок). Из таблицы следует, что ток I_c в сильной мере зависит от толщины канала d . Разброс величины d в процессе изготовления может привести к недопустимому отклонению тока в канале. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе технологии. Наоборот, при заданной технологии, как в случае интегральных схем, нужно осмотрительно выбирать размер d .

Поскольку частотный предел зависит от емкостей переходов, нужно их по-возможности уменьшать. Этого можно достичь уменьшением площади p - n -переходов или увеличением ширины d .

При использовании p^+ - n -переходов область объемного заряда распространяется в канал. Если он выбран высокоомным, это одновременно увеличивает глубину модуляции сопротивления канала и уменьшает емкость. Если нужно еще более снизить емкости, можно пойти по пути снижения примеси в затворе, хотя при этом и уменьшится глубина модуляции канала.

В полупроводниковых интегральных схемах большое значение имеют условия отвода тепла, поэтому температурные зависимости должны учитываться особенно тщательно. В этом смысле важна температурная зависимость тока стока I_c . В режиме замыкания он в слабой степени зависит от температуры при малых напряжениях отсечки. Поэтому в интегральных схемах желательно выбирать малое $U_{п0}$, но при этом нельзя пренебрегать контактной разностью

потенциалов р-р-перехода. Далее, ток I_c зависит от подвижности, а она уменьшается с увеличением температуры (в определенном диапазоне температур). Поэтому температурный коэффициент тока стока может быть отрицательным. Контактная разность потенциалов также зависит от температуры. Это тоже может иметь значение при выборе малых напряжений смыкания.

Приведенных примеров, по-видимому, достаточно для того, чтобы сделать вывод о роли и значении теоретического моделирования в процессе проектирования. Во многих случаях, при разработке устройств с использованием новых принципов и явлений, теоретическое моделирование может оказаться единственным средством и базой для получения расчетных формул, необходимых для целенаправленного проектирования опытных образцов. После того как получены соответствующие образцы, большую роль играет экспериментальное изучение разрабатываемых приборов.

4. Теоретическая модель биполярного транзистора

Прежде всего остановимся на некоторых физических явлениях, важных для понимания особенностей биполярных транзисторов.

Токи в этих транзисторах протекают в результате диффузии электронов и дырок, а также их "дрейфа", т.е. движения под действием электрического поля. В процессе диффузии носители заряда движутся от точек пространства с большей концентрацией к точкам пространства с меньшей концентрацией. Величина плотности диффузионного тока зависит от градиента концентрации. Дрейфовый ток зависит от объемной плотности свободных зарядов и дрейфовой скорости

$$V_E = \mu E,$$

где μ - подвижность носителей;

E - напряженность электрического поля.

В полупроводниковых структурах с диффузионно-дрейфовым механизмом переноса зарядов важную роль играет внутреннее поле. Оно образуется следующим образом. В полупроводнике, легированном примесями, при комнатной температуре все атомы примесей можно считать ионизированными. Ионы акцепторных и донорных примесей

неподвижны, а электроны и дырки могут перемещаться в процессе диффузии и под действием электрического поля. Если концентрация примесей не изменяется от точки к точке, объем остается электрически нейтральным. Однако при наличии градиента концентрации примесей такой же градиент должны были бы, в силу нейтральности, иметь и подвижные носители. Но в этом случае должны появиться диффузионные потоки, которые приведут к смещению подвижных зарядов, нарушению нейтральности и появлению электрического поля. Это поле препятствует смещению зарядов и "стремится" восстановить нейтральность. Взаимодействие двух факторов - диффузии и кулоновского притяжения - приводит к равновесию, при котором смещенные в пространстве положительные и отрицательные заряды образуют внутреннее поле (внутренним оно названо потому, что возникло независимо от действия внешних источников). На рис. III.II показано распределение примесей в транзисторной структуре, полученной путем диффузии примесей. Слева от точки a (эмиттер) и справа от точки b (коллектор) расположены области полупроводника p -типа, а между точками a и b (база) полупроводник n -типа. В результате диффузии дырки переместились из эмиттера и коллектора в базу, "обнажив" отрицательные заряды неподвижных ионов акцепторной примеси. Электроны переместились в эмиттер и коллектор, "обнажив" положительные заряды неподвижных ионов донорной примеси. В результате образовалось внутреннее поле, показанное на рис. III.II. Это поле перемещает дырки из базы в эмиттер и коллектор, а электроны, наоборот, - из этих областей в базу. В равновесии ток через p - n -переходы не протекает. Если теперь к эмиттерному p - n -переходу приложить внешнее напряжение такой полярности, чтобы возникшее при этом электрическое поле было направлено навстречу E_1 , то результирующее поле окажется меньше E_1 , что вызовет дополнительный поток диффузии дырок из эмиттера в базу. Если убрать внешнее напряжение, снова восстановится равновесное состояние и величина напряженности поля E_1 . Справа от точки b инжектированные в базу дырки будут "подхватываться" полем E_2 , которое пронесет их через коллекторный p - n -переход. Обычно к коллекторному переходу приложено напряжение внешнего источника такой полярности, что образованное им поле

совпадает по направлению с E_2 и поэтому усиливает его действие.

Таким образом, при помощи источника в цепи эмиттера можно управлять током в цепи коллектора.

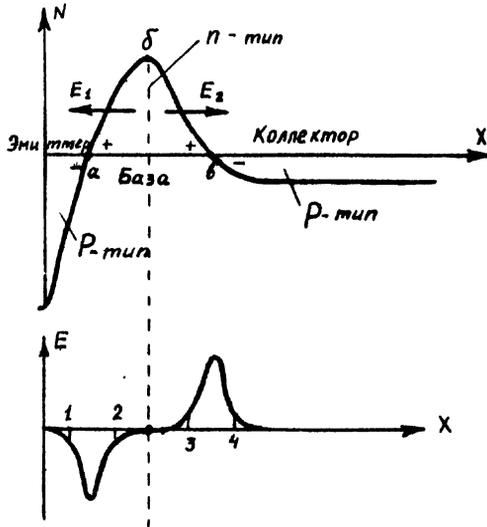


Рис. III. II. Распределение примесей и электрическое поле в транзисторной структуре

Как видно из рис. III. II, всю структуру можно условно разделить на области сильного и слабого поля. Сильное поле является результатом значительного обеднения области подвижными носителями, следовательно, их концентрация в области сильного поля должна быть мала. Слабое поле возникает в результате незначительного обеднения области подвижными носителями, следовательно, их концентрация должна незначительно отличаться от концентрации неподвижных ионов примеси. Поэтому области слабого поля являются почти (квази) нейтральными. Области сильного поля обычно называют обедненными (или истощенными).

На рис. III. I2 показано распределение концентрации примесей, электронов и дырок в обедненной области коллекторного перехода р-р-р-транзистора, полученного методом диффузии примесей. К р-р-

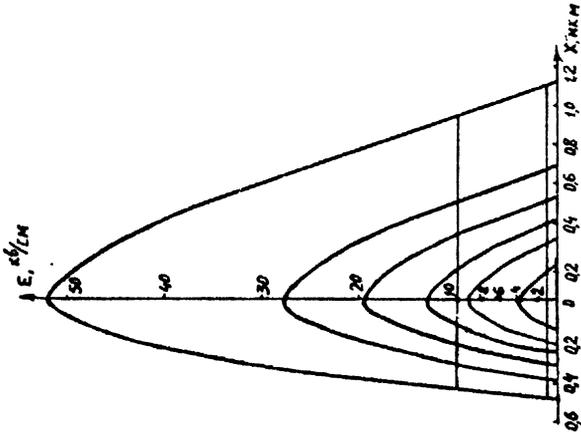


Рис. Ш.13. Электрическое поле в р-п-переходе при обратном напряжении

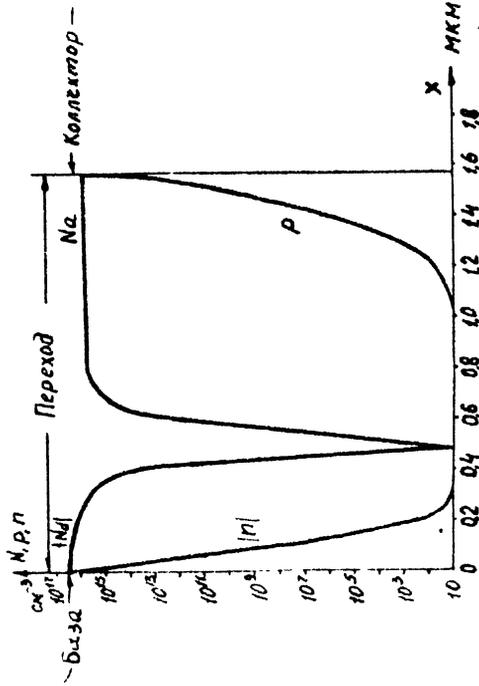


Рис. Ш.12. График распределения подвижных и неподвижных зарядов в обратном-смещенном р-п-переходе

переходу приложено внешнее обратное напряжение $U_k=5$ в. На рис. Ш.13 показано электрическое поле в обедненной области коллекторного р-п-перехода при различных величинах внешнего напряжения. Видно, что напряженность поля достигает десятков киловольт на сантиметр. Из рис. Ш.12 видно, что в области сильного поля концентрации электронов и дырок меняются очень сильно. Например, изменение в 100 раз наблюдается на расстояниях в сотне доли микрона.

В прямо смещенном эмиттерном переходе изменение оказывается также очень резким. Это обстоятельство является основанием для следующего важного допущения, которое существенно упрощает рассматриваемую модель. При расчетах ширины обедненной области принято считать, что в ней имеются только ионы примесей, а концентрации электронов и дырок равны нулю.

В квазинейтральных областях будем считать распределение подвижных и неподвижных зарядов одинаковым

$$\begin{aligned} N(x) &\cong p(x) - n(x), \\ \text{где} \quad N(x) &= N_d(x) - N_a(x) \end{aligned} \quad (\text{Ш.13})$$

есть избыточная концентрация примесей. Это означает, что хотя электрическое поле не равно нулю и объемный заряд в каждой точке также не равен нулю, но разница в концентрациях примесей $N(x)$ и подвижных носителей заряда $p(x) - n(x)$ настолько мала, что в первом приближении их можно считать одинаковыми.

В дальнейшем мы будем пользоваться именно такой упрощенной моделью.

Рассмотрим область полупроводника (например, базу) п-типа с неизменной во всех точках концентрацией примеси N . Такая область является электронейтральной. Инжектируем дырки из эмиттера. При этом появится градиент концентрации дырок и, в силу нейтральности, такой же градиент должны иметь электроны. В направлении градиента возникают потоки дырок и электронов. Если бы коэффициенты диффузии электронов и дырок были одинаковыми, объем остался бы нейтральным. Но из-за различия в величинах D_p и D_n электроны и дырки смещаются в пространстве, нейтральность нарушается и появляется электрическое поле. В отличие от "равновесного" внутреннего поля, рассмотренного выше, это поле возникло за счет инжекции избыточных (сверхравновесных) носителей в нейтраль-

ную область n , следовательно, связано с воздействием внешних источников. Тем не менее и это поле можно назвать внутренним. Благодаря малой величине сопротивления нейтральных (или квазинейтральных) областей и большому сопротивлению обедненных областей можно считать, что все внешнее напряжение приложено к обедненной области. Действие этого напряжения вызвало диффузию, а рассматриваемое поле возникло в другой, нейтральной, области. Для нее поле является внутренним. Появление неравновесных электронов и дырок можно вызвать не только инжекцией, но и другими причинами, например, светом. И в этом случае возникнет электрическое поле, не связанное с внешними источниками напряжения или тока.

Теперь рассмотрим обратно смещенный p-n-переход. В соответствии с принятым допущением в обедненной области p-n-перехода нет подвижных зарядов. При изменении напряжения начнут перемещаться подвижные заряды прилегающих к нему квазинейтральных областей. Если, например, запирающее напряжение увеличилось, обедненная область расширится за счет обеднения добавочных участков квазинейтральных областей. Изменение ширины обедненной области сопровождается изменением объемного заряда. Приращение напряжения ΔU сопровождается приращением заряда ΔQ . На выводах источника напряжения обедненная область p-n-перехода ведет себя как дифференциальная емкость, величина которой $C = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$.

Такая емкость обычно называется "зарядной". Название подчеркивает то обстоятельство, что емкость связана с изменением некомпенсированного объемного заряда неподвижных ионов примесей. Термин является неудачным, так как понятие дифференциальной емкости всегда связано с изменением заряда.

Интересно отметить, что дифференциальная емкость обедненной области выражается формулой плоского конденсатора - независимо от закона распределения примесей и электрического поля в этой области. В этом можно убедиться, сравнив обедненную область шириной d с конденсатором, у которого расстояние между пластинами также равно d . В обоих случаях под действием напряжения ΔU появляется два слоя разноименных зарядов $\pm \Delta Q$, находящихся на расстоянии d . Толщина такого добавочного слоя в обедненной области бесконечно мала, поэтому можно считать, что заряды, как и в металлических пластинах, распределены по поверхности

$$C = \epsilon_a \frac{S}{d}. \quad (\text{Ш.14})$$

Теперь рассмотрим структуру (рис. III.14), в которой имеются три омических (невыпрямляющих) контакта: в области эмиттера, коллектора и базы. Эмиттерный переход смещен в прямом (пропускном) направлении за счет внешнего напряжения U_e , а коллекторный - в обратном (запорном) за счет напряжения U_k . Пусть напряжение U_e увеличилось. Это вызывает дополнительную инжекцию дырок в квазинейтральную базу, в которой появляются избыточные положительные заряды. Поле этих зарядов немедленно воздействует на электроны (в квазинейтральной базе их много), которые, притягиваясь к дыркам, компенсируют избыточный заряд. Таким образом, приращение напряжения на р-п-переходе приводит к накоплению зарядов разных знаков в квазинейтральной области. Из-за явления рекомбинации число электронно-дырочных пар будет уменьшаться. Если убрать добавочное напряжение еще до того, как накопленный заряд исчезнет за счет рекомбинации, то возникнет обратный процесс. Накопление заряда, возникшее под действием внешнего напряжения, можно рассматривать как заряд емкости, а обратный процесс - как ее разряд. Эта емкость отличается от емкости конденсатора, в котором разноименные заряды расположены на пластинах и могут исчезнуть только в результате разряда конденсатора. В данном случае разноименные заряды расположены в объеме полупроводника и могут исчезнуть не только в результате "разряда", но и за счет рекомбинации.

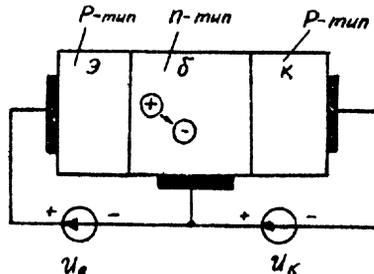


Рис. III.14. Схематическое изображение р-п-р-транзистора

С точки зрения наблюдателя, расположенного на внешних выводах источника напряжения, все происходит так, как и в случае конденсатора. Приращение напряжения ΔU вызывает изменение заряда ΔQ , величина дифференциальной емкости составляет $C = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$.

Емкость, возникающая за счет накопления неосновных носителей в квазинейтральных областях, обычно называется диффузионной.

Это название возникло в то время, когда транзисторы изготовлялись методом сплавления р-п-переходов в базу с неизменной концентрацией примесей. В таких транзисторах накопление зарядов в базе происходило в результате диффузии.

Для транзисторов с диффузионно-дрейфовым механизмом переноса носителей заряда в базе этот термин является неудачным.

Перейдем к формулировке математической модели диффузионно-дрейфовой структуры, содержащей р-п-переходы.

Предполагается, что движение электронов и дырок описывается при помощи уравнений макроэлектродинамики (уравнений Максвелла). Магнитные эффекты не рассматриваются. При этом уравнения Максвелла записываются следующим образом:

$$\operatorname{rot} E = 0 ; \quad E = -\operatorname{grad} \Psi ; \quad (\text{Ш.15})$$

$$\epsilon_0 \operatorname{div} E = \rho . \quad (\text{Ш.16})$$

Из уравнений (Ш.15) и (Ш.16) видно, что электрическое поле является потенциальным (Ψ - электрический потенциал) и оно может создаваться (помимо внешних источников) объемными зарядами с плотностью ρ . Из уравнений Максвелла можно получить уравнение непрерывности, выражающее закон сохранения заряда. (Можно, наоборот, считать независимым уравнение непрерывности, тогда одно из уравнений Максвелла окажется зависящим от остальных)

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} J . \quad (\text{Ш.17})$$

Эти основные уравнения для полупроводниковых структур уточняются следующим образом.

1. Учитываются, что объемный заряд в уравнении (Ш.16) создается за счет подвижных носителей (дырок и электронов) и неподвижных (ионизированные атомы примесей), тогда

$$\rho = q(p - n + N_d - N_a) , \quad (\text{Ш.18})$$

где p и n - концентрация дырок и электронов;

N_d, N_a - концентрация донорных и акцепторных примесей;

q - заряд электрона.

2. Закон сохранения заряда (Ш.17) уточняется в том смысле, что в объеме возможна генерация и рекомбинация носителей заряда

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} J + \frac{p - p_0}{\tau} - g , \quad (\text{Ш.19})$$

где p_0 - объемная плотность зарядов (электронов или дырок) в состоянии термодинамического равновесия;

τ - время жизни носителей; g - скорость генерации носителей.

Таким образом, ток, вытекающий в объем, не равен току, вытекающему из него ($\text{div } \mathcal{J} \neq 0$), из-за изменения объемного заряда ($\frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0$), а также за счет рекомбинации и генерации в этом объеме.

3. Предполагается, что электроны и дырки движутся независимо друг от друга; общий ток является суммой электронного и дырочного токов и каждый из них протекает за счет диффузии носителей и их дрейфа, т.е. движения под действием электрического поля E . Еще одно допущение состоит в том, что диффузионный ток пропорционален градиенту концентрации носителей, а дрейфовый (полевой) можно представить в виде произведения объемной плотности заряда на дрейфовую скорость

$$\mathcal{J} = \rho V_E \pm \mathcal{D} \text{grad } \rho, \quad (\text{Ш.20})$$

где \mathcal{J} - плотность тока;

V_E - дрейфовая скорость;

\mathcal{D} - коэффициент диффузии.

4. Уравнения (Ш.19) и (Ш.20) записываются отдельно для электронов и дырок. Вместе с уравнением (Ш.16) имеем пять уравнений. В одномерном случае они имеют следующий вид:

$$\mathcal{J}_p = q \rho \mu_p E - \mathcal{D}_p q \frac{d\rho}{dx}; \quad (\text{Ш.21})$$

$$\mathcal{J}_n = q n \mu_n E + \mathcal{D}_n q \frac{dn}{dx}; \quad (\text{Ш.22})$$

$$q \frac{\partial \rho}{\partial t} = -q \frac{(\rho - \rho_0)}{\tau_p} - \frac{\partial \mathcal{J}_p}{\partial x}; \quad (\text{Ш.23})$$

$$q \frac{\partial n}{\partial t} = -q \frac{(n - n_0)}{\tau_n} + \frac{\partial \mathcal{J}_n}{\partial x}; \quad (\text{Ш.24})$$

$$\epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial x} = q(\rho - n + N_d - N_a). \quad (\text{Ш.25})$$

Эти уравнения служат математической моделью для анализа явлений в диффузионно-дрейфовых диодах, транзисторах и других активных элементах.

Знаки в уравнениях (Ш.21+Ш.25) расставлены на основании следующих рассуждений. Диффузионные потоки электронов и дырок направлены в сторону убывания концентрации. Будем считать это направление положительным. Производные $\frac{d\rho}{dx}$ и $\frac{dn}{dx}$ оказываются отрицательными величинами. Чтобы поток ($\mathcal{D}_p d\rho/dx$ или $\mathcal{D}_n dn/dx$) был положительным, нужно перед производной поставить знак минус.

Переходя к выражениям для токов, учитываем, что заряд электрона отрицателен. Дрейфовые токи $q\rho\mu_p E$ и $qn\mu_n E$ имеют

Одинаковые направления, так как движение положительного заряда в одном направлении и отрицательного заряда в противоположном дают ток одного и того же направления.

Уравнение непрерывности записывается одинаково для электронных и дырочных потоков (в этом случае оно выражает условие сохранения числа электронов и дырок). Переходя к записи выражений для токов, учитываем различный знак заряда электронов и дырок. Поэтому члены $\frac{\partial J_p}{\partial x}$ и $\frac{\partial J_n}{\partial x}$ оказываются с различными знаками.

Путем исключения переменных система уравнений (Ш.21+Ш.25) может быть приведена к двум нелинейным уравнениям - одно для электронов, другое для дырок. Для упрощения анализа и вывода расчетных формул модель также упрощается.

Наиболее распространенный способ упрощения состоит в следующем. Диффузионно-дрейфовая структура делится на а) квазинейтральные и б) обедненные области.

К первой относятся области эмиттера, базы, коллектора (для транзисторов). Ко второй - области, прилегающие к "металлургическому" р-п-переходу (плоскость, в которой концентрация избыточной примеси $N_d - N_a$ меняет свой знак).

В любой области может существовать внутреннее поле, возникающее, как было описано выше, при термодинамическом равновесии, без внешних источников, за счет взаимодействия двух факторов: диффузия увлекает подвижные носители зарядов в места с меньшей концентрацией, а кулоновское взаимодействие между подвижными зарядами и неподвижными ионизированными примесями стремится их удержать. Между смещенными в пространстве разноименными зарядами существует внутреннее электрическое поле.

На это внутреннее (равновесное) поле накладывается внешнее поле, создаваемое внешними источниками.

Квазинейтральность областей означает, что хотя в них и существует объемный заряд, являющийся источником поля, т.е.

$$p - n + N_d - N_a \neq 0, \quad (\text{Ш.26})$$

но при величинах поля, реально существующих в этих областях, суммарный объемный заряд близок к нулю. Поэтому функция $N(x) = N_d - N_a$, определенная из условия (Ш.26)

$$n(x) = p(x) + N(x), \quad (\text{Н.27})$$

является хорошим приближением к действительному распределению концентрации электронов. Функция распределения избыточной примеси $N(x)$ нам известна.

При малых уровнях инжекции (т.е. при малых плотностях тока) для p -области пренебрегаем величиной $p(x)$, считая, что $n(x) \approx N(x)$, для n -области, наоборот, пренебрегаем величиной $n(x)$, считая, что $p(x) \approx -N(x)$.

При допущении о квазинейтральности области поле E нельзя определять из уравнения Пуассона. Поэтому оно определяется из условия равновесия основных носителей. Дело в том, что сильное поле обратно-смещенного коллекторного перехода отталкивает основные носители в базу (соответственно ток равен нулю). В нашем случае p - n - p -транзистора ток за счет электронов базы через коллекторный переход не протекает. Но электронный ток может протекать через эмиттерный переход, смещенный в прямом направлении. Электронный ток в цепи эмиттера является бесполезным "балластом", поскольку только дырки протекают через коллектор и, следовательно, управление коллекторной цепью достигается именно дырочным током. Следовательно, в хорошо спроектированном p - n - p -транзисторе электронный ток через эмиттерный переход должен быть близок к нулю. Это достигается тем, что концентрация дырок в эмиттере много больше концентрации электронов в базе. Следовательно, одно и то же прямое напряжение на переходе вызывает большой поток дырок и ничтожный - электронов.

Коэффициент инжекции эмиттера

$$\gamma_e = \frac{I_p}{I_p + I_n} \approx 1. \quad (III.28)$$

Полагая электронный ток равным нулю ($I_n = 0$), решаем уравнение (III.22) относительно V_{en} . Дрейфовая скорость является известной функцией поля (рис. III.15). В слабых полях квазинейтральных областей она прямо пропорциональна величине напряженности поля E

$$V_{en} = \mu E.$$

Таким образом, находят поле E как функцию концентрации электронов $n(x)$, которая уже известна из уравнения (III.27).

Зная поле, находим дрейфовую скорость дырок $\mu_p E$. Теперь система уравнений (Ш.21+Ш.25) оказывается линейной и может быть решена (последнее уравнение исключено).

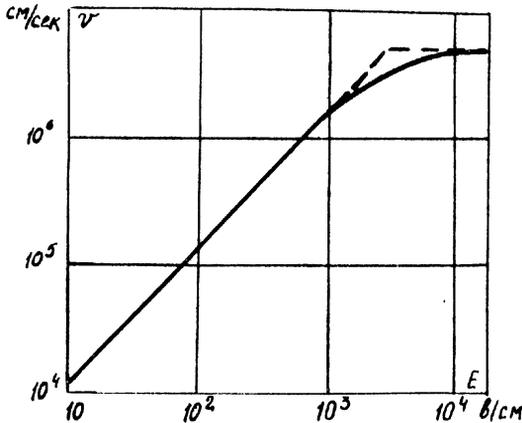


Рис.Ш.15. Зависимость дрейфовой скорости от напряженности поля

Обедненные подвижными носителями области р-п-переходов имеют большое сопротивление. Поэтому внешние напряжения в основном приходятся именно на эти области. При "прямом смещении" внешнее поле ослабляет внутреннее, равновесное поле, что приводит к появлению токов за счет диффузии. При "обратном смещении" внешнее поле усиливает внутреннее, так что область еще более "обедняется", подвижные носители "изгоняются" полностью из этой области. Поэтому для обратно-смещенных областей принимается следующее допущение:

$$\rho \approx q N(x),$$

т.е. считается, что весь объемный заряд создается ионизированными атомами избыточной примеси, концентрация которой $N(x)$ известна. Теперь поле E можно найти прямым интегрированием уравнения (Ш.25).

Поскольку поле известно, можно найти распределение потенциала. Таким образом, удастся связать напряжение, приложенное к обедненной области, с ее шириной и емкостью р-п-перехода.

Экспериментальная проверка (измерением емкостей р-п-переходов в зависимости от величины внешнего напряжения) обычно подтверждает результаты расчетов этой модели.

Для прямо-смещенных р-п-переходов такой метод можно было бы применить в качестве грубого приближения, однако экспериментальная проверка затруднена из-за того, что измеряется одновременно зарядная и диффузионная емкости.

Обычно для прямо-смещенных р-п-переходов используется следующий путь упрощений. Поскольку к ним прилагаются извне незначительные напряжения, предполагается, что внешние поля много меньше внутренних, и отклонением от равновесия можно пренебречь. Это нужно понимать следующим образом: в термодинамическом равновесии диффузионная и полевая составляющие тока равны по величине, а их сумма равна нулю. Под действием внешнего напряжения это равенство нарушается, появляется разность токов, но эта разность остается много меньше каждого из слагаемых, так что приближенно считают их равными ($J_{диф} \cong J_{дрейф}$). Полагая $J_p = 0$, $J_n = 0$, решают уравнения (Ш.21) и (Ш.22) и находят, что концентрации электронов (и дырок) по обе стороны р-п-перехода по экспоненте зависят от приложенного к нему напряжения, т.е.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = e^{-\lambda U_n}, \quad (Ш.29)$$

где $U_n = -U + U_k$ - полное напряжение на переходе, равное алгебраической сумме внешнего напряжения U и контактного U_k , $\lambda = \frac{q}{kT}$.

Подставляя U_n в уравнение (Ш.29), получим

$$\rho_2 = \rho_1 e^{-\lambda U_k} \cdot e^{+\lambda U} = \rho_{10} e^{+\lambda U}, \quad (Ш.30)$$

где ρ_{10} - объемная плотность заряда в термодинамическом равновесии, т.е. при $U = 0$.

Для избыточной плотности находим

$$\rho_\Delta = \rho_{10} (e^{\lambda U} - 1). \quad (Ш.31)$$

Таким образом, допущение об отсутствии тока через р-р-переход дает возможность определить соотношение концентраций электронов и дырок на границах обедненной области без решения нелинейных уравнений (Ш.21+Ш.25).

Необходимо отметить, что использование уравнений (Ш.21+Ш.25) для изучения процессов в обедненных областях затруднено еще и тем обстоятельством, что кинетические коэффициенты μ и \mathcal{D} не являются постоянными величинами.

В слабых полях дрейфовая скорость и плотность тока проводимости пропорциональны напряженности поля, т.е. соблюдается закон Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. Однако в сильных полях из-за взаимодействия электронов и дырок с решеткой кристалла увеличение напряженности поля E не приводит к увеличению дрейфовой скорости, происходит ее "насыщение". Зависимость $v_E(E)$ показана на рис. Ш.15.

Данные о величинах подвижности и дрейфовой скорости в зависимости от напряженности поля приведены также в табл. Ш.2. Из нее видно, что целесообразно различать области с постоянной подвижностью (слабое поле) и постоянной дрейфовой скоростью (сильное поле).

Важная зависимость между кинетическими коэффициентами μ и \mathcal{D} устанавливается соотношением Эйнштейна: $\mu = \lambda \mathcal{D}$. Строго говоря, это соотношение справедливо для слабых полей. Тем не менее при исследовании теоретических моделей диффузионно-дрейфовых структур его обычно считают справедливым и для областей сильного поля. Использование соотношения Эйнштейна дает возможность определить токи и заряды в обедненной области с постоянной дрейфовой скоростью v_E . Выберем в уравнениях (Ш.21) и (Ш.22) в качестве независимой переменной потенциал (вместо x). Заменяя

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{d\rho}{d\psi} \cdot \frac{d\psi}{dx} = -E \frac{d\rho}{d\psi},$$

используя соотношение Эйнштейна $\mu = \lambda \mathcal{D}$, получим:

$$\frac{j}{v_E} = \rho \pm \frac{d\rho}{d(\lambda\psi)}, \quad (Ш.32)$$

где знак (\pm) будет различным для электронов и дырок. Пренебрегая рекомбинацией в пределах области пространственного заряда, найдем, что j не зависит от x и от ψ . Следовательно,

$\frac{j}{v_E} = \text{const}$ и уравнение (Ш.32) имеет решение:

$$\rho(\psi) = A e^{\mp \lambda \psi} + \frac{j}{v_E}. \quad (Ш.33)$$

Т а б л и ц а № 2

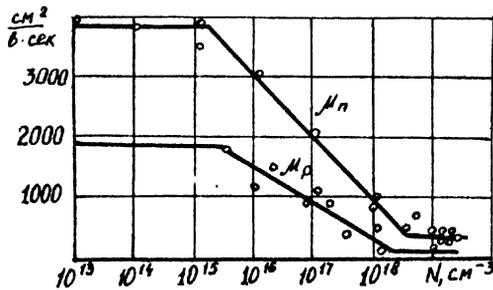
Зависимость дрейфовой скорости от напряженности поля

Германий	Кремний
$0 \leq E \leq 1 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ $\mu_n = 3600 \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$, $0 \leq v_n \leq 3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $\mu_p = 1700 \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$; $0 \leq v_p \leq 1,7 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$0 \leq E \leq 2 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ $\mu_n = 1200 \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$; $0 \leq v_n \leq 3 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $\mu_p = 250 \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$; $0 \leq v_p \leq 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$
$1 \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \leq E \leq 10 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ $3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \leq v_n \leq 5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $1,7 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \leq v_p \leq 5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$2 \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \leq E \leq 20 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ $3 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \leq v_n \leq 8 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \leq v_p \leq 7 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$
$E > 10 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$; $v_p = v_{\text{макс}} = 5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $E > 4 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ $v_n = v_{\text{макс}} = 5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$E > 20 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, $v_n = v_{\text{макс}} = 8 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $v_p = v_{\text{макс}} = 7 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$

Решение состоит из двух слагаемых. Первое из них совпадает с зависимостью (Ш.30), справедливой при условии $J=0$. Второе слагаемое $\frac{J}{V_E}$ означает добавочный заряд, появившийся в обедненной области за счет тока J .

При изучении квазинейтральных областей (поле слабое) необходимо иметь в виду, что на величину подвижности электронов и дырок в полупроводниках оказывают влияние различные механизмы рассеяния: кулоновское рассеяние ионизированными атомами примесей; рассеяние на тепловых колебаниях решетки; электронно-дырочное взаимодействие и рассеяние на нейтральных примесях. На основании теоретических и экспериментальных исследований была установлена зависимость μ и \mathcal{D} от концентрации примесей. Эта

а



б

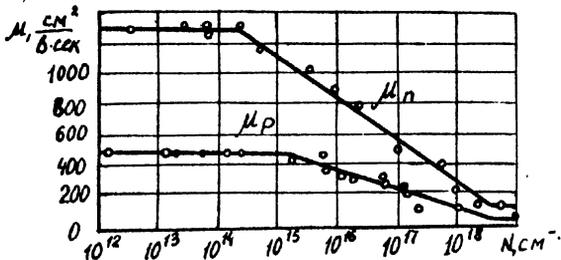


Рис.Ш.16 Зависимость подвижности от концентрации примесей:

а - для германия; б - для кремния

зависимость показана на рис. Ш.16. Часто используется приближенная формула

$$\mu_p = 1700 - 500 \lg \frac{N}{10^{15}}, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}} \quad (\text{Ш.34})$$

$$\text{при } 10^{15} < N < 10^{18} \text{ см}^{-3};$$

$$\mu_p = 1700 \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}} \quad \text{при } N < 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Таким образом, из вышесказанного о приближенном моделировании полупроводниковой структуры с диффузионно-дрейфовым механизмом переноса электронов и дырок можно сделать следующие выводы:

для расчета ширины обедненной области и зарядной емкости используется модель полностью обедненной области с $p=0$ и $n=0$;

для определения концентраций p и n на границах обедненной области используется модель с $J=0$, либо $V_E = \text{const}$;

для определения внутреннего поля в квазинейтральной базе используется модель с равным нулю током основных носителей;

для всех областей считается справедливым соотношение Эйнштейна $\mu = \lambda D$.

Рассмотрим р-п-р-структуру с прямо-смещенным эмиттерным и обратно-смещенным коллекторным р-п-переходами. Через эмиттерный переход протекает дырочный ток за счет диффузии из эмиттера, а электронный - за счет диффузии электронов из базы - в сотни раз меньше (в качественных транзисторах с $\gamma \cong 1$). Пренебрежем этим током, считая, что $J_n = 0$. Через коллекторный переход электронный ток не протекает из-за сильного отталкивающего поля, но может протекать ток дырок из базы. В отсутствие инжекции через эмиттерный переход это будет ток дырок, возникающих за счет тепловой генерации в базе. При инжекции дырок в базу из эмиттера через коллекторный переход течет ток за счет инжектированных в базу дырок. Таким образом, через оба перехода р-п-р-транзистора текут в основном токи дырок. Эти токи несут через обедненные области нескомпенсированный заряд избыточных дырок.

Постоянный ток создает добавочный заряд дырок в обедненных областях. Если плотность тока достаточно велика, добавочный заряд создает дополнительное поле такой величины, при которой картина равновесного поля может существенно измениться. Поэтому различают малые и большие плотности токов, а также малые и большие "уровни инжекции" неосновных носителей в базу. При малых

плотностях тока картина равновесного поля не искажается ни в обедненных, ни в квазинейтральных областях. При больших плотностях и уровнях инжекции картина поля может исказиться и в обедненных и в квазинейтральных областях.

В дальнейшем будут рассматриваться только такие плотности тока и уровни инжекции, которые не искажают равновесное поле в базе.

При переменном токе в обедненной области имеется переменный нескомпенсированный заряд дырок. Он создает переменное электрическое поле, а значит и ток смещения. В уравнении непрерывности для дырок член $q \frac{\partial p}{\partial t}$ отражает этот процесс. Подставим в него величину переменного заряда избыточных дырок $\rho = \epsilon_0 \epsilon_a \operatorname{div} E$ (уравнение Максвелла), тогда, пренебрегая рекомбинацией и генерацией, получим:

$$\operatorname{div} (J_{\text{проб}} + J_{\text{смещ}}) = \frac{\partial}{\partial x} (J_{\text{проб}} + J_{\text{смещ}}) = 0, \quad (\text{Ш.35})$$

где $J_{\text{проб}}$ - плотность тока проводимости (сумма диффузионной и дрейфовой компонент), $J_{\text{смещ}} = \epsilon_a \frac{\partial E}{\partial t}$ - плотность тока смещения.

Из уравнения (Ш.35) следует, что сумма токов проводимости и смещения во всех точках одинакова (и равна полному току во внешней цепи). Это и понятно, так как мы пренебрегли генерацией и рекомбинацией, следовательно, поле вектора плотности полного тока не имеет источников и стоков. Тогда

$$J = J_{\text{проб}}(x) + J_{\text{смещ}}(x) = \text{const}. \quad (\text{Ш.36})$$

Проинтегрируем равенство (Ш.36) в пределах обедненной области

$$J \cdot d = \int_0^d J_{\text{проб}} \cdot dx + \epsilon_a \int_0^d \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dx,$$

откуда получаем

$$J = \frac{1}{d} \int_0^d J_{\text{проб}} dx + \frac{\epsilon_a}{d} \frac{\partial U_n}{\partial t}, \quad (\text{Ш.37})$$

где первое слагаемое правой части есть средний ток проводимости;

U_n - переменное напряжение, приложенное к обедненной области (оно получилось в результате интегрирования переменной напряженности поля). Второе слагаемое имеет вид емкостного тока

$$J_c = C \frac{\partial U}{\partial t},$$

протекающего через плоский конденсатор емкостью $C = \frac{\epsilon_a}{d}$ и площадью пластин $S = I$.

Рассматривая выражение (Ш.37) как запись первого закона Кирхгофа, мы приходим к эквивалентной схеме, показанной на рис. Ш.17.

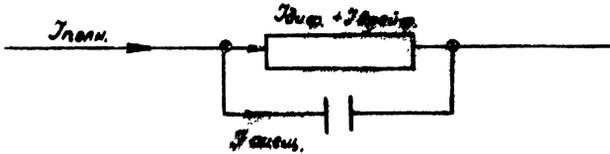


Рис.Ш.17. Эквивалентная схема, отображающая токи проводимости и смещения в р-п-переходе

Упомянув ранее о зарядной емкости обратно-смещенного р-п-перехода, мы считали, что добавочные заряды расположены на границах области. Эти заряды создавали ток смещения в обедненной области, а ток проводимости был равен нулю из-за того, что инжекция была исключена. В случае инжекции заряды расположены внутри обедненной области, помимо тока смещения, имеется ток проводимости, тем не менее суммарный эффект за счет токов смещения отображается на эквивалентной схеме емкостью плоского конденсатора. Происходит это в случае одномерного поля.

Таким образом, у нас есть основания оценивать емкость обедненных областей р-п-переходов формулой плоского конденсатора как для обратного, так и для прямого напряжения на р-п-переходе.

Для использования формулы плоского конденсатора нужно знать величину d .

Перейдем теперь к выводу расчетных формул.

Местоположение р-п-перехода x_0 (рис. Ш.18) определяется из условия

$$N(x) = N_d(x) - N_a(x) = 0.$$

В дальнейшем величину x_0 будем считать известной как для эмиттерного, так и для коллекторного р-п-переходов. Для определения ширины обедненной области используем допущение о полном отсутствии в ней подвижных зарядов ($p=0$; $n=0$). Такая модель является хорошим приближением для обратно-смещенных р-п-переходов и очень грубым - для прямо-смещенных переходов. Напряженность поля $E(x)$ находим из уравнения Максвелла $\epsilon \frac{dE}{dx} = qN(x)$, откуда

$$\epsilon [E(x) - E(x_p)] = \int_{x_p}^x qN(\xi) d\xi = Q(x), \quad (\text{Ш.38})$$

где $Q(x)$ - заряд ионов примесей на участке от x_p до x при единичной площади p - n -перехода.

Пологая $x = x_p$, получим

$$\oint [E(x_n) - E(x_p)] = \int_{x_p}^{x_n} q N(\xi) d\xi = 0, \quad (Ш.39)$$

где Q - полный заряд в обедненной области.

На границах с нейтральными областями $E(x_p) = E(x_n) = 0$.

На границе с квазинейтральной областью условие $E=0$ можно принять в качестве первого приближения. Более точные граничные условия получим, определив поле в квазинейтральной области из условия равенства нулю тока основных носителей. При условии $E(x_p) = E(x_n) = 0$ имеем $Q = 0$, т.е. заряды по обе стороны от точки x_0 равны по величине и противоположны по знаку.

Напряжение между точками x_p и x

$$U(x) = \Psi(x) - \Psi(x_p) = \int_{x_p}^x E(x) dx. \quad (Ш.40)$$

Полное напряжение на обедненной области

$$U_n(x) = \Psi(x_n) - \Psi(x_p) = \int_{x_p}^{x_n} E(x) dx. \quad (Ш.41)$$

Левая граница обедненной области находится в p -области на расстоянии x_p от точки x_0 , а правая - в n -области на расстоянии x_n .

Ширина обедненной области $d = x_p + x_n$. Для определения x_p и x_n имеем два уравнения, а именно - (Ш.39) и (Ш.41). Рассмотрим некоторые примеры.

Пример I. Резкий p - n -переход. Пусть концентрация избыточной примеси $N(x)$ изменяется настолько резко, что может быть приближенно отобрана ступенькой

$$N(x) = Nd - N_0 = \begin{cases} -N_1 & \text{при } x < x_0; \\ N_2 & \text{при } x > x_0. \end{cases} \quad (Ш.42)$$

Пусть обедненная область граничит с нейтральными областями, так что в выражении (Ш.39) необходимо подставить $E(x_n) = E(x_p) = 0$, при этом

$$\int_{x_p}^{x_0} |N(x)| dx = \int_{x_0}^{x_n} |N(x)| dx. \quad (Ш.43)$$

Подставляя значение (Ш.42) в формулу (Ш.43), получим

$$N_1(x_0 - x_p) = N_2(x_n - x_0). \quad (Ш.44)$$

Из выражений (Ш.38) и (Ш.41) находим напряженность поля и напряжение на обедненной области

$$U_n = -U + U_k = \frac{q}{\epsilon_a} \cdot \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} \cdot d^2; \quad \epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon. \quad (\text{Ш.45})$$

Используя формулу плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_a S}{d}$, получаем

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon_a N_1 N_2}{2(N_1 + N_2)(-U + U_k)}}. \quad (\text{Ш.46})$$

В удобной для расчета форме:

$$C = 0,83 \cdot 10^{-4} \cdot S \sqrt{\frac{\epsilon N_1 N_2}{(N_1 + N_2)(-U + U_k)}}, \quad (\text{Ш.47})$$

где S - площадь в см²; N_1 и N_2 - имеют размерность см⁻³; $-U + U_k$ - в вольтах; емкость C - в пикофарадах. На практике часто встречается случай, когда концентрация примесей в одной из областей значительно больше, чем в другой. Например $N_1 \gg N_2$, тогда формулы (Ш.45) и (Ш.47) упрощаются:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_a(-U + U_k)}{q N_2}}; \quad C = 0,83 \cdot 10^{-4} \cdot S \sqrt{\frac{\epsilon N_2}{-U + U_k}}. \quad (\text{Ш.48})$$

Из формул (Ш.48) видно, что величины d и C определяются концентрацией примесей в более высокоомной области. Из выражения (Ш.44) видно, что обедненный слой в данном случае проникает в основном также в эту область. Расчетные формулы (Ш.45), (Ш.47) и (Ш.48) используют для экспериментального определения величин. Пусть, например, распределение примесей $N(x)$ нам известно. Тогда, измеряя емкость и зная величины ϵ , S и приложенное (внешнее) напряжение U , находим величину контактного напряжения U_k . Наоборот, если U_k известно, эти же формулы можно использовать для проверки расчетных значений примеси (например N_2 в базе транзистора). Чаще всего формула (Ш.48) используется в такой форме:

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = K(-U + U_k), \quad \text{где } K = \frac{1,44 \cdot 10^5}{\epsilon \cdot N_2}. \quad (\text{Ш.49})$$

Значение K определяется по наклону экспериментальной прямой в соответствии с уравнением (Ш.49).

Пример 2. Главная переход. Рассмотрим линейное распределение концентрации примесей

$$N(x) = N_d - N_a = ax. \quad (\text{Ш.50})$$

Из симметрии следует, что

$$|\alpha_n| = |\alpha_p| = 0,5d. \quad (\text{Ш.51})$$

Используя выражения (Ш.38) и (Ш.41), находим

$$-u + u_k = \frac{q a d^3}{12 \epsilon_a}. \quad (\text{Ш.52})$$

Емкость определяется по формуле:

$$C = 0,97 \cdot 10^{-5} \cdot S \sqrt[3]{\frac{\epsilon^2 a}{-u + u_k}}, \quad (\text{Ш.53})$$

где c - в пикофарадах; S - в см^2 ; $-u + u_k$ - в вольтах; a имеет размерность см^{-4} . Для экспериментальной проверки служит формула

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = b(-u + u_k), \quad \text{где } b = \frac{1,09 \cdot 10^{15}}{\epsilon^2 \cdot a}. \quad (\text{Ш.54})$$

Величина b определяется по наклону экспериментальной прямой в соответствии с уравнением (Ш.54). Зная b , можно найти градиент концентрации примесей a .

Пример 3. Переход, изготовленный диффузией.

В тех случаях, когда известна концентрация примеси на поверхности полупроводника N_n , распределение примеси, продиффундировавшей в полупроводник, определяется выражением:

$$N_1(x) = N_n (1 - \text{erf } x/\sqrt{D t}), \quad (\text{Ш.55})$$

где x - расстояние от поверхности; D - коэффициент диффузии примеси; t - время диффузии,

$$\text{erf } y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\alpha^2} d\alpha.$$

Пусть до диффузии в полупроводнике была примесь с концентрацией N_0 . Например, исходный полупроводник n -типа, а диффундирует акцепторная примесь. Тогда объемная плотность заряда в p - n -переходе определяется выражением

$$\rho = q N(x) = q N_n (1 - \text{erf } \frac{x}{\sqrt{D t}}) - q N_0. \quad (\text{Ш.56})$$

Подвижными зарядами пренебрегаем, как и в других примерах. Для приближенных оценок можно поступить следующим образом. Если p - n -переход расположен близко к поверхности (распределение примеси $N_1(x)$ показано пунктиром на рис. Ш.18, то распределение избыточной примеси $N(x)$ близко к ступенчатому. Тогда ширина обедненной области и зарядная емкость определяются формулами

из примера I. Если, наоборот, р-п-переход расположен далеко от поверхности (распределение примеси N_1 показано сплошной линией на рис. Ш.18), то распределение избыточной примеси $N(x)$ близко

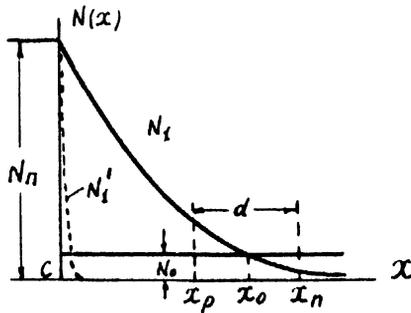


Рис.Ш.18. Распределение примесей в транзисторной структуре

к линейному. При малых обратных напряжениях ширина обедненной области и зарядная емкость определяются по формулам примера 2. При больших обратных напряжениях переход расширяется в большей мере вправо, т.е. в сторону с меньшей концентрацией примесей, и становится явно несимметричным. В таком режиме р-п-переход по своим свойствам приближается к резкому переходу. В этом случае формулы из примера I оказываются лучшим приближением, чем формулы из примера II.

Местоположение р-п-перехода находят из уравнения

$$N_n (1 - e^{-\gamma_0}) = N_0, \quad (\text{Ш.57})$$

где $\gamma_0 = x_0 / \sqrt{2t}$.

Для более точных расчетов задача определения d и c была решена численными методами. Результаты расчетов приведены на рис. Ш.19. На рис. Ш.19 приведена зависимость ширины германиевых и кремниевых р-п-переходов и их зарядной емкости от величины $\frac{U + U_k}{N_0}$ при различной "глубине залегания" р-п-перехода x_0 .

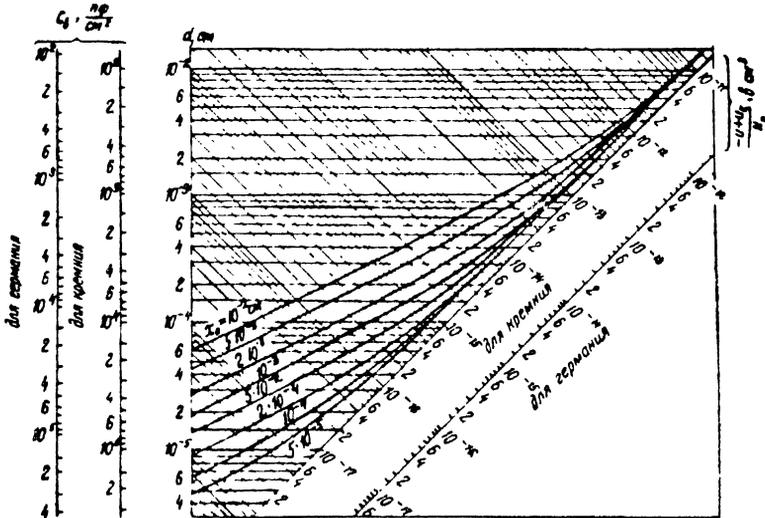


Рис.Ш.19. Зависимость ширины и емкости р-п-перехода от напряжения

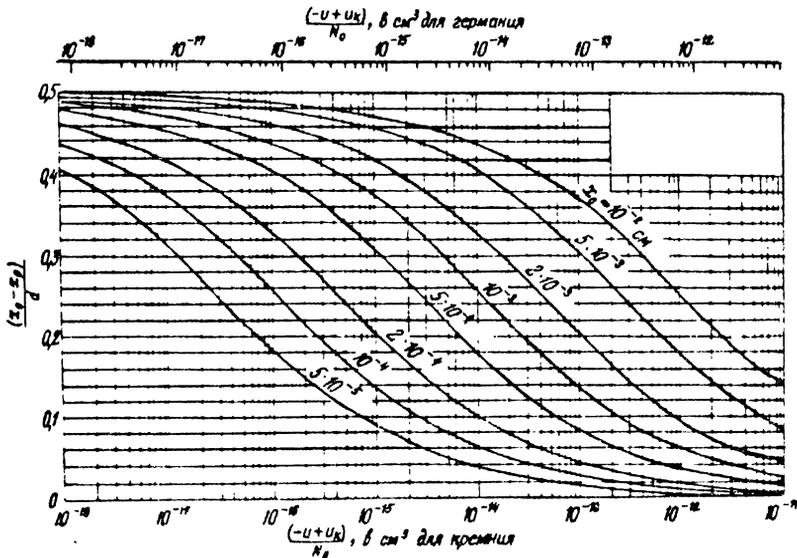


Рис.Ш.20. Номограмма для определения глубины проникновения р-п-перехода в базу и коллектор

На рис. Ш.20 приведена зависимость отношения $\frac{x_0 - x_p}{d}$ для германиевых и кремниевых р-п-переходов от величины $\frac{-U + U_k}{N_0}$

при различных значениях величины x_0 . Кривые можно использовать при условии

$$3 \cdot 10^{-6} \leq \frac{N_0}{N_n} \leq 3 \cdot 10^{-5}.$$

Приведенные кривые предназначены для расчета р-п-переходов полупроводниковых диодов. Их можно использовать и для расчета транзисторов. Расчет коллекторного перехода должен дать удовлетворительную точность, так как распределение примесей $N_1(x)$ и $N_0(x)$ совпадает с изображенным на рис. Ш.18. Расчет эмиттерного перехода может дать дополнительные погрешности из-за того, что в этом случае обе кривые $N_1(x)$ и $N_0(x)$ имеют градиент. Правда $N_0(x)$ имеет сравнительно малый наклон и приближенно можно считать $N_0(x) = \text{const}$, как и принято на рис. Ш.18.

Определим величину d , а также $x_0 - x_p$ р-п-перехода для германия.

Пусть $N_0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $N_n = 10^{21} \text{ см}^{-3}$; $x_0 = 2 \text{ мкм}$;
 $U_k = 0,4 \text{ в}$; $U = 0$.

Проверка $\frac{N_0}{N_n} = 2 \cdot 10^{-5}$ показывает, что можно использовать кривые, приведенные на рис. Ш.19. Находим $\frac{-U + U_k}{N_0} = 2 \cdot 10^{-17} \text{ в см}^3$.

Пользуясь рис. Ш.19, находим $d = 0,3 \text{ мкм}$. По кривым рис. Ш.20 находим $x_0 = x_p = 0,4d = 0,12 \text{ мкм}$, тогда $x_n - x_0 = 0,18 \text{ мкм}$. В режиме $U = 0$ р-п-переход близок к симметричному.

Пусть теперь

$$U = 5 \text{ в}, \quad \frac{-U + U_k}{N_0} = 2,5 \cdot 10^{-16} \text{ в см}^3.$$

Находим $d \approx 0,7 \text{ мкм}$; $x_0 - x_p \approx 0,2 \text{ мкм}$; $x_n - x_0 \approx 0,5 \text{ мкм}$. В таком режиме р-п-переход становится несимметричным.

Выше было показано, каким образом формулируется модель диффузионно-дрейфовой структуры. Упрощение этой модели дало возможность перейти к получению интересующих нас количественных зави-

символов и выводу расчетных формул. В качестве примеров были определены параметры р-п-переходов (их местоположение, ширина, емкость).

Упрощенная теоретическая модель используется обычно для выявления количественных соотношений в транзисторах и диодах в различных режимах работы (в статике, в импульсном режиме, а также в режиме усиления слабых сигналов).

Расчетные формулы используются для проектирования опытных образцов, а экспериментальное изучение этих образцов позволяет установить границы применимости принятых допущений.

5. Расчет параметров элементов микросхем

В настоящее время основная масса микросхем состоит из различных элементов. Это значит, что в микросхеме можно "различить" отдельные компоненты и "узнать" в них хорошо известные элементы электрических цепей с сосредоточенными параметрами: резисторы, индуктивные и емкостные элементы, активные элементы и т.д. Во многих случаях в качестве схемных элементов используются структуры с распределенными параметрами - длинные линии, которые отображаются эквивалентными схемами, также содержащими R, L, C, G, M элементы электрических цепей.

В процессе разработки микросхемы необходимо предварительно установить связи двух типов:

- а) зависимость характеристик микросхемы от параметров отдельных "различных" компонент;
- б) зависимость параметров этих компонент от различных физико-технологических и конструктивных факторов.

Если, например, разрабатывается усилитель, необходимо вначале разработать такую принципиальную схему, которая будет отвечать заданным требованиям, предъявляемым к величине коэффициента усиления, к его частотным характеристикам, чувствительности усиления к изменению параметров элементов (в результате воздействия различных дестабилизирующих факторов) и т.д. А чтобы разработать такую схему, нужно установить связи между схемными функциями (усилением) и схемными элементами (R, L, C, M - активными элементами и др.). Такие связи обычно устанавливаются в виде расчетных формул, графиков, номограмм, таблиц.

Дальнейшая задача состоит в том, чтобы выяснить, может ли выбранная принципиальная схема быть "реализована" в микроэлектронном исполнении. Для решения этой задачи необходимо учесть возможности технологии, особенности, связанные с топологией, электрическими и тепловыми связями в микросхеме, требования конструкции и т.д. Другими словами, возможности реализации определяются спецификой микроэлектроники.

Прежде всего, необходимо иметь зависимости параметров элементов от свойств материалов, формы, размеров и расположения схемного элемента.

Рассмотрим, каким образом эти задачи могут быть решены расчетным путем.

Первая задача^{*)} обычно решается методами расчета электрических цепей (схем). Как известно, методы расчета цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами базируются на законах Ома и Кирхгофа. Следовательно, возможность использования этих законов является необходимым условием решения первой задачи существующими методами.

Далее необходимо, чтобы все элементы (активные и пассивные) были отображены эквивалентными схемами. Здесь уместно уточнить термин "эквивалентная схема". Замена электрического многополюсника эквивалентной схемой производится так, чтобы внешняя цепь "не почувствовала" этой замены. Другими словами, токи и напряжения на внешних выводах до и после замены должны остаться теми же самыми.

Между терминами "эквивалентная схема" и "модель" есть очевидное различие: всякая эквивалентная схема моделирует заменяемую цепь на внешних выводах, но не всякая модель является схемой, тем более эквивалентной. Например, теоретическая, математическая или аналоговая модели вообще могут не иметь отображения в виде электрической схемы.

Вторая задача чаще всего решается методами расчета полей: электрических, магнитных, электромагнитных, тепловых.

Рассмотрим методы расчета параметров пассивных элементов.

Типичные конфигурации резисторов, конденсаторов и индуктивных элементов тонкопленочных и полупроводниковых монолитных интегральных схем приведены на рис. III.21.

^{*)} См. пункт а) на стр. 256.

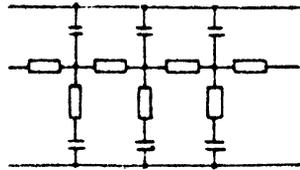
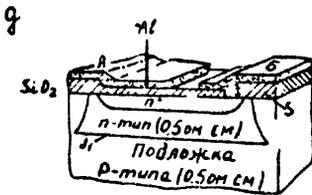
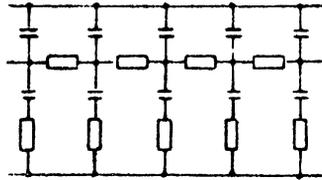
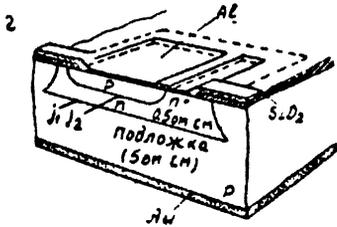
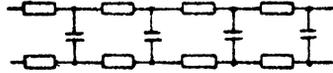
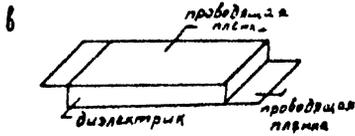
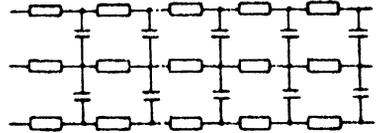
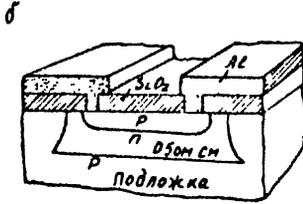
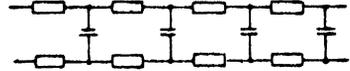
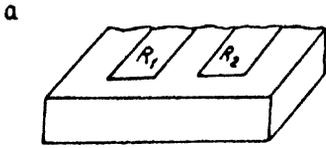


Рис.Ш.21. Конфигурации пассивных элементов микросхем

Наиболее простой является конфигурация металл-диэлектрик-металл, изображенная на рис. Ш.21,в. Такая конфигурация используется в качестве конденсатора в пленочной микросхемотехнике. Поскольку обкладки пленочного конденсатора имеют сопротивление (например $0,1 \frac{\text{ОМ}}{\text{СМ}}$), эквивалентная схема изображена в виде R - C - R - линии. В технике СВЧ, при соответствующем подборе параметров, рассматриваемая конфигурация (микрополосковая линия) может служить направляющей системой, канализирующей электромагнитную энергию, а также резонансной системой, эквивалентной колебательному контуру.

На рис. Ш.21,а изображены две полоски на общей диэлектрической подложке. Это могут быть: соединительный проводник и резистор; два соединительных проводника; два резистора; резистор и обкладка конденсатора и т.д. Во всех случаях эквивалентная схема является R - C - NR - линией, где $N = \frac{R_2}{R_1}$.

На рис. Ш.21,б изображен типичный резистор полупроводниковых интегральных схем, изготовленный методом диффузии примесей р-типа в эпитаксиальный слой п-типа. (В этом же процессе диффузии образуются области базы транзисторов этой микросхемы). Структура имеет два р-п-перехода. Первый - между диффузионным сопротивлением и эпитаксиальным η_1 -слоем - служит для изоляции резистора от η_1 -слоя. Второй - между η_1 -слоем и подложкой р-типа - является "паразитным". К обоим переходам должно быть приложено обратное напряжение. В противном случае будет функционировать паразитный транзистор, образованный двумя взаимодействующими р-п-переходами. Распределенные емкости обратно-смещенных р-п-переходов отображены на эквивалентной схеме двухслойной линией. Паразитный транзистор на эквивалентной схеме не показан, так как при правильно выбранных режимах он не должен функционировать.

На рис. Ш.21,г показан конденсатор монолитных микросхем, в котором используется емкость обратно-смещенного р-п-перехода. В этой структуре также имеется два р-п-перехода: переход \downarrow_2 , образующий полезную емкость, и \downarrow_1 (между эпитаксиальным η_1 -слоем и подложкой), образующий паразитную емкость. На эквивалентной схеме показаны распределенные емкости обоих р-п-переходов, распределенное сопротивление η_1 -слоя ($\sigma = 2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и распределенное сопротивление между переходом \downarrow_1 и металлическим

покрытием (Au). Паразитный р-п-р-транзистор на эквивалентной схеме не показан, так как предполагается, что действие его исключено. Если пренебречь распределенным сопротивлением подложки, получим $C-R-NC$ - структуру.

На рис. Ш.21, д показан конденсатор монолитных ИС типа металл-диэлектрик - полупроводник (МДП). Слой диэлектрика (SiO_2) находится между двумя проводниками: слоем кремния n^+ - типа и слоем алюминия, нанесенным на верхнюю поверхность диэлектрика. Для изоляции конденсатора от подложки используется р-п-переход j_1 . Эквивалентная схема показана на этом же рисунке. Поскольку слой n^+ - типа имеет малое сопротивление, эквивалентную схему можно упростить, считая приближенно распределенное сопротивление этого слоя равным нулю.

На рис. Ш.22 показаны разновидности индуктивных элементов микросхем пассивного типа. Многовитковые плоские катушки имеют сложные связи: между любыми двумя витками имеются частичные емкости C_{ik} и индуктивные связи, отображаемые взаимной индукцией M_{ik} . В результате на высоких частотах плоскую катушку следует рассматривать как систему длинных линий с электромагнитными связями. На достаточно низких частотах, когда можно пренебречь влиянием межвитковых емкостей, плоскую катушку можно рассматривать как чисто индуктивный элемент.

Приведенные выше примеры типовых конфигураций пассивных элементов микросхем показывают, что для определения параметров элементов в диапазоне частот необходимо использовать теорию длинных линий и знать зависимость параметров R, L, C, G, M -линий от геометрии элементов и свойств материалов.

Строгое математическое описание электродинамики пассивных элементов может быть получено на базе уравнений Максвелла. Как известно из курса электродинамики, уравнения Кирхгофа выводятся из уравнений Максвелла при следующих допущениях:

ток сосредоточен в тонком проводнике и имеет одно и то же значение во всех точках цепи;

изменение тока в некоторой точке цепи оказывает мгновенное воздействие, без запаздывания во времени, на все остальные точки цепи. Другими словами, геометрические размеры цепи малы по сравнению с длиной волны;

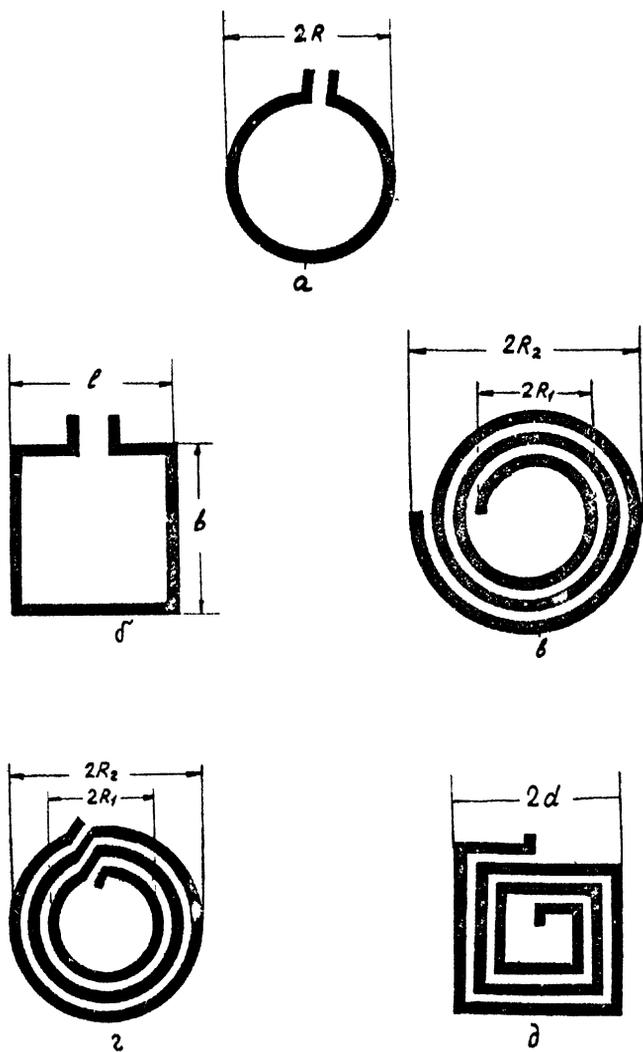


Рис. III.22. Конфигурации индуктивных элементов

для введения понятия емкости предполагается, что заряды сосредоточены в местах разрыва тока проводимости, а заряды, распределенные вдоль проводников, отсутствуют. Следовательно, емкость предполагается сосредоточенной в месте разрыва, а емкость, распределенная вдоль проводников, считается равной нулю;

вводя такое понятие как индуктивность, предполагается, что линии тока всегда замкнуты, т.е. ток проводимости замыкается в местах разрыва током смещения.

Если эти допущения не выполняются, вводится понятие электрических цепей с распределенными постоянными. Для этих цепей токи и потенциалы можно с любой степенью точности считать неизменными в пределах бесконечно малого участка цепи и применить к этому участку законы Кирхгофа. Это даст уравнения длинных линий в дифференциальной форме. Поскольку при этом используется понятие тока и напряжения, необходимо чтобы напряжение было определено однозначно, т.е. чтобы интеграл напряженности электрического поля не зависел от пути, соединяющего два проводника. Только в этом случае напряжение будет равно разности потенциалов между ними. Это условие выполняется для потенциальных электрических полей, удовлетворяющих уравнению Лапласа. Именно такая картина электрического поля существует в линиях, в которых распространяются поперечные электромагнитные волны (ТЕМ-волны). Вектора напряженности поля (\vec{E} и \vec{H}) располагаются в поперечной плоскости (т.е. в плоскости сечения) линии, а составляющие E_z и H_z вдоль линии равны нулю. При этом условия уравнения длинной линии получаются из уравнений Максвелла. Если в уравнениях Максвелла считать $E_z = 0$ и $H_z = 0$, то окажется, что векторы напряженности электрического и магнитного полей \vec{E}_{xy} и \vec{H}_{xy} удовлетворяют уравнению Лапласа. Картина электрического поля будет такой же, как в статике, а магнитного — как для случая постоянных токов. Следовательно, емкость C можно найти из статике, а L и M — для постоянного тока. Все это справедливо для линий без потерь. Если в проводниках имеются потери ($R \neq 0$), то появляется напряженность поля $E_z = \frac{I}{\sigma}$ (закон Ома), необходимая для поддержания тока, и картина поля отличается от статической. Тем не менее в теории длинных линий и в этом случае параметры M и L определяются при постоянном токе, а C — из статике. При этом удовлетворительная точность получается только при условии $E_z \ll E_{xy}$.

В микроэлектронике применяются проводящие пленки с малым сопротивлением (например $0,1 \frac{\text{Ом}}{\square}$), резистивные пленки (например $500 \frac{\text{Ом}}{\square}$), диффузионные сопротивления в полупроводниковых интегральных схемах (например $200 \frac{\text{Ом}}{\square}$).

Элементы имеют эквивалентные схемы в виде RLC-линий. Для проводящих пленок условие $E_z \ll E_{xy}$ выполняется, а для резисторов - может не выполняться.

Далее, в микроэлектронике мы сталкиваемся со слоистыми структурами. Например, проводники или резисторы расположены на диэлектрической подложке. Параметры подложки и окружающей среды (воздух, наполнитель) будут различными. В полупроводниковых микросхемах параметры полупроводниковых материалов (ϵ_e, Si), пленок окислов (SiO_2) и воздуха (или наполнителя) также различны. Соединительные проводники и резистивные элементы микросхем располагаются на границах раздела сред с различными свойствами. В таких структурах поперечные (ТЕМ) волны существовать не могут, следовательно, использование параметров длинных линий, определенных из статики и на постоянном токе, строго говоря, необоснованно. Однако, как показывают эксперименты и теоретический анализ, в микроэлектронных структурах имеют место "квази" (т.е. почти) ТЕМ-волны, напоминающие по свойствам "чистые" ТЕМ-волны. Поэтому и в микроэлектронике используется аппарат теории длинных линий, параметры которых определяются из статики и режима постоянного тока. Частотный предел применимости формул этих параметров и самой теории длинных линий определяется геометрическими размерами элементов и величинами параметров материалов (σ, ϵ, μ и др.).

Очень важной особенностью микросхем является использование полупроводников. Пусть, например, нам нужно определить индуктивность проводника (микрополосковой линии), расположенного над полупроводящим слоем (рис. Ш.23). Если частота сигнала достаточно мала, электромагнитное поле проникает на всю глубину полупроводника

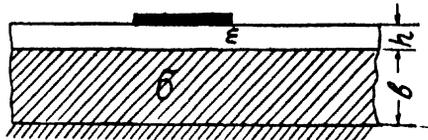


Рис. Ш.23. Микрополосковая линия, расположенная над полупроводником

и индуктивность будет определяться расстоянием микрополосковой линии до металлического экрана ($h + b$). Если частота сигнала достаточно велика, из-за поверхностного эффекта электромагнитное поле не проникнет вообще в полупроводник и индуктивность будет определяться только расстоянием до полупроводника (h). В этом случае она может оказаться в несколько раз меньше, чем в первом.

Еще одна особенность микросхем состоит в том, что их элементы расположены в непосредственной близости друг от друга. Достижения современной технологии позволяют располагать элементы на расстояниях в десятки микрон и менее. При этом нельзя пренебрегать известным в электродинамике "эффектом близости", под действием которого перераспределяется плотность тока в проводниках. Например, величина полного сопротивления проводника (омического и индуктивного) в установившемся синусоидальном режиме будет зависеть от формы и расположения соседнего проводника.

Диапазон частот, используемый в настоящее время в микроэлектронике, простирается от нуля до тысяч мегагерц (сантиметровый диапазон волн). Поэтому в микросхемах встречаются не только конфигурации размеров, много меньших длины волны, но и сравнимых с длиной волны (в технике СВЧ). В этом случае нельзя пренебрегать запаздыванием, а применимость теории длинных линий необходимо проверять экспериментальным путем, либо путем точного решения соответствующих задач на основе уравнений Максвелла.

6. Расчет емкости микросхем

Емкости пленочного конденсатора и конденсаторов полупроводниковых интегральных схем определяются по формуле

$$C = \epsilon_a \frac{S}{d}, \quad (\text{Ш.58})$$

где d — толщина пленки диэлектрика либо ширина обедненной области р-п-перехода, $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$; $\epsilon_0 = 8,85 \frac{\text{нФ}}{\text{м}}$;

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость.

В более сложных случаях для конфигураций, показанных на рис. Ш.24 и Ш.25, расчетные формулы емкостей получают двумя путями:

1) при помощи конформных преобразований заданная конфигурация преобразуется к такой "канонической" конфигурации, для которой емкость уже известна;



Рис. Ш.24. Проводник на подложке при условии $\epsilon \gg 1$

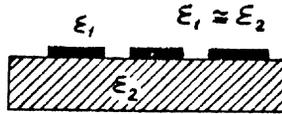


Рис. Ш.25. Проводник на подложке при условии $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$

2) путем решения краевой задачи определяются потенциалы и заряды проводников, а следовательно, все частичные емкости.

В табл. Ш.3 приведены конфигурации и формулы емкостей, полученные первым способом. Эти формулы могут быть использованы для оценки емкости между прямолинейными проводящими или резистивными полосками, а также между полоской и экраном или корпусом. Формулы получены при следующих допущениях, определяющих границы их применимости: толщина полосок много меньше их ширины; ширина полосок много меньше их длины.

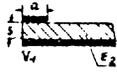
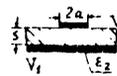
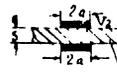
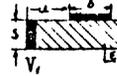
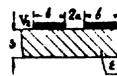
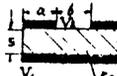
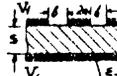
Таблица содержит два ряда формул. В левом ряду приведены формулы, полученные в предположении $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$, где ϵ_2 - диэлектрическая проницаемость подложки (или вообще слоя изолятора), а ϵ_1 - окружающей среды. Это означает, что весь поток электрического смещения замыкается в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 .

В правом ряду приведены формулы, полученные в предположении, что проводники находятся в однородной среде. Поскольку в действительности имеется две среды (ϵ_2 и ϵ_1), рекомендуется для однородной среды принять $\epsilon = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$. Таким образом, формулы табл. Ш.3 являются приближенными.

Если окружающей средой является воздух или заполнитель с $\epsilon_1 = 1 \div 2$, а $\epsilon_2 \approx 10$, следует использовать левый ряд формул. Если ϵ_1 и ϵ_2 близки по величине - правый ряд формул. В табл. Ш.3 даны формулы "геометрической" (безразмерной) емкости в расчете на единицу длины, т.е. $\frac{C}{\epsilon_0}$, где C - емкость единицы длины, $\epsilon_0 = \epsilon_0 \epsilon$ также имеет размерность емкости на единицу длины. Например, чтобы получить емкость в пикофарадах на сантиметр, необходимо рассчитанную по формулам табл. Ш.3 величину геометрической емкости помножить на $\epsilon_0 = \epsilon_0 \epsilon$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{нФ}}{\text{см}}$. Диэлектрик подложки заштрихован. Проводящие и резистивные полоски обозначены сплошными линиями. V_1 и V_2 - потенциалы этих полосок; K и K' - полные эллиптические интегралы, для которых имеются таблицы. Пользуясь таблицами, можно построить кривые,

Таблица И.3

Примеры конфигураций,
для которых величина емкости определяется расчетами путем

Размещение проводящих элементов вблизи плоской поверхности	$\epsilon = \epsilon_2 \gg \epsilon_1$	$\epsilon = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$
	$C_1 = \frac{K'}{K''};$ $\kappa = \epsilon h \frac{\pi a}{2s};$ $\kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2}$	—
	$C_2 = 2C_1$	—
	$C_3 = C_1$	—
	$C_4 = \frac{1}{C_1}$	—
	$C_5 = \frac{1}{2} C_4$	—
	—	$C_6 = C_2(1.3 + 1.4)$
	$C_7 = \frac{K'}{K''};$ $\kappa = \frac{\epsilon h \frac{\pi a}{2s}}{\frac{\pi(a+b)}{2s}}$ $\kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2}$	—
	$C_8 = \frac{1}{2} C_7$	$C_8 = \frac{K'}{K''} \text{ при } \epsilon = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2};$ $\kappa = \frac{a}{a+b};$ $\kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2}$
	$C_9 = \frac{1}{C_7}$	$C_9 = 2 \frac{K'}{K''};$ $\kappa = \sqrt{\frac{b}{a}}$ $\kappa' = 1 - \kappa^2$
	$C_{10} = 2C_9$	$C_{10} = 2C_9$
	—	$C_{11} = 2C_6$

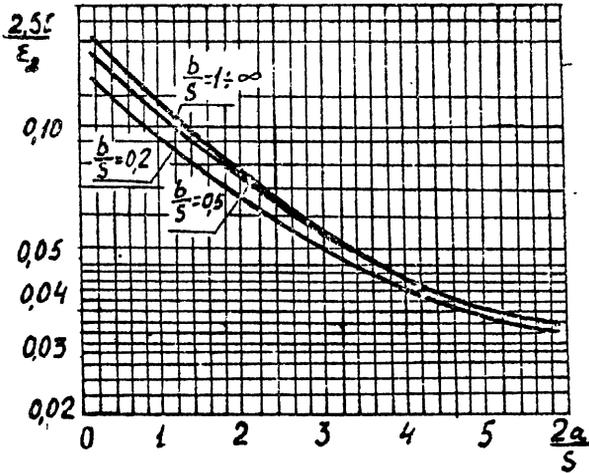


Рис.Ш.26. Зависимость емкости от геометрии для конфигурации № 8 таб.Ш.3

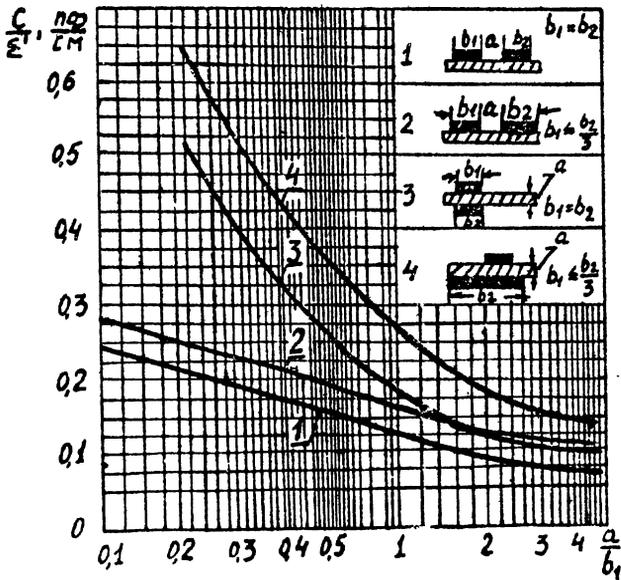


Рис.Ш.27. Кривые для определения емкости при условии $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$

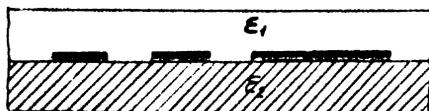


Рис.Ш.28. Симметричная микрополосковая линия

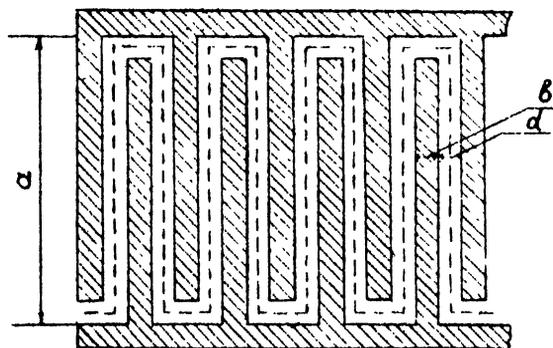


Рис.Ш.29. Конфигурация в форме "гребенки"

С. изм. (пф)
 С. расч (пф)

$$C = \beta \xi_0 \xi_{\text{эф.}} l_{\text{ср.}}$$

$$\xi_{\text{эф.}} = \frac{\xi_n + 1}{2} + \frac{\xi_n - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{b}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

1) $\beta = 0,89 + 0,39 \lg \frac{b^3}{d^3}$ при $n > 6$;

2) $\beta = 1,06 + 0,28 \lg \frac{b^3}{d^3}$ при $n < 6$;

$\xi_0 = 8,85 \text{ пф/м}$

l - измеренная величина;
 0 - величина, рассчитанная по формуле (1)
 $b = d$; $a = 50 \text{ мм}$; $h = 25 \text{ мм}$

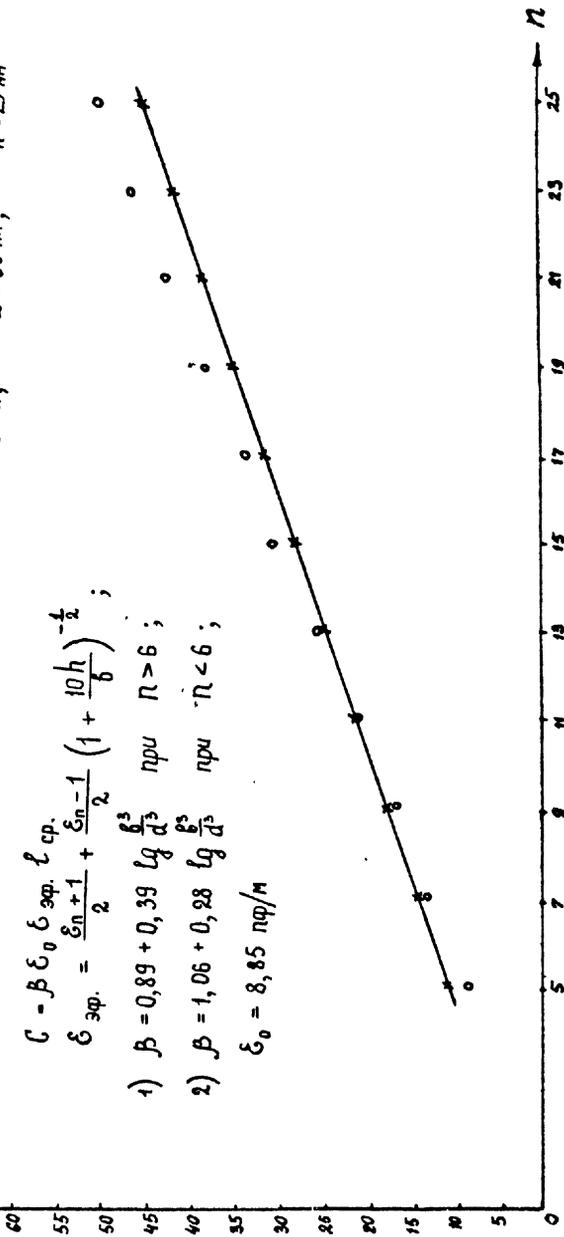


Рис. 30. Кривые для определения емкости "гребенки"

удобные для расчетов. Такие кривые для варианта 8 табл. Ш.3 (при $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$) показаны на рис. Ш.26, где обозначено: C - емкость на единицу длины, пф/см; ϵ_2 - относительная диэлектрическая постоянная подложки. На рис. Ш.27 приведены кривые для определения емкости для случая сравнимых величин ϵ_1 и ϵ_2 . Четыре кривые соответствуют схемам, приведенным на этом же рисунке, а C - емкость на единицу длины, пф/см; ϵ' - относительная диэлектрическая проницаемость однородной среды

$$\epsilon' = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2}.$$

Отметим, что замена двухслойной среды одной однородной в данном случае является приемом, который может быть обоснован только экспериментальной проверкой. Можно показать, что для симметричных конфигураций, показанных на рис. Ш.28, такая замена дает точные результаты. Для "гребенки", показанной на рис. Ш.29, емкость можно определить по приближенной формуле

$$C = \beta \cdot \ell_{\phi} \cdot \epsilon_{\text{эф}} \epsilon_0,$$

где C - емкость, пф; ϵ - диэлектрическая проницаемость подложки (либо $\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2}$); ℓ - длина совместной границы проводников, см; β - коэффициент, величина которого зависит от ширины проводников и их взаимного расположения. Для определения β используются кривые рис. Ш.30.

На рис. Ш.31 показана система параллельных прямолинейных полосок, расположенных в однородной среде. Путем решения краевой задачи были получены формулы частичных емкостей для произвольного числа полосок n . При $n \leq 6$ найдены следующие приближенные расчетные формулы "геометрической" емкости:

Для двух полосок

$$C_{12} = 1,56 + 0,41 \lg \frac{b_1 b_2}{a_1^2}. \quad (\text{Ш.59})$$

Для трех полосок

$$C_{12} = 1,18 + 0,31 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}; \quad (\text{Ш.60})$$

$$C_{13} = 0,58 + 0,27 \lg \frac{(b_1 b_2)^{13}}{(a_1 a_2)^{\frac{1}{3}} b_2^{\frac{1}{2}}};$$

Для четырех полосок

$$C_{12} = 1,10 + 0,29 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3};$$

$$C_{13} = 0,37 + 0,17 \lg \frac{b_1 b_2^{4,5}}{b_2^{1,4} (a_1 a_2)^{\frac{1}{2}}};$$

$$C_{14} = 0,36 + 0,18 \lg \frac{b_1 b_2}{(b_2 b_3)^{\frac{1}{2}} a_2^{\frac{1}{2}}};$$

$$C_{23} = 0,96 + 0,41 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}.$$

(Ш.61)

Для пяти полосок

$$C_{12} = 1,07 + 0,28 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3};$$

$$C_{13} = 0,32 + 0,15 \lg \frac{b_1 b_2^{1,5}}{b_2^{1,4} (a_1 a_2)^{\frac{1}{2}}};$$

$$C_{14} = 0,21 + 0,11 \lg \frac{b_1 b_2^{1,5}}{b_2 b_3 a_2^{\frac{1}{2}}};$$

$$C_{23} = 0,92 + 0,40 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2};$$

$$C_{24} = 0,25 + 0,15 \lg \frac{(b_2 b_4)^{\frac{13}{12}}}{(a_2 a_3)^{\frac{1}{2}} b_3^{\frac{1}{2}}}.$$

(Ш.62)

Для шести полосок

$$C_{12} = 1,06 + 0,28 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3};$$

$$C_{13} = 0,30 + 0,14 \lg \frac{b_1 b_2^{4,5}}{(a_1 a_2)^{\frac{1}{2}} b_2^{1,4}};$$

$$C_{14} = 0,18 + 0,09 \lg \frac{b_1 b_2^{1,5}}{b_2 a_2^{\frac{1}{2}} a_3};$$

$$C_{23} = 0,91 + 0,39 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2};$$

$$C_{24} = 0,22 + 0,14 \lg \frac{(b_2 b_4)^{\frac{13}{12}}}{(a_2 a_3)^{\frac{1}{2}} b_3^{\frac{1}{2}}};$$

$$C_{34} = 0,89 + 0,39 \lg \frac{b_2 b_4}{a_3^2}.$$

(Ш.63)

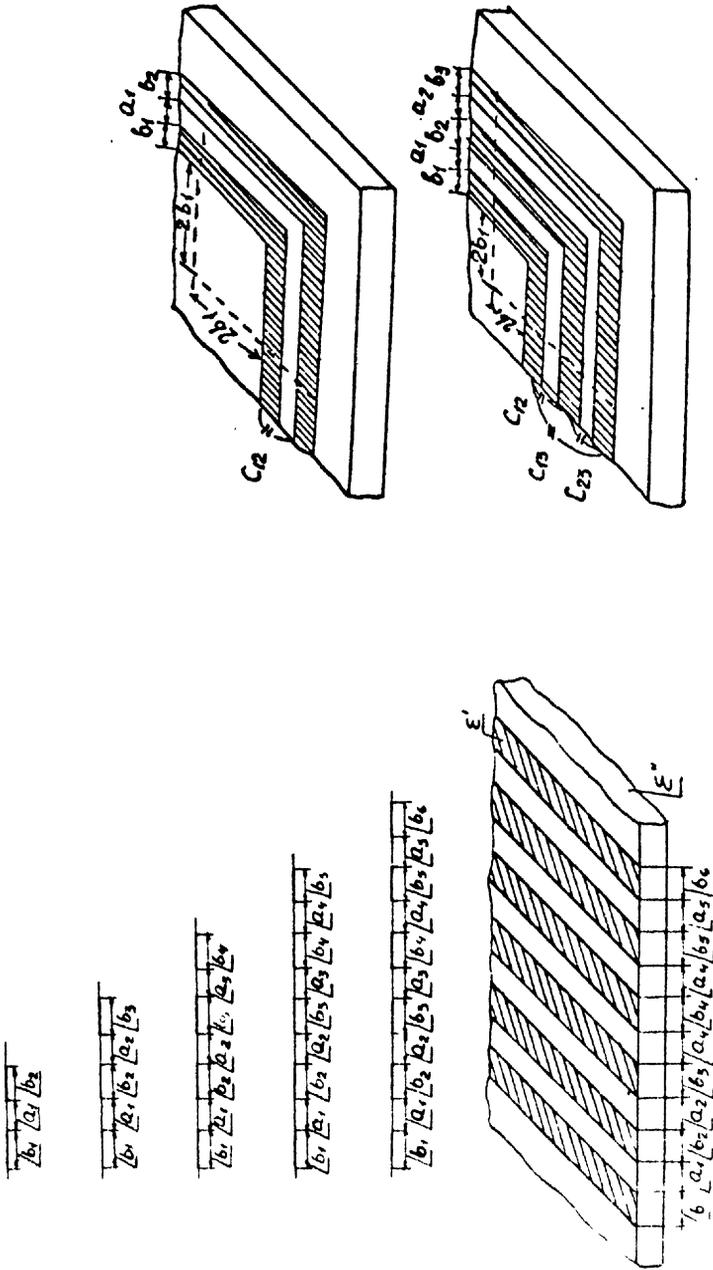


Рис. Ш.32. Проводники, изогнутые под прямым углом

Рис. Ш.31. Система параллельных проводников на диэлектрической подложке

Формулы остальных частичных емкостей легко найти из симметрии конфигураций. Например, для конфигурации из трех полосок из симметрии имеем $C_{23} = C_{12}$ и т.д.

Погрешность расчета по приведенным формулам не превышает 25%. Если проводники расположены на подложке, толщина которой много больше расстояния между крайними проводниками, то приближенно можно заменить подложку полуплоскостью и определить емкости, считая

$$\epsilon = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2}.$$

Если проводники расположены на одинаковом расстоянии от двух проводящих плоскостей (рис.Ш.28), то замена на "эквивалентную" однородную среду $\epsilon \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ является точной. В остальных случаях замены двухслойных сред на однородную необходима экспериментальная оценка погрешности.

Оценка емкостей в системе изогнутых под прямым углом параллельных проводников, лежащих на подложке (рис.Ш.32), может быть выполнена по формулам, полученным экспериментальным путем. Систему изогнутых проводников делят на две: совокупность параллельных проводников одинаковой длины, для которых справедливы приведенные выше формулы, и совокупность уголков. Наименьший уголок имеет размеры $2b_1$ (рис.Ш.32).

Для расчета геометрической емкости между уголками также используются формулы (Ш.59-Ш.63), но для определения полной емкости используется эквивалентная длина $L_{экв.}$, рассчитываемая по формулам:

для двух уголков

$$L_{экв.} = 6b_1 + \frac{b_2}{2} + a_1;$$

для трех уголков

в формулу C_{12} подставляют $L_{экв.} = 20,25b_1;$

в формулу C_{23} "- " $L_{экв.} = 26,23b_1;$

в формулу C_{13} "- " $L_{экв.} = 23,20b_1.$

Погрешность, связанная с величиной $L_{экв.}$, не превышает 10%.

В процессе проектирования конденсаторов микросхем необходимо учитывать величину пробивного напряжения. Это накладывает огра-

ничения на параметры р-п-перехода (емкости полупроводниковых микросхем) или материала и толщину диэлектрика (тонкопленочные емкости). Обычно конденсаторы проектируются "с запасом" в 2-3 раза по величине пробивного напряжения.

Конденсаторы полупроводниковых микросхем имеют следующие параметры ^{х)}:

удельная емкость - сотни пф/мм² (р-п-переход коллектор - база);
пробивное напряжение 20 в;
максимальная емкость 400 пф;
добротность ($f = 10$ Мц) I+I0;
допуск на номинал $\pm 20\%$.

Тонкопленочные конденсаторы, изготавливаемые по совмещенной технологии, имеют параметры:

удельная емкость - сотни и тысячи (окись тантала), пф/мм²;
максимальная емкость 500+5000 пф;
максимальное напряжение 20+50 в;
добротность ($f = 10$ Мц) I0+I00;
допуск на номинал $\pm 20\%$.

Конденсаторы гибридных тонкопленочных схем имеют следующие параметры:

удельная емкость 5000+15000 пф/см²;
максимальная емкость 20000 пф;
максимальное напряжение 30 в;
допуск на номинал $\pm 15+20\%$;
ТКЕ (I+5) $10^{-4} \frac{I}{\text{град}}$.

7. Расчет сопротивления резисторов микросхем

Типичные конфигурации пленочных резисторов показаны на рис. Ш.33, а диффузионных - на рис. Ш.34.

Расчет прямолинейного участка резистора ведется по формуле

$$R = \frac{l}{\sigma S} , \quad (\text{Ш.65})$$

где l - длина проводника;
 S - площадь поперечного сечения;
 σ - проводимость материала резистора.

х) Поскольку технология непрерывно совершенствуется, параметры изменяются. Приведены ориентировочные данные.

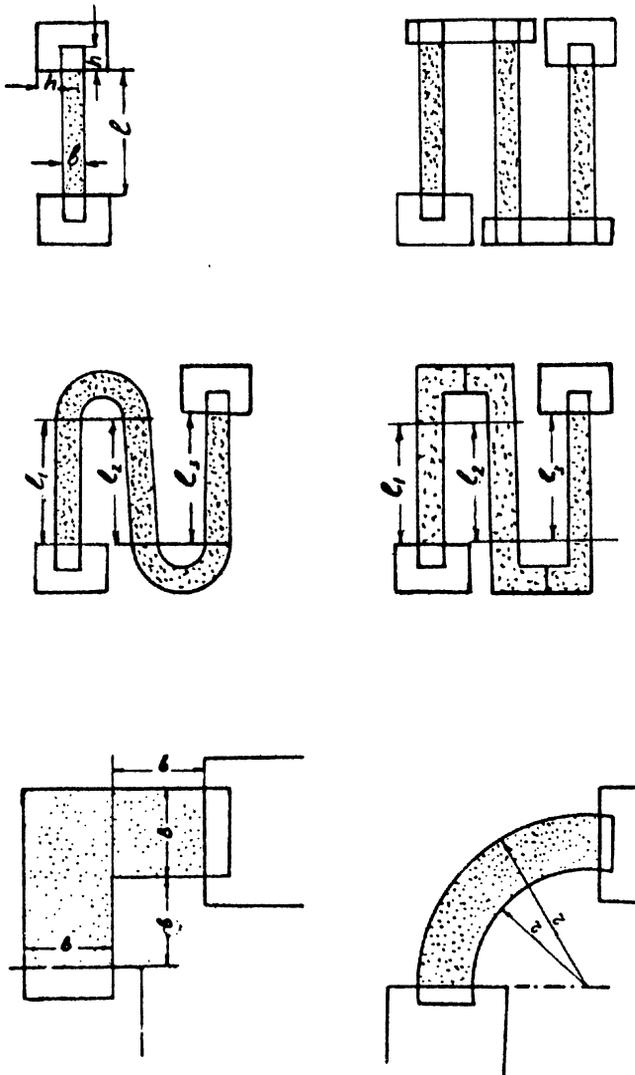


Рис.Ш.33. Конфигурации резисторов тонкопленочных микросхем

Для диффузионных резисторов берется средняя по толщине слоя проводимость. Если принять длину резистора равной его ширине, то сопротивление такого квадратного резистора, имеющего толщину δ , будет

$$R_0 = \frac{1}{\sigma \delta} \left[\frac{\text{ом}}{\text{см}} \right]. \quad (\text{Ш.66})$$

Зная R_0 , находим полное сопротивление резистора, помножив на число квадратов, содержащихся в резисторе.

Сопротивление изгибов определяется в результате решения краевой задачи для плотности тока. Для плавного закругления (рис. Ш.33,е) имеем формулу сопротивления:

$$R_{\text{кр.}} = \frac{1,57}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \cdot R_0, \quad (\text{Ш.67})$$

т.е. закругления содержат $1,57 / \ln \frac{r_1}{r_2}$ квадратов. Изгиб под углом 90° (рис. Ш.33,д) содержит 2,55 квадратов, т.е.

$$R_{\text{изг.}} = 2,55 R_0. \quad (\text{Ш.68})$$

При расчете диффузионных резисторов учитываются и особенности контактных площадок. Ниже приведены эмпирические формулы с учетом поправки такого рода (рис. Ш.34):

резистор прямолинейный

$$R = R_0(l + 2 \cdot 0,65); \quad (\text{Ш.69})$$

резистор изогнутой формы

$$R = R_0(l_1 + l_2 + 1 + 2 \cdot 0,65). \quad (\text{Ш.70})$$

Приведенные выше формулы служат для расчета резистора по заданному номинальному значению его сопротивления. В процессе проектирования резисторов необходимо еще учитывать такие важные факторы, как разброс параметров за счет неточности изготовления; температурную зависимость сопротивления; максимально-допустимую мощность, выделяемую в резисторе в виде тепла; частотную зависимость резисторов. Диффузионные резисторы полупроводниковых микросхем имеют поверхностное сопротивление от единиц до сотен ом на квадрат. Соответственно номиналы резисторов находятся обычно в пределах от единиц ом до десятков ком. Точность изготовления диффузионных резисторов определяется технологическими факторами: точностью изготовления исходной маски; точностью процесса травления;

точностью контроля концентрации примесей в процессе диффузии. Все три фактора приводят к отклонениям от заданного номинала порядка $\pm 10\%$. Различные резисторы, изготовленные в одном и том же

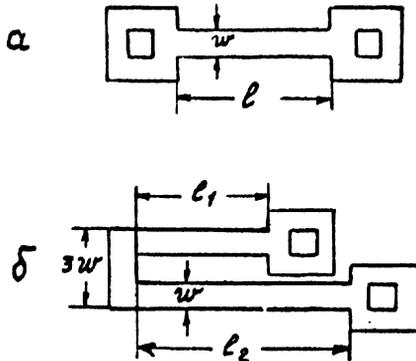


Рис. Ш.34. Конфигурации резисторов полупроводниковых интегральных схем:
а - прямолинейный; б - изогнутой формы

технологическом процессе, имеет меньший разброс параметров - приблизительно $\pm 3\%$.

Зависимость сопротивления от температуры определяется в основном температурной зависимостью подвижности ($\sigma = \mu n q$) электронов и дырок. Температурная чувствительность подвижности, в свою очередь, зависит от концентрации примесей. Обычно подвижность уменьшается с увеличением температуры, так что сопротивление резистора имеет положительный температурный коэффициент. Этот коэффициент возрастает с увеличением $R \frac{\text{OM}}{\text{OM}}$.

Например,

$$R = 300 \frac{\text{OM}}{\text{OM}} ; \text{TKC} = 0,28 \% / \text{град} ;$$

$$R = 50 \frac{\text{OM}}{\text{OM}} ; \text{TKC} = 0,09 \% / \text{град} .$$

Пределы ТКС $(5+30) 10^{-4} \frac{1}{\text{град}}$.

Максимальная мощность, рассеиваемая резистором, определяется тем, что чрезмерный нагрев резистора приводит к появлению нелинейности вольт-амперной характеристики. Температура резистора, в свою очередь, зависит от способа отвода тепла. Для приближенных

оценок можно считать, что максимальная мощность диффузионных резисторов составляет 0,1 Вт. Максимальное напряжение на выводах резистора ограничено величиной обратного напряжения р-п-перехода подложки. Это напряжение (порядка десятков вольт) зависит от концентрации примесей в материале подложки.

Зависимость сопротивления от частоты определяется частотными характеристиками эквивалентных RC -линий. Экспериментальная частотная характеристика диффузионного резистора микросхемы при $R = 3,2 \text{ ком}$ показана на рис. Ш.35, а схема измерений - на рис. Ш.36. Тонкопленочные резисторы, изготавливаемые по совмещенной технологии, имеют следующие параметры:

диапазон сопротивлений $R_0 = 40 \div 4000 \frac{\text{ом}}{\text{см}}$;

максимальная величина сопротивления составляет сотни ком;

пробивное (постоянное) напряжение $\pm 200 \text{ в}$;

максимальная мощность 0,5 Вт;

температурный коэффициент $10^{-4} + 10^{-3} \frac{\text{I}}{\text{град}}$;

допуск на номинал $\pm 5\%$.

Частотный предел существенно шире, чем у диффузионных резисторов, так как паразитные емкости значительно меньше. Сравнительные характеристики показаны на рис. Ш.37.

Для диффузионного резистора (1) $R = 10 \text{ ком}$; $R_0 = 200 \frac{\text{ом}}{\text{см}}$;

никромового резистора (2) $R = 10 \text{ ком}$; $R_0 = 400 \frac{\text{ом}}{\text{см}}$.

Максимальная мощность определяется температурой, при которой в резисторе наступают необратимые изменения. Эта температура зависит от многих факторов: теплопроводности подложки, расположения резистора на подложке, расположения и мощности соседних резисторов и т.д. Поэтому величина 0,5 Вт может служить только для ориентировочных оценок.

Точность изготовления резисторов зависит от точности изготовления на различных этапах технологического процесса.

Тонкопленочные резисторы гибридных пленочных микросхем имеют типовые параметры:

сопротивление квадрата $R_0 = 300 \div 3000 \frac{\text{ом}}{\text{см}}$; максимальная величина сопротивления 1 Мом; максимальная мощность (2+5)Вт/см²;

температурный коэффициент $\sim 10^{-4} \frac{\text{I}}{\text{град}}$; допуск на номинал $\pm 5\%$.

Приведенные значения параметров нужно рассматривать как данные, соответствующие определенному уровню технологии. По мере ее усовершенствования параметры изменяются.

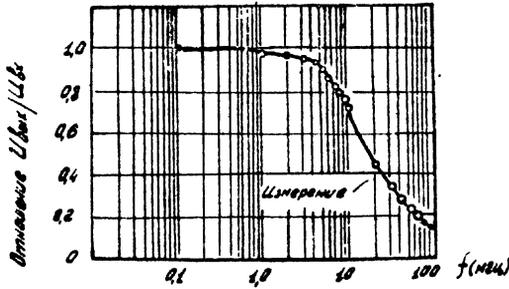


Рис. Ш.35. Частотная характеристика диффузионного резистора

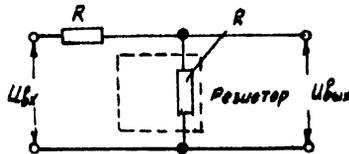


Рис. Ш.36. Частотные характеристики резисторов:

1 - диффузионного; 2 - тонкопленочного

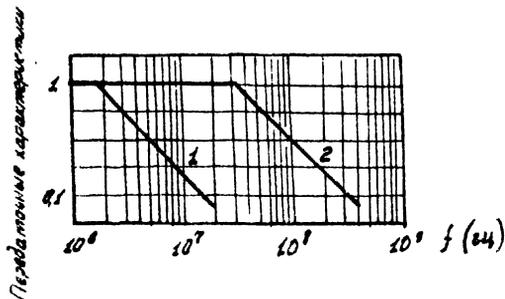


Рис. Ш.37. Схема для измерения частотных характеристик

8. Индуктивные элементы микросхем

Индуктивность является, как известно, важным элементом схемотехники. С ее помощью реализуются колебательные контуры и существенно облегчается построение качественных частотно-избирательных схем, использующих явление резонанса, а также нерезонансные R, L - фильтры (дроссели). Значение индуктивности для микроэлектроники (в этом смысле) возрастает в связи с миниатюризацией устройств приема-передачи информации (связи), а также вычислительных машин непрерывного действия. Радиочастотные методы находят применение также и для построения вычислительных машин дискретного действия.

Поэтому проблема индуктивности является одной из наиболее актуальных на современном уровне развития микроэлектроники, когда схемотехника еще широко использует различные элементы, а методы расчета во многом заимствуются из "обычной" радиотехники, в которой используются дискретные элементы.

Среди различных плоских тонкопленочных конфигураций наибольшей индуктивностью обладают плоские спирали. В настоящее время применяются еще и дискретные катушки, в миниатюризации которых достигнуты значительные успехи. Они получаются путем намотки очень тонкого провода на диэлектрический каркас и могут содержать миниатюрный ферритовый сердечник. Диаметр катушек уменьшен до 2+3 мм, длина 4+6 мм, индуктивность - от единиц до тысяч мкГн. Катушки имеют незначительную температурную нестабильность (менее $\pm 10^{-4}$ град $^{-1}$) и выдерживают температуру порядка 100+150°C.

Добротность обычно в несколько раз меньше, чем у крупных катушек с такой же индуктивностью, из-за большого сопротивления тонкого провода. Она достигает 30+100 единиц в диапазоне частот 70+0,03 МГц.

Несмотря на эти достижения, применение дискретных катушек нежелательно, так как преимущества микроэлектроники наиболее полно проявляются тогда, когда вся схема изготавливается в едином технологическом цикле при групповом методе производства. Кроме того, технологические трудности изготовления сверхтонкой проволоки и миниатюрных сердечников приводят к большому проценту брака.

Пленочные плоские (круглые и прямоугольные) спирали изготавливаются в едином технологическом процессе с остальными элементами пленочной микросхемы. Обычно индуктивность не превышает единиц микрогенри. Использование ферритовых пленок позволяет значительно увеличить индуктивность и добротность, уменьшить "паразитные" магнитные потоки и магнитные влияния на другие элементы схемы. В диапазоне СВЧ необходимы небольшие индуктивности (доли микрогенри), при этом можно использовать прямолинейные проводники и полосковые линии, так что применение спиралей необязательно.

Поскольку плоская спираль является практически единственной плоской конфигурацией индуктивного элемента, желательно использовать ее в более широком диапазоне частот (т.е. на возможно более низких частотах). Для этой цели применяется экран, разрезанный на сегменты так, чтобы предотвратить возникновение наведенных токов в нем, а следовательно, и уменьшение индуктивности за счет экрана. Кроме того, близко расположенный экран увеличивает межвитковые емкости и тем самым снижает диапазон частот, в котором индуктивность резонирует с межвитковой емкостью.

Независимо от присутствия экрана спираль имеет распределенные параметры R , L и C и поэтому фактически является длинной линией. Строгий анализ такой направляющей системы средствами теории поля (на основе уравнений Максвелла) не был еще выполнен из-за математических трудностей. Если воспользоваться теорией длинных линий, то необходимо знать параметры R , L , C . Их определение для спирали также связано с большими математическими трудностями. Поэтому используется приближенный подход. Спираль заменяется системой концентрических колец, соединенных последовательно. В этом случае задача сводится к определению R , L , C для концентрических колец, что много проще, чем для спирали. На достаточно низких частотах спираль является индуктивным элементом.

При проектировании пленочных катушек полезно помнить следующие положения. Индуктивность одновитковой петли определяется в основном площадью заключенной в плоскости петли. Для заданной площади круглая петля имеет наименьшую длину провода и наиболее высокую добротность. При сильной связи между витками индуктивность катушки возрастает, как квадрат числа витков. В большинстве случаев форма и размеры поперечного сечения проводников мало влияют на индуктивность.

Как показали расчеты, применение магнитоэлектрической подложки увеличивает индуктивность плоской спирали не более чем в 2 раза. Если образовать двустороннее магнитное покрытие без воздушных зазоров, то увеличение индуктивности может быть значительным. Например, по данным расчета для тонкопленочных спиральных катушек можно достичь увеличения индуктивности в $(0,1+0,5)\mu$ раз, где μ - магнитная проницаемость покрытия.

Увеличить индуктивность спиральных катушек до 100+200 мкГн можно компоновкой плоских катушек в общий пакет.

При использовании индуктивных элементов в колебательных системах и фильтрах большое значение имеет добротность катушки. Величина добротности ограничивается сопротивлением пленочных проводников, потерями в диэлектрических подложках и ферромагнитных покрытиях. Сопротивление проводника можно уменьшить, используя материал с малым удельным сопротивлением и увеличив толщину пленки. Однако используемые в пленочной технологии металлы имеют проводимость одного порядка, а толщину пленки нецелесообразно увеличивать сверх определенного предела из-за поверхностного эффекта. Имеется еще возможность такого выбора соотношения между шириной катушки и ее средним радиусом, при котором заданная индуктивность получается с минимальной длиной провода.

Следует иметь в виду, что в плоских проводниках плотность тока увеличивается у острых изгибов. Поэтому в этих местах сопротивление спирали увеличивается.

Необходимо, по возможности, удалить индуктивный элемент от стенок корпуса и других металлических деталей. С уменьшением расстояния между плоской спиралью и металлической поверхностью индуктивность уменьшается, а межвитковая емкость растет. На достаточно низких частотах эту межвитковую емкость можно заменить эквивалентной емкостью с включением на зажимах спирали.

Применение ферромагнитных покрытий позволяет увеличить добротность принципиально новым способом. Поскольку заданная величина индуктивности достигается при меньшем числе витков, сопротивление проводника (пропорциональное его длине) также уменьшается. Однако и на этом пути имеются существенные ограничения. Потери в ферромагнитных слоях зависят от частоты. С увеличением частоты доб-

Ротность вначале растет по линейному закону, но, начиная с определенных частот, из-за потерь в ферромагнитных материалах наблюдается ее относительное уменьшение. В целом применение ферромагнитных покрытий не дает пока значительного выигрыша в добротности в диапазоне десятков и сотен мегагерц (из-за потерь в ферромагнитных материалах).

Отметим кратко, какие пути существуют для "подстройки" индуктивности плоских спиралей. Вообще, о подстройке индуктивности можно говорить только применительно к диапазону достаточно низких частот, на которых спираль представляет собой индуктивность. На достаточно высоких частотах она представляет систему связанных длинных линий и в этом случае следует говорить об изменении параметров этой системы, например, об изменении входного сопротивления.

Индуктивность плоских спиралей, расположенных на немагнитной подложке, можно изменять путем удаления межвитковых перемычек, специально предусмотренных для этой цели. Аналогичный прием применяется для изменения сопротивления пленочных резисторов. Индуктивность можно изменять за счет специально предусмотренных металлических покрытий, их форму и расположение можно подбирать. Однако при этом одновременно изменяется и межвитковая емкость. Этот прием дает удовлетворительные результаты в диапазоне десятков мегагерц, где спираль является системой с распределенными параметрами. В этом случае имеет место не "подстройка индуктивности", а изменение параметров функционального элемента.

При наличии ферромагнитных покрытий прямой доступ к виткам спирали закрыт, поэтому подстройка при помощи межвитковых перемычек исключается. Остается способ изменения параметров спирали за счет проводящих пленок. Но использовать его можно только при низких значениях магнитной проницаемости материала покрытия. В противном случае магнитные потоки замыкаются по ферромагнитным покрытиям, а проводящая пленка перестает выполнять свои функции.

Остановимся еще на перспективах дальнейшей миниатюризации пленочных индуктивных элементов. Имеется ряд ограничений, препятствующих уменьшению размеров плоских спиралей. Во-первых, ограничения технологического характера. При данном технологическом процессе ширина проводящей полоски и расстояние между полосками нельзя сделать меньше определенной величины из-за падения точности изготовления, увеличения брака, значительного ухудшения четкости краев спирали.

Во-вторых, уменьшение размеров индуктивного элемента влечет за собой уменьшение добротности.

Взаимоиндукцию плоских спиральных катушек можно изменять, варьируя их взаимное расположение. Коэффициент взаимной индуктивности между катушками, расположенными в одной плоскости, можно увеличить за счет ферромагнитных покрытий. (Коэффициент связи не изменяется, так как L и M увеличиваются одновременно). Если они расположены в разных плоскостях, то ферромагнитные покрытия ослабляют взаимную индуктивность, так как магнитные потоки замыкаются через эти покрытия.

Следовательно, при помощи магнитных покрытий можно осуществить экранирование. Проводящие пленки также можно использовать для ослабления "паразитных" влияний за счет магнитного поля на высоких частотах.

Интересные результаты получаются при вариации расположения плечочных спиралей. Наибольший коэффициент взаимной индукции обеспечивается при коаксиальном и концентрическом расположении катушек. Если они располагаются на одной оси, но центры смещены, взаимная индуктивность уменьшается. Дальнейшее уменьшение M достигается смещением осей спиралей. Выбором специального расположения двух спиралей можно добиться полного устранения магнитной связи между спиральями ($M=0$), независимо от того, расположены они в однородной или слоистой среде.

Индуктивные элементы полупроводниковых микросхем, осажженные на кремнии, имеют значительно меньшую добротность. Например, спираль из 20 витков диаметром 8,3 мм, осажженная на кремнии, $\sigma = 0,02 \text{ ом} \cdot \text{см}^{-1}$ имеет индуктивность несколько микрогенри и добротность в несколько единиц в диапазоне десятков мегагерц. Как указывалось выше, индуктивность проводника, расположенного над слоем полупроводника, зависит от частоты из-за поверхностного эффекта в полупроводнике. К тому же добротность зависит от потерь в полупроводнике.

Приведем расчетные формулы для определения индуктивности. Примем, что все размеры даны в сантиметрах, индуктивность - в микрогенри. Предполагается, что немагнитные проводники находятся в однородной немагнитной среде. Для среды с относительной магнитной проницаемостью μ результаты расчетов нужно умножить на μ .

Прямолинейный проводник длиной l , шириной b и толщиной d , имеющий сечение в виде прямоугольника, обладает индуктивностью

$$L = 2 \cdot 10^{-3} \cdot l \left(\ln \frac{2l}{b+d} + 0,5 + 0,224 \frac{b+d}{l} \right). \quad (\text{III.71})$$

В микросхемах обычно $b \gg d$ и $b \ll l$, следовательно,

$$L \approx 2 \cdot 10^{-3} \cdot l \left(\ln \frac{2l}{b} + 0,5 \right). \quad (\text{Ш.72})$$

Одновитковые петли (см. рис. 22,а,б). Приводимая ниже формула справедлива для любой правильной фигуры, расположенной в одной плоскости, и для любого поперечного сечения проводника при условии, что средний периметр l петли больше периметра поперечного сечения проводника

$$L = 2 \cdot 10^{-3} \cdot l (\ln A - B), \quad (\text{Ш.73})$$

где

$A = \frac{2l}{b+d} \approx \frac{2l}{b}$ для прямоугольных проводников шириной b и толщиной d .

$B = 2,451$ - для круга

$B = 2,853$ - для квадрата.

Индуктивность плоской круговой спирали и последовательно соединенных концентрических колец вычисляется по формуле

$$L = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot N^2 a \left\{ \left(\ln \frac{8a}{c} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{24} \left(\frac{c}{a} \right)^2 \left(\ln \frac{8a}{c} + 3,583 \right) \right\}, \quad (\text{Ш.74})$$

где N - число витков;

a - средний радиус $\frac{R_1 + R_2}{2}$;

$c = R_2 - R_1$ - полоса, занятая витками катушки.

Если $R_1 = 0$, т.е. спираль доходит до центра, формула упрощается

$$L = 13,8 \cdot 10^{-3} a N^2.$$

Вместо полного выражения (Ш.74) можно использовать приближенную формулу

$$L \approx \frac{0,394 a^2 N^2}{8a + 11c}. \quad (\text{Ш.75})$$

Экспериментальным путем установлена также следующая формула:

$$L = 24,5 \cdot 10^{-3} a \cdot N^{\frac{5}{3}} \ln \frac{8a}{c}. \quad (\text{Ш.76})$$

Для плоской квадратной спирали (рис. Ш.22,д) индуктивность определяется по экспериментальной формуле

$$L = 24,1 \cdot 10^{-3} a \cdot N^{\frac{5}{3}} \ln \frac{8a}{c}. \quad (\text{Ш.77})$$

Для проектирования целесообразно использовать номограмму (см. рис. Ш.38), пригодную для определения индуктивности круглых и квадратных плоских катушек.

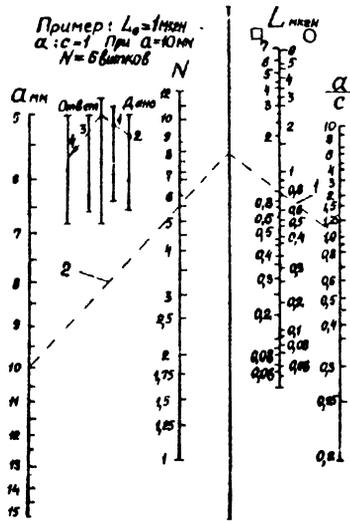


Рис. Ш.38. Номограмма для расчета плоских спиралей

Коэффициент взаимной индукции для двух параллельных проводников равной длины определяется по формуле

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \left\{ l \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + D^2} + l}{D} - \sqrt{l^2 + D^2} + D \right\}, \quad (\text{Ш.78})$$

где l - длина проводников;

D - расстояние между их осевыми линиями.

Плоские спирали также можно приближенно заменить эквивалентными витками, после чего определить коэффициент взаимной индукции между ними (M_0). Взаимная индукция между двумя плоскими спиралями с числом витков m и n определяется по формуле

$$M = m \cdot n \cdot M_0. \quad (\text{Ш.79})$$

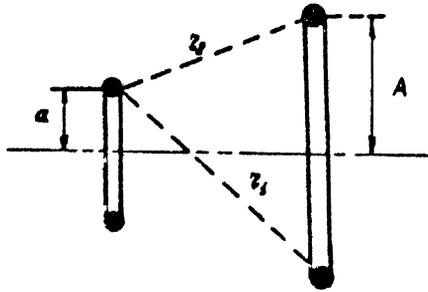


Рис.Ш.39. Коаксиальные витки

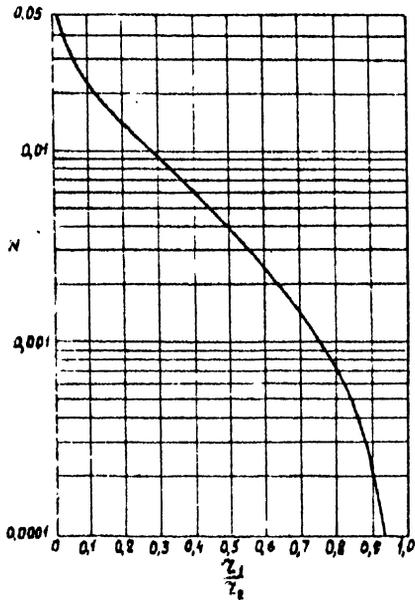


Рис.Ш.40. Вспомогательная зависимость для определения коэффициента взаимной индукции

Для двух круговых коаксиальных петель, лежащих в параллельных плоскостях (рис.Ш.39), формула для определения взаимной индукции имеет вид

$$M_{0} = N \sqrt{A a} , \quad (\text{Ш.80})$$

где a и A - радиусы витков, а величина N определяется по кривой (рис. Ш.40).

9. Многослойные RC-структуры с распределенными параметрами

Многослойные RC-структуры имеют важное значение при проектировании интегральных схем. Эти структуры используются как самостоятельные схемные элементы в микросхемах.

Рассмотрим простейшую RC-структуру с распределенными параметрами, состоящую из двух резистивных слоев, разделенных слоем диэлектрика (рис. Ш.41). Такая структура получила в литературе название R-C-NR-структуры (R и NR - величины сопротивления слоев). На внешних зажимах структура представляет собой линейный четырехполюсник. На рис. Ш.41 показаны два различных варианта включения источников на внешних зажимах. В первом из них (рис.Ш.41,а) между точками a, b, c, d и нулевой точкой, которую мы принимаем за начало отсчета потенциалов, включены источники напряжений, следовательно, напряжения U_a, U_b, U_c, U_d известны. Линейная связь между токами I_a, I_b, I_c, I_d и напряжениями U_a, U_b, U_c, U_d выражается Y -матрицей, элементы которой имеют размерность проводимости

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} = [Y] \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \end{bmatrix}, \quad \text{где } [Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{Ш.81})$$

Во втором варианте (рис.Ш.41,б) между зажимами a, b, c, d включены источники тока, следовательно, токи J_1, J_2, J_3, J_4 заданы. Линейная связь токов с напряжениями $U_{ab}, U_{bc}, U_{cd}, U_{da}$ выражается Z -матрицей, элементы которой имеют размерность сопротивления

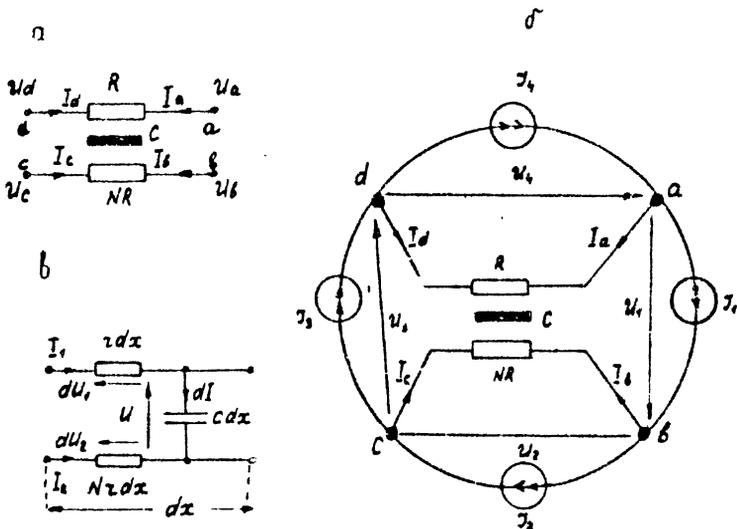


Рис.3.41. R-C-NR-структура:

а - с источниками напряжения;
 б - с источниками тока;
 в - элемент длиной линии

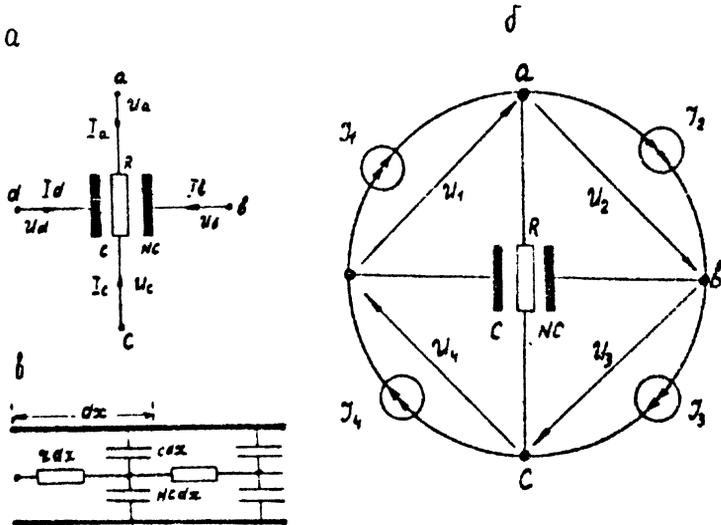


Рис.3.42. C-R-NC-структура:

а - с источниками напряжения ;
 б - с источниками тока;
 в - элемент длиной линии

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{cd} \\ U_{da} \end{bmatrix} = [Z] \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}; \quad [Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{Ш.82})$$

Матрицы Y и Z называют неопределенными. Отметим их свойства. На основании принципа взаимности, справедливого для линейных пассивных четырехполосников, имеем $Z_{ik} = Z_{ki}$; $Y_{ik} = Y_{ki}$. Следовательно, матрицы Z и Y симметричны относительно главной диагонали. По первому закону Кирхгофа запишем

$$I_a + I_b + I_c + I_d = 0; \quad (\text{Ш.83})$$

а на основании второго закона Кирхгофа

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0. \quad (\text{Ш.84})$$

Выберем напряжения источников следующим образом:

$$U_a \neq 0, \quad U_b = U_c = U_d = 0 \quad \text{При этом}$$

$$I_a = Y_{11} U_a; \quad I_b = Y_{21} U_a; \quad I_c = Y_{31} U_a; \quad I_d = Y_{41} U_a.$$

Складывая эти равенства и учитывая выражение (Ш.83), получим

$$Y_{11} + Y_{21} + Y_{31} + Y_{41} = 0. \text{ Аналогичным образом можно показать, что}$$

сумма элементов любого столбца матрицы Y равна нулю. В силу симметрии матрицы Y относительно главной диагонали сумма элементов каждой строки также равна нулю.

Таким же образом можно прийти к выводу о равенстве нулю суммы элементов каждого столбца матрицы Z , используя выражение (Ш.84) и подбирая величины токов источников J_1, J_2, J_3, J_4 . Матрица Z симметрична относительно главной диагонали, значит сумма элементов каждой строки тоже равна нулю.

Таким образом, чтобы записать матрицы Z и Y , достаточно знать только три элемента каждого столбца или каждой строки. Четвертый элемент можно получить из условия равенства нулю сумм элементов каждого столбца или строки.

Теперь перейдем к R-C-NR-линии. Участок длиной $d\alpha$, расположенный на расстоянии x от ее начала, показан на рис. Ш.4I, в. Напряжение между проводниками получает приращение из-за падения напряжений на сопротивлениях $r d\alpha$ и $n r d\alpha$, а токи в проводниках I_1 и I_2 получают приращения из-за емкостного тока между проводниками $j \omega c d\alpha \cdot U$. На основании законов Кирхгофа имеем:

$$\frac{dU}{dx} = I_2 N \cdot \tau - I_1 \cdot \tau, \quad (\text{Ш.85})$$

$$\frac{dI_1}{dx} = -j\omega C U, \quad (\text{Ш.86})$$

$$\frac{dI_2}{dx} = j\omega C U, \quad (\text{Ш.87})$$

где τ и C - сопротивление и емкость на единицу длины линии.

Дифференцируя уравнение (Ш.85) и подставляя выражения (Ш.86) и (Ш.87) в (Ш.85), получим

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \tau(1+N)j\omega C U. \quad (\text{Ш.88})$$

Это решение можно записать следующим образом:

$$U = A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x}, \quad (\text{Ш.89})$$

где
$$\alpha = \sqrt{j\omega C(1+N)\tau}. \quad (\text{Ш.90})$$

Подставляя уравнение (Ш.89) в (Ш.86) и (Ш.87) и интегрируя, получим

$$I_1 = -\frac{j\omega C}{\alpha} (A e^{\alpha x} - B e^{-\alpha x}) + \mathcal{D}_1, \quad (\text{Ш.91})$$

$$I_2 = \frac{j\omega C}{\alpha} (A e^{\alpha x} - B e^{-\alpha x}) + \mathcal{D}_2. \quad (\text{Ш.92})$$

На основании закона Ома (рис. Ш.41)

$$dU_1 = I_1 \tau dx, \quad dU_2 = I_2 N \tau dx.$$

Интегрируя, находим

$$U_1 = \int I_1 \tau dx + G_1; \quad U_2 = \int I_2 N \tau dx + G_2. \quad (\text{Ш.93})$$

$$(\text{Ш.94})$$

Подставив в эти выражения I_1 и I_2 из уравнений (Ш.91) и (Ш.92) и определив G_1 и G_2 из условия $U_1=0$ и $U_2=0$ при $x=0$, получим выражения для $U_1(x)$ и $U_2(x)$, в которые войдут четыре постоянные A, B, \mathcal{D}_1 и \mathcal{D}_2 . Полагая $x=0$ и $x=l$, где l - длина линии, найдем напряжения на внешних выводах (рис. Ш.41,а):

$$U(0) \equiv U_{dc}; \quad U(l) \equiv U_{ab}; \quad U_1(l) \equiv U_{da}; \quad U_2(l) \equiv U_{cb}.$$

По второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма этих напряжений равна нулю. Из этого условия можно найти связь между двумя постоянными; в результате останутся только три постоянные. Обозначив третью постоянную через G , получим:

$$U_{dc} = A + B, \quad (\text{Ш.95})$$

$$U_{a\ell} = A e^{\theta} + B e^{-\theta}, \quad (\text{Ш.96})$$

$$U_{ad} = \frac{1}{1+N} [A(-1+e^{\theta}) + B(-1+e^{-\theta})] + G, \quad (\text{Ш.97})$$

$$U_{\ell c} = \frac{N}{1+N} [A(-e^{\theta}+1) + B(-e^{-\theta}+1)] + G, \quad (\text{Ш.98})$$

$$\text{где } \theta = \alpha \ell = \sqrt{j\omega(1+N)Rc}; \quad \tau \ell = R; \quad c \ell = C. \quad (\text{Ш.99})$$

Полагая $x=0$ и $x=\ell$ и обозначив (рис.Ш.4I,а)

$$I_1(0) \equiv I_d, \quad I_1(\ell) \equiv -I_a, \quad I_2(0) \equiv I_c, \quad I_2(\ell) \equiv -I_{\ell},$$

получим:

$$I_a = \frac{\theta}{(1+N)R} (A e^{\theta} - B e^{-\theta}) + \frac{G}{R}, \quad (\text{Ш.100})$$

$$I_{\ell} = -\frac{\theta}{(1+N)R} (A e^{\theta} - B e^{-\theta}) + \frac{G}{NR}, \quad (\text{Ш.101})$$

$$I_c = \frac{\theta(A-B)}{(1+N)R} - \frac{G}{NR}, \quad (\text{Ш.102})$$

$$I_d = -\frac{\theta(A-B)}{(1+N)R} - \frac{G}{R}. \quad (\text{Ш.103})$$

По первому закону Кирхгофа сумма токов равна нулю, поэтому выражения (Ш.100-Ш.103) также содержат три постоянные вместо четырех

Теперь можно построить неопределенные матрицы $[Z]$ и $[Y]$.

На основании законов Кирхгофа можно записать

$$\begin{aligned} U_{a\ell} &= U_a - U_{\ell}, & I_a &= -J_1 + J_4, \\ U_{\ell c} &= U_{\ell} - U_c, & I_{\ell} &= -J_2 + J_1, \\ U_{ad} &= U_a - U_d, & I_c &= -J_3 + J_2, \\ U_{dc} &= U_d - U_c, & I_d &= -J_4 + J_3. \end{aligned} \quad (\text{Ш.104})$$

Эти выражения позволяют ввести в уравнения (Ш.95-Ш.103) источники напряжения U_a, U_{ℓ}, U_c, U_d и источники тока J_1, J_2, J_3, J_4 . Нам необходимо получить матрицы $[Y]$ и $[Z]$ рассматриваемой $R-C-NR$ -цепи. Чтобы получить выражение (Ш.81), выразим постоянные A, B, G через напряжения из (Ш.95-Ш.99) и подставим их в уравнения для токов (Ш.100-Ш.103). Из четырех напряжений (Ш.95-Ш.98) только три можно задать независимо, четвертое определяется выражением (Ш.84). Отбрасывая одно из

равенств, например (Ш.98), выразим три постоянные А, В, G через напряжения U_{ad} ; $U_{a\bar{c}}$; U_{dc} . Подставляя их в (Ш.100+Ш.102), получим выражения для токов I_a, I_c, I_e . Значение тока I_d найдем из уравнения (Ш.83). Далее, воспользовавшись равенствами (Ш.104), получим выражения (Ш.81), в которых матрица [Y] выражается так:

$$[Y] = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \theta \operatorname{cth} \theta + N & 1 - \theta \operatorname{cth} \theta & \theta \operatorname{csch} \theta - 1 & -\theta \operatorname{csch} \theta - N \\ 1 - \theta \operatorname{cth} \theta & \theta \operatorname{ctn} \theta + \frac{1}{N} & -\theta \operatorname{csch} \theta - \frac{1}{N} & \theta \operatorname{csch} \theta - 1 \\ \theta \operatorname{csch} \theta - 1 & -\theta \operatorname{csch} \theta - \frac{1}{N} & \theta \operatorname{cth} \theta + \frac{1}{N} & 1 - \theta \operatorname{cth} \theta \\ -\theta \operatorname{csch} \theta - N & \theta \operatorname{csch} \theta - 1 & 1 - \theta \operatorname{cth} \theta & \theta \operatorname{cth} \theta + N \end{bmatrix} \quad (\text{Ш.105})$$

Чтобы получить уравнение (Ш.82), необходимо, наоборот, выразить напряжения U_{ik} через токи I_a, I_c, I_e, I_d , которые затем выражаются через токи источников J_1, J_2, J_3, J_4 при помощи выражений (Ш.104). Матрица [Z] имеет такой вид:

$$[Z] = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{N+1}{\operatorname{th} \theta} & -N \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & -\frac{N+1}{\operatorname{sh} \theta} & -\operatorname{th} \frac{\theta}{2} \\ -N \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \frac{N}{N+1} (\theta + 2N \operatorname{th} \frac{\theta}{2}) & -N \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & -\frac{N}{N+1} (\theta - 2 \operatorname{th} \frac{\theta}{2}) \\ -\frac{N+1}{\operatorname{sh} \theta} & -N \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \frac{N+1}{\operatorname{th} \theta} & -\operatorname{th} \frac{\theta}{2} \\ -\operatorname{th} \frac{\theta}{2} & -\frac{N}{N+1} (\theta - 2 \operatorname{th} \frac{\theta}{2}) & -\operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \frac{1}{N+1} (N\theta + 2 \operatorname{th} \frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} \quad (\text{Ш.106})$$

Располагая матрицами [Y] и [Z], можно получить формулы параметров всех подсетей R-C-NR-структуры. Способ образования подсетей следующий. Первые 13 подсетей представляют собой двухполосники, поэтому параметром является входное сопротивление двухполосника. Следующие три конфигурации (I4-I6 на рис. Ш.43) представляют собой трехполосники при $N=0$.

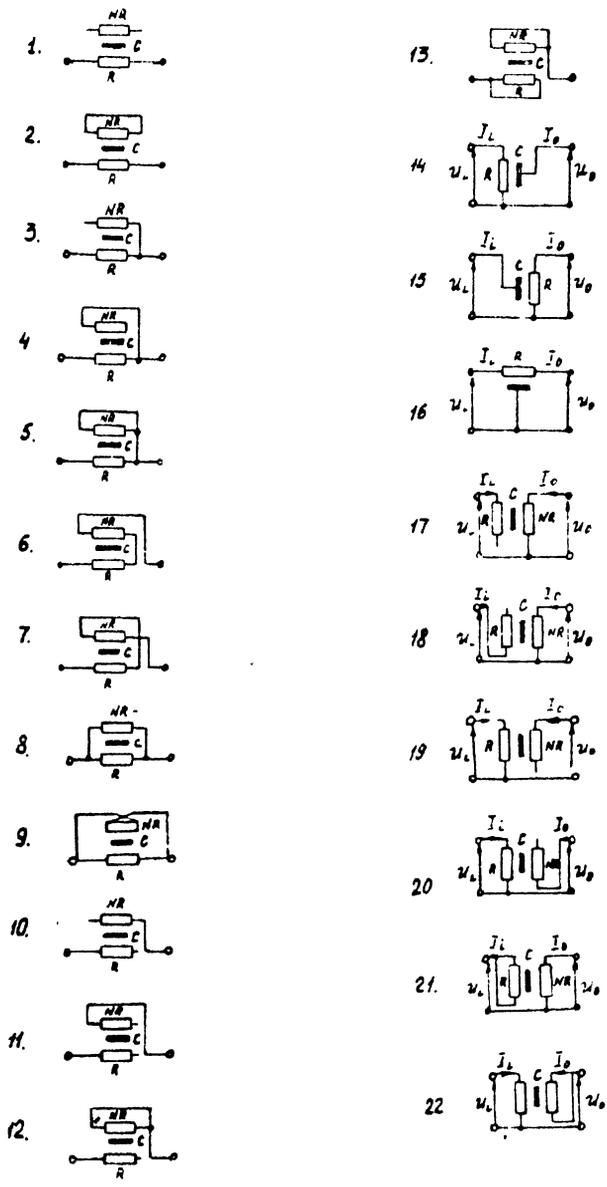
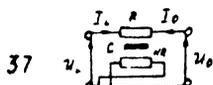
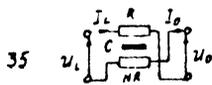
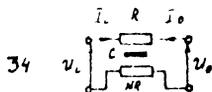
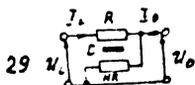
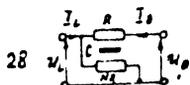
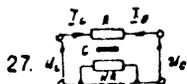
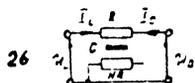
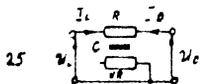


Рис. П.43. Подсхемы R-C-NR- структуры



Они характеризуются любой системой дифференциальных параметров. В табл. Ш.4 приведены матрицы Z - параметров. На рис.Ш.43 приведены 15 подсхем (I7-3I), представляющих трехполосники при условии $N \neq 0$. Для них приведены Z или Y -параметры, в зависимости от удобства их получения из неопределенных матриц (примеры приведены ниже). Следующие шесть конфигураций (32-37) являются четырехполосниками при $N \neq 0$. Для них приведены Z -параметры. В качестве примера использования неопределенных матриц рассмотрим способ получения параметров некоторых подсхем.

Пример 1. Определим входное сопротивление двухполосника конфигурации I (рис. Ш.43). Имеем $I_a = -I_d, I_c = I_f = 0$. Эти условия нам заданы. Из уравнений (Ш.104) находим $J_1 = J_2 = J_3$. Заданные условия будут выполнены, если к зажимам $a-d$ подключить источник тока

$J_4 = J_a = -J_d$, а остальные источники отключить ($J_1 = J_2 = J_3 = 0$). Используя выражения (Ш.82) и (Ш.106) для матрицы Z , найдем

$$U_4 = Z_{41} J_1 + Z_{42} J_2 + Z_{43} J_3 + Z_{44} J_4 = Z_{44} J_4$$

и входное сопротивление

$$Z_{Bx} = \frac{U_4}{J_4} = Z_{44} = \frac{R(N\theta + 2 \operatorname{th} \frac{\theta}{2})}{\theta(N+1)}$$

Пример 2. Определим параметры трехполосника. Выберем, например, конфигурацию 23 (рис.Ш.43). Имеем $U_d = U_c$ согласно условию. Поскольку в данной схеме нас интересует только разность потенциалов, можно произвольно выбрать начало отсчета, положив $U_d = U_c = 0$. Тогда получим $U_{ad} = U_a - U_d = U_a; U_{bc} = U_b - U_c = U_b$. Используя выражения (Ш.81) и (Ш.105) для матрицы Y , получим следующие зависимости:

$$I_a = Y_{11} U_a + Y_{12} U_b + Y_{13} U_c + Y_{14} U_d = Y_{11} U_a + Y_{12} U_b;$$

$$I_b = Y_{21} U_a + Y_{22} U_b + Y_{23} U_c + Y_{24} U_d = Y_{21} U_a + Y_{22} U_b.$$

Следовательно, связь токов I_a, I_b с напряжениями U_a и U_b выражается через матрицу

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{(1+N)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th}\theta} + N & 1 - \frac{\theta}{\operatorname{th}\theta} \\ 1 - \frac{\theta}{\operatorname{th}\theta} & \frac{\theta}{\operatorname{th}\theta} + \frac{1}{N} \end{bmatrix}$$

В табл. Ш.4 приведены параметры всех 37 подсхем.

Для анализа частотных свойств элементов микросхем можно применить формулы параметров подсхем $R-C-NR$ - линии. Рассмотрим конкретные примеры.

Таблица №4

Параметры подсистем R-C-NR - структуры

N^2 кон- фигур.	Z/R
1.	$\frac{1}{(N+1)\theta} (N\theta + 2\text{th} \frac{\theta}{2})$
2.	$\frac{(N+1)\text{th}\theta/2}{\theta/2 + N\text{th}\theta/2}$
3.	$\frac{1}{(N+1)\theta} (N\theta + \text{th}\theta)$
4.	$\frac{N+1}{\theta} \left[\frac{N\theta \text{ch}\theta \cdot \text{sh}\theta}{N\theta \text{sh}\theta + (N^2+1)\text{ch}\theta + 2N} \right]$
5.	$\frac{(N+1)\text{th}\theta}{\theta + N\text{th}\theta}$
6.	$(N+1) \frac{\text{th}\theta}{\theta}$
7.	$\frac{(N+1)}{\theta} \left[\frac{(N-1)^2 \text{sh}\theta + 2N\theta(\text{ch}\theta - 1)}{(N^2+1)\text{ch}\theta + N(\theta \text{sh}\theta + 2)} \right]$
8.	$\frac{N}{N+1}$
9.	$N(N+1) \left[\frac{\text{th}\theta/2}{(N-1)^2 \text{th}\theta/2 + 2N\theta} \right]$
10.	$\frac{1}{(N+1)\theta} \left(N\theta + \frac{N^2+1}{\text{ch}\theta} + \frac{2N}{\text{sh}\theta} \right)$
11.	$\frac{N+1}{\theta \text{ch}\theta}$
12.	$\frac{N+1}{\theta} \left[\frac{\theta \text{ch}\theta + N \text{sh}\theta}{\theta \text{sh}\theta + 2N(\text{ch}\theta - 1)} \right]$
13.	$\frac{N+1}{2\theta \text{th}\theta/2}$

N-ком- фигур	Z или Y-параметры	
14.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} 2\text{th } \frac{\theta}{2} & \text{th } \frac{\theta}{2} \\ \text{th } \frac{\theta}{2} & \frac{1}{\text{th } \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	
15.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{th } \theta} & \text{th } \frac{\theta}{2} \\ \text{th } \frac{\theta}{2} & 2\text{th } \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	
16.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{th } \theta} & \frac{1}{\text{sh } \theta} \\ \frac{1}{\text{sh } \theta} & \frac{1}{\text{th } \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	
17.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{NR}{(N+1)\theta} \begin{bmatrix} \theta - 2\text{th } \frac{\theta}{2} + \frac{(N-1)^2}{N\text{th } \theta} & \theta + (N-1)\text{th } \frac{\theta}{2} \\ \theta + (N-1)\text{th } \frac{\theta}{2} & \theta - 2N\text{th } \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	
18.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{N+1}{\text{th } \theta} & N\text{th } \frac{\theta}{2} \\ N\text{th } \frac{\theta}{2} & \frac{N}{N-1}(\theta - 2N\text{th } \frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	
19.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{NR}{(N+1)\theta} \begin{bmatrix} \theta + \frac{2}{N}\text{th } \frac{\theta}{2} & \theta - \frac{N-1}{N}\text{th } \frac{\theta}{2} \\ \theta - \frac{N-1}{N}\text{th } \frac{\theta}{2} & \theta - 2\text{th } \frac{\theta}{2} + \frac{(N+1)^2}{N\text{th } \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	

№ код фигур	Z или Y-параметры	
20	$\begin{bmatrix} U_i \\ U_o \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{N}{N-1} \left(\theta + \frac{2}{N} \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \right) & \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \\ \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \frac{N+1}{\operatorname{th} \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ I_o \end{bmatrix}$	
21	$\begin{bmatrix} I_i \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} 2\theta \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & -\theta \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \\ -\theta \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + \frac{1}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_o \end{bmatrix}$	
22	$\begin{bmatrix} I_i \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + N & -\theta \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \\ -\theta \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & 2\theta \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_o \end{bmatrix}$	
23	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + N & 1 - \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} \\ 1 - \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} & \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + \frac{1}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_o \end{bmatrix}$	
24	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + N & \frac{\theta}{\operatorname{sh} \theta} - 1 \\ \frac{\theta}{\operatorname{sh} \theta} - 1 & \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + \frac{1}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_o \end{bmatrix}$	
25	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_o \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} & \\ \frac{N}{\operatorname{th} \theta} + \frac{1}{\operatorname{sh} \theta} & \frac{N+1}{\operatorname{th} \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_o \end{bmatrix}$	

№ конт опыта	Z или Y- параметры	
26.	$\begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{N+1}{\operatorname{th} \theta} & \frac{N}{\operatorname{th} \theta} + \frac{1}{\operatorname{sh} \theta} \\ \frac{N}{\operatorname{th} \theta} + \frac{1}{\operatorname{sh} \theta} & \frac{N}{N+1} (\theta - 2\operatorname{th} \frac{\theta}{2}) \cdot \frac{N+1}{\operatorname{th} \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$	
27.	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + N & -\frac{\theta}{\operatorname{sh} \theta} - N \\ -\frac{\theta}{\operatorname{sh} \theta} - N & \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix}$	
28.	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{(N+1)^2}{N} & -(N+1) \\ -(N+1) & \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} \cdot N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix}$	
29.	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} + N & -(N+1) \\ -(N+1) & \frac{(N+1)^2}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix}$	
30.	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} \cdot N & 1 - N - \frac{\theta}{\operatorname{th} \frac{\theta}{2}} \\ 1 - N - \frac{\theta}{\operatorname{th} \frac{\theta}{2}} & \frac{2\theta}{\operatorname{th} \frac{\theta}{2}} + \frac{(N-1)^2}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix}$	
31.	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{(N+1)R} \begin{bmatrix} \frac{2\theta}{\operatorname{th} \frac{\theta}{2}} + \frac{(N-1)^2}{N} & 1 - N - \frac{\theta}{\operatorname{th} \frac{\theta}{2}} \\ 1 - N - \frac{\theta}{\operatorname{th} \frac{\theta}{2}} & \frac{\theta}{\operatorname{th} \theta} \cdot N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_0 \end{bmatrix}$	

№ экв- Фигур.	Z или Y- параметры		
32.	$\begin{bmatrix} u_L \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{NR}{(N+1)\theta}$	$\begin{bmatrix} \theta \cdot \frac{2}{N} \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \theta - 2\operatorname{th} \frac{\theta}{2} \\ \theta - 2\operatorname{th} \frac{\theta}{2} & \theta - 2N \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$
33.	$\begin{bmatrix} u_L \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{NR}{(N+1)\theta}$	$\begin{bmatrix} \theta \cdot \frac{2}{N} \operatorname{th} \frac{\theta}{2} & -(\theta - 2\operatorname{th} \frac{\theta}{2}) \\ -(\theta - 2\operatorname{th} \frac{\theta}{2}) & \theta - 2N \operatorname{th} \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$
34.	$\begin{bmatrix} u_L \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{(N+1)R}{\theta}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\operatorname{th}\theta} & - \\ - & \frac{1}{\operatorname{sh}\theta} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$
35	$\begin{bmatrix} u_L \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{(N+1)R}{\theta}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\operatorname{ch}\theta} & -\frac{1}{\operatorname{sh}\theta} \\ -\frac{1}{\operatorname{sh}\theta} & \frac{1}{\operatorname{ch}\theta} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$
36	$\begin{bmatrix} u_L \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{(N+1)\theta}$	$\begin{bmatrix} \frac{N^2+1}{\operatorname{ch}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{sh}\theta} + N\theta & -(\frac{N^2+1}{\operatorname{sh}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{ch}\theta} - N\theta) \\ -(\frac{N^2+1}{\operatorname{sh}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{ch}\theta} - N\theta) & \frac{N^2+1}{\operatorname{ch}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{sh}\theta} + N\theta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$
37	$\begin{bmatrix} u_L \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{R}{(N+1)\theta}$	$\begin{bmatrix} \frac{N^2+1}{\operatorname{ch}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{sh}\theta} + N\theta & \frac{N^2+1}{\operatorname{sh}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{ch}\theta} - N\theta \\ \frac{N^2+1}{\operatorname{sh}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{ch}\theta} - N\theta & \frac{N^2+1}{\operatorname{ch}\theta} + \frac{2N}{\operatorname{sh}\theta} + N\theta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_L \\ I_0 \end{bmatrix}$

Пример 3. Тонкопленочный конденсатор (см. рис. Ш.21) образован двумя проводящими пленками, разделенными пленкой диэлектрика. Проводящие пленки имеют одинаковое сопротивление R_0 . Поэтому эквивалентная схема (рис. Ш.21, в) сводится к R-C-R-линии при условии, что $N=1$. Если контактные площадки расположены так, как показано на рис. Ш.21, в, то эквивалентная схема соответствует конфигурации 10 (см. рис. Ш.43). В формулу входного сопротивления в соответствии с табл. Ш.4 (М10) следует подставить $N=1$.

Пример 4. Рассмотрим конфигурацию (рис. Ш.21, а), в которой резистивные и проводящие полоски расположены на диэлектрической подложке. Здесь возможны различные варианты.

1. Определить полное сопротивление резистора в диапазоне частот с учетом распределенной емкости на соседний проводник. Омическое сопротивление резистора R_1 , а соседнего проводника $R_2 = NR_1$.

Рассмотрим два предельных случая. Если проводник R_2 включен в цепь с большим внешним сопротивлением, приблизительно можно считать его разомкнутым, что соответствует конфигурации 1 на рис. Ш.43. Если проводник R_2 включен в цепь с малым внешним сопротивлением, приблизительно можно считать его короткозамкнутым, что соответствует конфигурации 2 на рисунке. Следовательно, частотная характеристика резистора находится между характеристиками подсем 1 и 2 по табл. Ш.4.

2. Определить паразитные влияния в системе двух проводников. Предположим, первый проводник есть резистор с сопротивлением R_1 . На его концах имеется переменное напряжение U_1 . Требуется определить токи и потенциалы, возникающие во втором проводнике за счет распределенной емкостной связи. Этот случай соответствует конфигурации 32 на рисунке. Z-параметры эквивалентного четырехполосника приведены в табл. Ш.4.

3. Оба проводника используются в качестве двухпроводной линии, источник сигнала включен между проводниками. Этот случай соответствует конфигурации 34. Z-параметры эквивалентного четырехполосника приведены в таблице.

Пример 5. Диффузионный резистор, показанный на рис. Ш.21, б, имеет эквивалентную схему в виде двухслойной RC-линии. Примем, что $R=4$ ком, слой n -типа - 70 ом, подложка p -типа - 5 ом.

Следовательно, последний слой можно заменить проводником без сопротивления, а действием распределенной емкости р-п-перехода между Π -слоем и подложкой в первом приближении можно пренебречь. При этом эквивалентная схема диффузионного резистора сводится к R-C-NR-линии. Выбираем конфигурацию I на рис. Ш.43, так как Π -слой изолирован с обеих сторон.

Приведенные выше примеры, иллюстрируют применение формул R-C-NR-структур для анализа частотных свойств эквивалентных схем различных элементов микросхем.

Не менее важно применение различных конфигураций в качестве схемных элементов, обладающих известными частотными и импульсными характеристиками. Эти схемные элементы, как и вообще длинные линии, позволяют во многих случаях получать характеристики микросхем, недостижимые при использовании элементов с сосредоточенными параметрами.

Остановимся кратко на C-R-NC-структурах. Элемент длины показан на рис. Ш.42, в. Принятые в литературе обозначения токов и напряжений показаны на рис. Ш.42, а и б. Алгоритм получения неопределенных матриц Y и Z параметров в принципе такой же, как для R-C-NR-структур. Ниже приведены выражения для матриц Y и Z структур C-R-NC

$$[Y] = \frac{j\omega C}{\theta} \begin{bmatrix} (N+1)\operatorname{cth}\theta & -N\operatorname{th}\frac{\theta}{2} & -(N+1)\operatorname{csch}\theta & -\operatorname{th}\frac{\theta}{2} \\ -N\operatorname{th}\frac{\theta}{2} & \frac{N}{N+1}(\theta+2N\operatorname{th}\frac{\theta}{2}) & -N\operatorname{th}\frac{\theta}{2} & -\frac{N}{N+1}(\theta-2\operatorname{th}\frac{\theta}{2}) \\ -(N+1)\operatorname{csch}\theta & -N\operatorname{th}\frac{\theta}{2} & (N+1)\operatorname{cth}\theta & -\operatorname{th}\frac{\theta}{2} \\ -\operatorname{th}\frac{\theta}{2} & -\frac{N}{N+1}(\theta-2\operatorname{th}\frac{\theta}{2}) & -\operatorname{th}\frac{\theta}{2} & \frac{1}{N+1}(N\theta+2\operatorname{th}\frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} \quad (\text{Ш.107})$$

$$[Z] = \frac{1}{j\omega C(1+N)} \begin{bmatrix} \theta\operatorname{cth}\theta+N & 1-\theta\operatorname{cth}\theta & \theta\operatorname{csch}\theta-1 & -\theta\operatorname{csch}\theta-N \\ 1-\theta\operatorname{cth}\theta & \theta\operatorname{cth}\theta+\frac{1}{N} & -\theta\operatorname{csch}\theta-\frac{1}{N} & \theta\operatorname{csch}\theta-1 \\ \theta\operatorname{csch}\theta-1 & -\theta\operatorname{csch}\theta-\frac{1}{N} & \theta\operatorname{cth}\theta+\frac{1}{N} & 1-\theta\operatorname{cth}\theta \\ -\theta\operatorname{csch}\theta-N & \theta\operatorname{csch}\theta-1 & 1-\theta\operatorname{cth}\theta & \theta\operatorname{cth}\theta+N \end{bmatrix} \quad (\text{Ш.108})$$

Перечень подсхем приведен на рис. Ш.44. В качестве примеров рассмотрим эквивалентные схемы конденсаторов полупроводниковых микросхем.

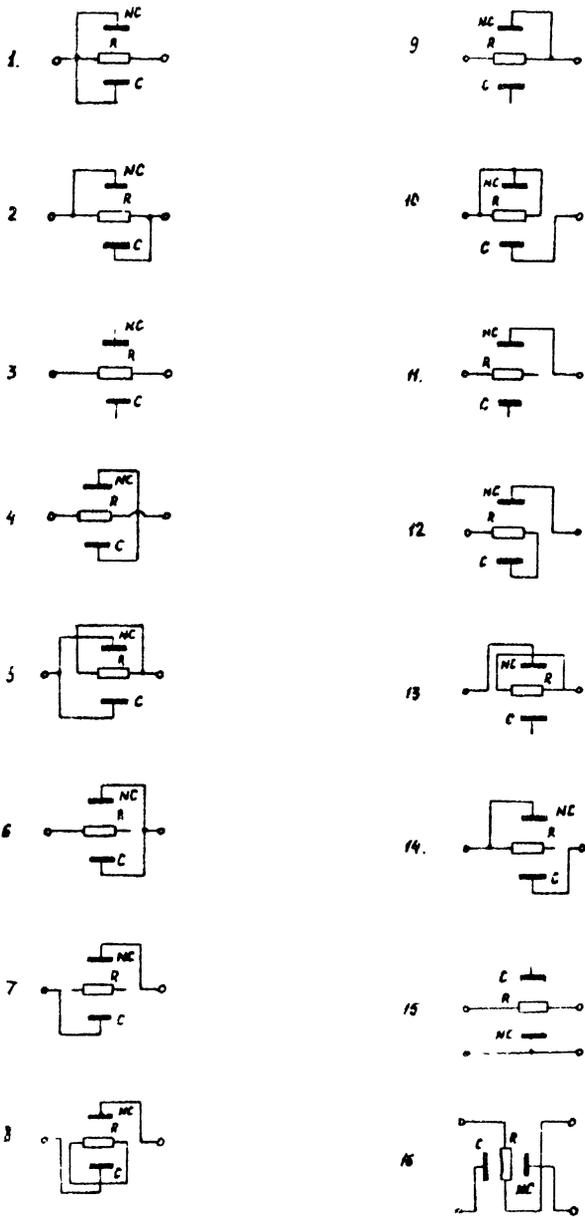
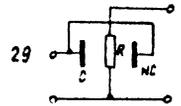
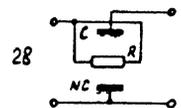
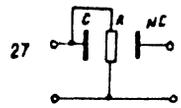
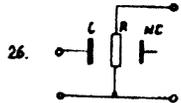
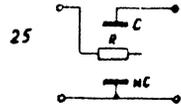
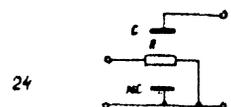
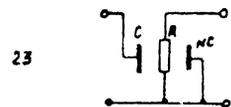
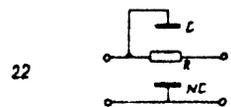
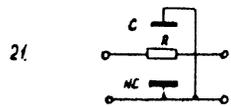
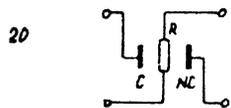
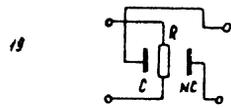
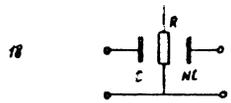
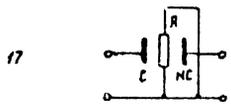


Рис. III.44. Подсхемы C-R-NC -структуры



Продолжение рис. Ш.44

Пример 1. Диффузионный конденсатор, показанный на рис. Ш.2Г, г, имеет эквивалентную схему в виде сложной RC-линии. Эту схему можно упростить, если пренебречь распределенным сопротивлением подложки. При этом эквивалентная схема преобразуется в C-R-NC-линию, у которой C и NC - емкости обратного-смещенных переходов j_1 и j_2 ; R - сопротивление p-n-слоя между ними.

Пример 2. Конденсатор типа МШП, показанный на рис. Ш.2Г, д, имеет эквивалентную схему, которая переходит в C-R-NC-линию, если пренебречь распределенным сопротивлением подложки. Дальнейшее упрощение этой схемы связано с малым сопротив-

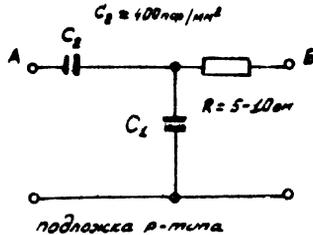


Рис. Ш.45. Упрощенная эквивалентная схема конденсатора типа МШП

лением n⁺ слоя. Пренебрегая этим сопротивлением, получаем емкостной делитель (рис. Ш.45) с последовательным сопротивлением 5-10 Ом, которое отображает выводной участок n⁺ слоя и сопротивление контакта.

10. Особенности проектирования активных элементов интегральных схем

В гибридных пленочных микросхемах используются дискретные транзисторы без корпуса. Основные особенности проектирования связаны с отсутствием корпуса. Поэтому необходимо решить ряд вопросов конструктивного характера: защиту, герметизацию транзистора, крепление бескорпусного транзистора на подложке, обеспечение электрических соединений эмиттера, коллектора и базы с элементами схемы и др. Имеется также ряд особенностей в определении параметров бескорпусного транзистора. Тепловое сопротивление транзистора, например, обычно определяется между коллектором и корпусом, к которому крепится кристаллик. При этом температура корпуса считается известной. Если бескорпусный транзистор расположен на подложке, например, из ситалла, то задача определения теплового сопротивления усложняется, так как температура в той точке подложки, где укреплен транзис-

тор, неизвестна. Она определяется условиями отвода тепла от транзистора через подложку и зависит от расположения транзистора на подложке. Важным параметром транзистора является мощность, которая может быть рассеяна в его коллекторном переходе. Мощность зависит от условий отвода тепла от коллектора, а эти условия, в свою очередь, будут различными для транзистора в корпусе и без него. Особенности проектирования транзисторов полупроводниковых интегральных схем связаны, прежде всего, с необходимостью изолировать транзистор монолитной интегральной схемы от остального кристалла. Это делается, как известно, либо при помощи дополнительного обратного-смещенного р-п-перехода, либо путем изоляции слоем диэлектрика. На рис.Ш.46 приведено схематическое изображение поперечного сечения транзистора монолитной интегральной схемы с изоляцией р-п-переходом и дискретного планарного эпитаксиального транзистора. Транзистор интегральной схемы содержит три р-п-перехода и является четырехслойной структурой, а дискретный - только два. Следовательно, в интегральной схеме имеется "паразитный" транзистор типа р-п-р (база-коллектор-подложка), который в нормальных условиях не должен функционировать. Далее,

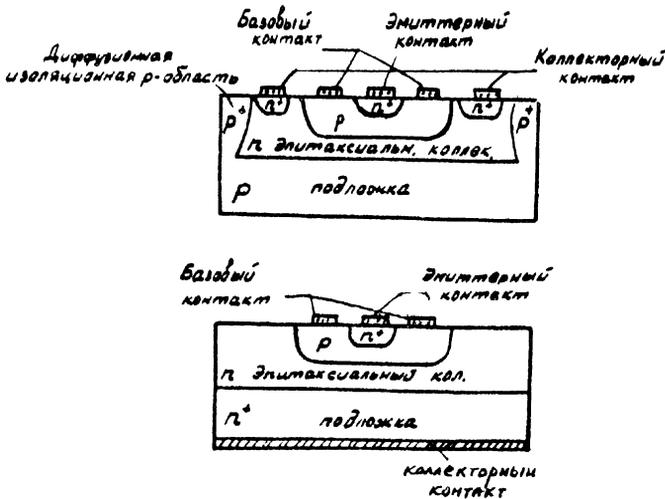


Рис.Ш.46. Поперечное сечение транзисторов (монолитной интегральной схемы и дискретного планарного.)

омический контакт с коллектором в транзисторах микросхемы выведен наверх, что удлиняет пути токов и создаст дополнительное сопротивление коллектора, а это, в свою очередь, увеличивает напряжение между коллектором и эмиттером, что важно при работе транзистора в режиме ключа. Для уменьшения сопротивления коллектора в транзисторе монолитной интегральной схемы предусматривается скрытый низкоомный слой, но при этом усложняется технология изготовления интегральных схем. Обратное смещенный изолирующий р-п-переход (либо изоляция диэлектриком) вносит дополнительную, "паразитную", емкость, которая должна учитываться в эквивалентной схеме транзистора.

Действие паразитного транзистора может быть ослаблено путем ухудшения его параметров, например, при уменьшении времени жизни в базе паразитного (т.е. в коллекторе основного) транзистора. Это достигается легированием коллектора золотом. Если транзистор интегральной схемы проектируется для работы в импульсных схемах, то уменьшение времени жизни (за счет легирования золотом) увеличивает его быстродействие и одновременно уменьшает действие паразитного транзистора. Если транзистор предназначен для работы в усилительных схемах, уменьшение времени жизни нежелательно из-за уменьшения усиления по току.

Важная особенность проектирования транзисторов монолитных микросхем состоит и в том, что резисторы интегральных схем изготавливаются в одном и том же режиме диффузии, что и базы транзисторов. Это накладывает очевидные ограничения на параметры проектируемых элементов микросхем. Паразитные элементы транзисторов микросхем также накладывают ограничения на параметры функциональных элементов, выполненных в виде полупроводниковых интегральных схем. Например, паразитная емкость изолирующего р-п-перехода в значительной мере уменьшает быстродействие ключевой схемы, так как эта емкость заряжается через нагрузочное сопротивление ключа (величина сопротивления — килоомы). В усилительных схемах паразитная емкость влияет на частотные характеристики усилителя.

Еще одна особенность проектирования транзисторов микросхем связана с использованием транзисторов в диодном включении. Пять основных диодных схем включения показаны на рис. П.47. В каждом включении свойства диодов зависят от параметров тран-

зисторов. Так, например, во многих случаях важно избежать накопления неосновных носителей в подложке. Из этих соображе-

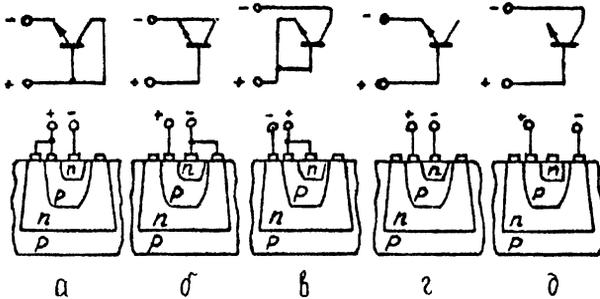


Рис.Ш.47. Диодные схемы включения транзисторов

ний нежелательно использование р-п-перехода коллектор-база транзистора, так как при открытом р-п-переходе коллектор-база будет функционировать паразитный транзистор. С другой стороны, использование р-п-перехода эмиттер-база ограничивается малым пробивным напряжением этого перехода.

Во всех диодных схемах включения необходимо учитывать паразитные емкости (рис.Ш.48), а также токи утечки диодов. Для легированных золотом структур токи утечки существенно больше, чем для нелегированных. Вентильные свойства диода зависят от вида его вольт-амперной характеристики, а она, в свою очередь, зависит от сопротивлений различных областей транзистора, используемого в диодном включении. Следует иметь в виду и то обстоятельство, что разработчики микросхем имеют возможность использовать различные диодные схемы включения для различных функциональных применений. Например, схему с короткозамкнутым переходом коллектор-база целесообразно использовать в качестве быстродействующих диодов, так как она характеризуется малым накопленным зарядом. Эта схема также используется в тех случаях, когда важно исключить действие паразитного р-п-р-транзистора и иметь малое падение напряжения на прямо-смещенном диоде. Схему с разомкнутым коллекторным выводом (рис.Ш.47, г) можно использовать в качестве накопительного диода в схемах диодно-транзисторной логики. Эти диоды, включенные в цепи базы ключевого транзистора, ускоряют выход его из насыщения.

Схема (рис. Ш.48,б) при $U_{кэ} = 0$ также может быть использована в качестве накопительного диода. Схемы Ш.48г,в,д, т.е. при $U_{эб} = 0$ и $J_э = 0$ обладают наибольшим значением пробивного напряжения при обратном смещении. Они используются в качестве диодов общего применения. Эти примеры показывают, что разработчики транзисторов монолитных интегральных схем должны в процессе проектирования учитывать значительно более широкий круг вопросов, требований и ограничений, чем разработчики дискретных транзисторов.

II. Некоторые особенности проектирования топологии микросхем

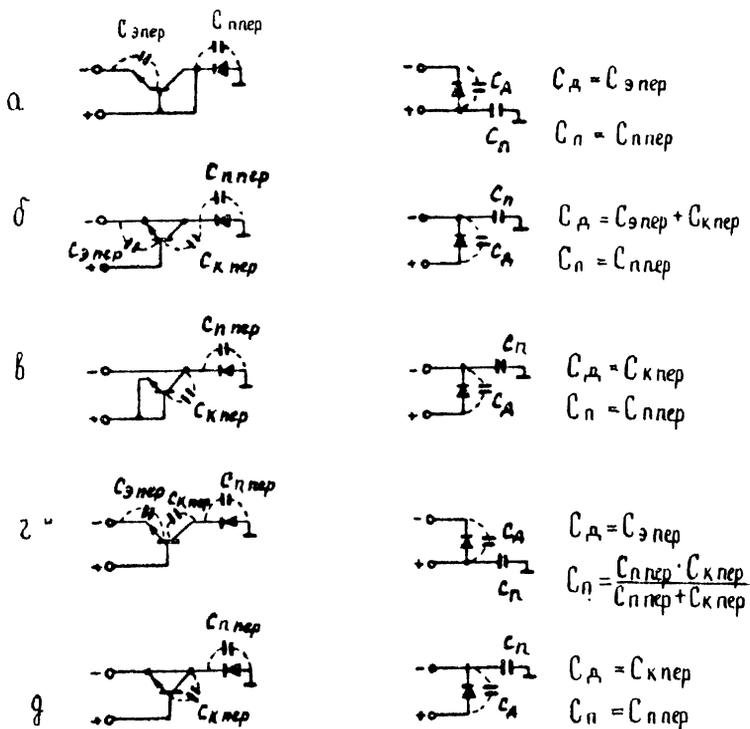
Специфическим и ответственным этапом проектирования микросхем является разработка топологии, т.е. выбор формы, размеров и расположения ее элементов.

Остановимся на особенностях разработки топологии гибридных пленочных микросхем. Приступая к проектированию топологии, разработчик микросхемы должен иметь исходную информацию об активных элементах; о номиналах (и допусках на них) — для пассивных элементов; о параметрах источников питания; о мощности, выделяемой резисторами схемы; о допустимых падениях напряжения на соединительных проводниках; о диапазоне частот, в котором работает схема. Кроме того, разработчик микросхем должен учитывать особенности технологии и материалов. Для этого он должен располагать информацией о параметрах подложки, электрофизических свойствах напыляемых материалов, о возможностях технологии в смысле выбора толщины пленок, об особенностях масок и технологического оборудования, от которых зависит точность изготовления элементов, о допустимых несоответствиях отдельных слоев; об их физической или химической совместимости.

Разработчик топологии также должен иметь данные, необходимые для выполнения межсоединений: число внешних выводов для соединения с другими схемами и источниками питания; способ подсоединения дискретных активных элементов. Необходимо также учитывать особенности конструкции: в отдельном корпусе, без корпуса, габариты и т.д.

Диодное
включение

Трехполюсная
эквивалентная
схема



$C_{д}$ — емкость, параллельная диоду; $C_{п}$ — паразитная емкость; $C_{эпер}$, $C_{кпер}$, $C_{ппер}$ — емкости эмиттерного, коллекторного и паразитного р-п-перехода

Рис. Ш.48. Емкости в диодных схемах включения

При проектировании топологии необходимо прежде всего обеспечить предусмотренные принципиальной схемой номиналы элементов. При этом должны быть выполнены требования на изготовление элементов с заданной точностью. Размещение элементов нужно выполнить так, чтобы по возможности уменьшить число пересечений соединительных проводников; уменьшить вредные ("паразитные") связи между элементами; минимизировать, если возможно, длину соединительных проводников. Важно так разместить элементы, чтобы обеспечить правильный тепловой режим и не допустить перегрева отдельных элементов.

Разработчик топологии должен располагать главными и второстепенными критериями качества топологии. Например, решающее значение имеет точность изготовления элементов, а к паразитным связям схема малочувствительна. В диапазоне низких частот, при низком уровне быстродействия импульсных схем, паразитные связи не играют главной роли. Или схема допускает значительный разброс номиналов, но в ней имеется много тепловыделяющих элементов и размещение элементов нужно подчинить требованию отсутствия перегрева элементов.

Ряд вопросов, связанных с проектированием топологии, изучается самостоятельно. Так, например, разрабатываются алгоритмы минимизации пересечений и длины соединительных проводников; алгоритмы расчета температурных полей микросхемы либо просто наиболее "горячих" точек; методы расчета паразитных связей и др. Иногда расчетным путем не удастся получить нужную информацию; в этих случаях целесообразно использовать различные виды моделирования. Немаловажную роль играет личный опыт и инженерная "интуиция" разработчика. Эти качества иногда позволяют принять правильное решение без трудоемких расчетов, для выполнения которых необходимо использовать ЦВМ.

В результате проработки топологии определяется расположение ее элементов на подложке; расположение выводов и площадок для подсоединения дискретных элементов; число слоев пленочной схемы и последовательность их нанесения, а также форма и размеры элементов в каждом слое микросхемы.

При проектировании топологии гибридной пленочной микросхемы полезно иметь в виду следующие положения:

разработку топологии целесообразно начинать с определения геометрических размеров пассивных элементов (и соединительных проводников), а также их взаимного расположения. При этом учитываются допуски на размеры элементов, от которых зависит общий допуск на номинал элемента;

рекомендуется выбирать стандартные размеры подложки. Например, 20x16, 40x32, 60 x48 мм;

сложную микросхему целесообразно разделить на элементарные ячейки (например, логические элементы, триггеры и др.), составить топологию отдельных ячеек, а потом уже скомпоновать их размещение;

число слоев должно быть минимальным. Это важно как с точки зрения упрощения технологии, так и для обеспечения качественных показателей микросхемы. Известно, что с увеличением числа слоев возрастает суммарное напряжение из-за разности коэффициентов линейного расширения. Адгезия (сила отрыва пленки от подложки или другого слоя) также зависит от числа слоев;

необходимо учитывать возможность несовмещения масок. Пределы несовмещения определяются качеством технологического оборудования. При максимальном несовмещении не должно быть коротких замыканий, разрывов и недопустимых отклонений параметров элементов от номиналов;

соединения желательно делать минимальной длины. Линейные расстояния между элементами определяются с учетом точности фотолитографии и совмещения масок;

ширину шин питания целесообразно иметь максимальной. Через шины питания могут образоваться паразитные связи. Падение напряжения в шинах также ограничивается;

при выборе местоположения контактных площадок для подсоединения дискретных активных элементов необходимо учитывать способ крепления бескорпусных транзисторов ;

пленочные элементы микросхемы следует располагать на расстоянии не менее 50 мкм от краев подложки;

пассивные элементы микросхемы, выполняемые из одного и того же материала, должны по возможности располагаться в одном слое;

диэлектрические пленки, служащие для разделения токопроводящих или резистивных слоев, должны надежно перекрывать разделяемые слои с учетом суммарных технологических погрешностей совмещения;

нужно стремиться к уменьшению паразитных связей не только между элементами на подложке, но и между внешними выводами.

Проектирование топологии полупроводниковых микросхем имеет свои отличительные особенности. К ним относятся наличие изолирующих областей микросхемы; паразитный транзистор база-коллектор-подложка, - для монокристаллических схем, в которых изоляция осуществляется р-п-переходами; паразитные емкости, связанные с изолирующей областью.

Прежде всего необходимо определить количество изоляционных областей. Каждая из них может иметь независимую величину потенциала. При определении изолирующих областей полезно иметь в виду следующие положения:

все коллекторные области n -типа, имеющие различные потенциалы, должны быть изолированы;

участки, на которые паразитная емкость изолирующих областей оказывает существенное влияние, желательно минимизировать;

минимальная площадь каждой изолирующей области должна определяться с учетом размеров элементов, которые, в свою очередь, зависят от выполняемых функций в схеме. Например, площадь коллектора транзистора зависит от коллекторного тока, а он определяется режимом работы транзистора в схеме;

на все р-п-переходы изолирующих областей нужно подать обратное напряжение.

Размеры всей микросхемы определяются с учетом суммарной площади всех изолирующих областей; площади, требуемой для крепления выводов; площади, необходимой для проведения соединений между элементами, размещенными в различных изолирующих областях. При проектировании микросхемы стремятся минимизировать занимаемую ею площадь не только потому, что это увеличивает число микросхем, одновременно изготавливаемых на одной пластине, но также и потому, что вероятность случайных дефектов в полупроводниковой пластине возрастает с увеличением площади.

Размещение элементов и соединений между ними, как и в случае гибридных пленочных микросхем, является самостоятельной задачей, которая решается с учетом различных требований:

устранения или уменьшения действия паразитных эффектов; минимизации длины соединительных проводников и их пересечений; уменьшения общей площади микросхемы и др.

Общая последовательность действий при разработке топологии микросхем (в упрощенном виде) сводится к следующему:

определяется количество изолирующих областей;

вычерчивается принципиальная схема микросхемы, выбирается расположение контактных площадок. Часто оказывается полезным сгруппировать контактные площадки для подсоединения цепей питания, цепей ввода сигналов, выходных цепей и т.д.;

рассматриваются различные варианты соединений между элементами, с тем чтобы обеспечить общие точки соединений проводников на элементах микросхемы, например на резисторах. Если в одной точке схемы должны соединяться слишком много проводников, для этой цели может быть предусмотрена отдельная "перемычка", т.е. проводник, специально предусмотренный в схеме и образованный в процессе диффузии. По различным причинам желательно минимизировать (лучше свести к нулю) число перемычек: они требуют отдельной изолирующей области; увеличивают размеры микросхемы; добавляют паразитную емкость; перемычка вносит добавочное сопротивление в схему;

определяются размеры элементов, при которых обеспечиваются заданные величины параметров;

обеспечиваются правильные соединения изолирующих областей (изоляция p-n-переходами) для подачи запирающих напряжений на p-n-переходы;

прорабатываются различные варианты размещения элементов и соединений между ними;

изучается возможность минимизации площади, занимаемой микросхемой в целом.

Г л а в а IY

ИЗМЕРЕНИЯ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МИКРОСХЕМ

Бурное развитие интегральных схем (ИС) стимулирует интенсивные поиски высокопроизводительных и универсальных методов оценки их работоспособности.

Совершенно очевидна несостоятельность решения этой задачи методом измерения параметров отдельных компонентов ИС, т.е. методом, переносимым в интегральную схемотехнику из схемотехники дискретной.

Измерения микросхем можно разделить на две большие группы:

1. Технологические, которые включают в себя весь комплекс измерений после различных технологических операций в производстве микросхем;
2. Электрические измерения готовых микросхем.

I. Измерения микросхем

Технологические измерения включают весьма разнообразные физические, химические и электрические измерения. Данные измерения могут быть разделены на четыре группы.

Первая группа технологических измерений основывается на использовании интерференционных и дифракционных явлений, возникающих при взаимодействии лучистой энергии с исследуемой микросхемой на различных этапах ее изготовления. В качестве лучистой энергии используется видимый свет, ультрафиолетовое, инфракрасное, рентгеновское и др. излучения.

К первой группе также можно отнести исследование поверхности с помощью усилителей яркости изображения, основанных на электронно-оптическом преобразовании изображения. К числу таких усилителей яркости изображения может быть отнесен электронно-оптический преобразователь, преобразующий инфракрасное, ультрафиолетовое или рентгеновское изображение в видимое.

Вторая группа технологических измерений использует сфокусированный пучок электронов для получения информации о состоянии микросхем. Этот вид измерений наиболее целесообразно использовать при электронно-лучевой обработке. В этом случае информация об электрофизических свойствах изготавливаемой микросхемы может быть получена непосредственно в процессе изготовления микросхем.

Третья группа технологических измерений основывается на получении информации о состоянии поверхности и приповерхностных слоев микросхемы за счет инфракрасного излучения с исследуемой поверхностью.

Четвертая группа технологических измерений включает в себя различные электрические измерения, дающие информацию о состоянии микросхемы на различных этапах ее изготовления.

Технологические измерения обычно проводятся выборочно на одном или нескольких образцах партии или на специальных контрольных образцах.

Электрические измерения готовых микросхем

При оценке электрических параметров ИС следует исходить из отношения к ней как к неделимому целому, для которого принципиальная электрическая схема в общем случае является приближенной характеристикой.

Считается, что качество интегральных схем следует оценивать, основываясь на понятиях многополосников. Отсюда следует, что электрические измерения должны сводиться к измерениям электрических параметров только на внешних выводах ИС. Такие измерения могут проводиться в статике (неизменяющиеся во времени токи и напряжения) и в динамике, когда рассматриваются изменения измеряемых величин во времени.

Таким образом, нетрудно видеть, что при таком подходе процессы измерения и контроля ИС могут быть сведены к простым измерительным операциям, поддающимся автоматизации.

Производить сравнительную оценку различных типов ИС непосредственно по таким измеряемым параметрам, как токи и напряжения на выводах ИС, неудобно, поскольку число измеряемых параметров может быть чрезмерно велико. Поэтому сравнение и оценка ИС производится с помощью параметров, в которых обобщаются измеряемые величины. Эти обобщенные параметры называются функциональными.

Функциональные параметры количественно оценивают выполняемую ИС функцию. Например, в цифровых интегральных схемах (ЦИС) функциональные параметры количественно оценивают логическую функцию ЦИС, т.е. величины ее коэффициентов разветвления и объединения, помехозащищенность, потребляемую мощность и другие важнейшие характеристики ЦИС, являющиеся производными от измеряемых параметров.

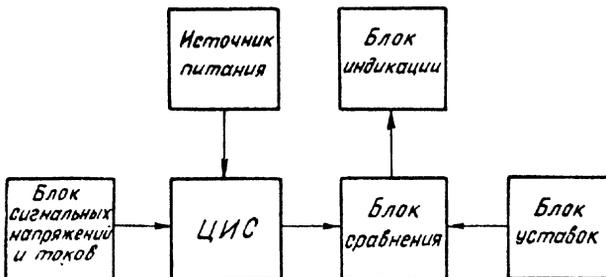
При таком подходе различные ИС могут быть классифицированы и объединены в группы, общие по характеру измеряемых тестов. Для каждой группы можно обоснованно разработать принципы методов измерения и контроля функциональных параметров, характеризующих работу ИС.

Измеряемые параметры делятся на статические и динамические. Например, в ЦИС к статическим измеряемым параметрам относят токи и напряжения на входах и выходах, а также токи от источников питания.

Например $J_{вх}^{(0)}, J_{вх}^{(1)}$ - входные токи, соответствующие логическому 0 и логической 1; $J_{вых}^{(0)}, J_{вых}^{(1)}$ - выходные токи, соответствующие логическому 0 и логической 1; $U_{вых}^{(0)}, U_{вых}^{(1)}$ - выходные напряжения для двух логических состояний и т.п.

К динамическим параметрам ЦИС относят: $t_n^{(10)}, t_n^{(01)}$ - время переключения из состояния "лог.1" в "лог.0" и из состояния "лог.0" в "лог.1" соответственно; $t_{зр}^{(10)}, t_{зр}^{(01)}$ - время задержки распространения информации в логическом элементе при переходе выходного напряжения из состояния "лог.1" в "лог.0" и состояния "лог.0" в "лог.1" соответственно; τ_p, τ_c - длительность фронта и спада импульсов соответственно и др. Параметры, задаваемые на выводах ИС при измерениях, называются режимными параметрами, которые являются граничными значениями измеряемых параметров.

В основу принципа действия аппаратуры для контроля параметров ИС положен метод разбраковки по принципу "годен - не годен". На рисунке приведена блок-схема, поясняющая принцип действия измерительной аппаратуры. Основным функциональным узлом является автоматическое устройство, служащее для сравнения контролируемого параметра с его граничным значением и выдачи результата на блок индикации. Процесс работы на данной установке можно разбить на 2 этапа.



Блок-схема для измерения функциональных параметров ИС и разбраковка по принципу "годен - не годен"

I этап - подготовка к измерениям: установка всех питающих и сигнальных напряжений и токов, т.е. установка электрического режима для испытания ИС; установка граничных значений контролируемых параметров ИС в блоке установок.

II этап - измерение: сравнение контролируемого параметра с граничными значениями на него, введенными в компараторное устройство; выдача результата сравнения на блок индикации.

Блок индикации выдает информацию о качестве каждого измеряемого параметра и всей ИС, т.е. сигнализирует о выходе контролируемого параметра за пределы допуска (уставки) или о том, что контролируемый параметр находится в заданных пределах.

Способы индикации могут быть различные. Например, сигнальные лампочки определенных цветов, освещение слов "годен" или "не годен", звуковой сигнал и тп.

В такой аппаратуре, кроме разбраковки ИС по принципу "годен - не годен", может быть осуществлена разбраковка ИС по группам применения, т.е. классификация. Это целесообразно в том случае, когда контролируемый параметр может принимать значения в широком диапазоне величин. В случае классификации по группам применения ИС компаратор должен сравнивать контролируемый параметр не с одним допустимым значением на этот параметр, а с несколькими последовательно сменяемыми значениями. Индикаторное устройство при этом должно регистрировать как характеристику годности контролируемой ИС в целом, так и номер группы, к которой ИС может быть отнесена. Для этого наиболее целесообразным является использование измерительных приборов с цифровым отсчетом и цифровой печатью.

Такая специализированная измерительная аппаратура обладает большим быстродействием, схемотехнической простотой и, как следствие этого, большей надежностью и меньшей стоимостью по сравнению с универсальной измерительной аппаратурой. Наиболее широкое применение такая аппаратура должна получить в поточно-массовом и крупносерийном производстве.

2. Испытания микросхем

Испытания микросхем могут быть классифицированы на следующие группы: конструктивные; электрические; механические; климатические и радиационные.

Конструктивные испытания включают в себя испытания конструкции микросхем в целом и отдельных ее узлов.

В конструктивные испытания входят: проверка размеров, механической прочности выводов и соединений, качества антикоррозионных покрытий, герметичности, светонепроницаемости и т.д.

Испытание на герметичность проводится тремя основными методами: гелиевым, радиоактивным и методом горячего масла.

Гелиевый метод испытания на герметичность заключается в воздействии на микросхемы, заключенные в корпус, гелием с последующим обнаружением потока гелия сквозь негерметичности с помощью теческаателей.

Радиоактивный метод заключается в том, что испытуемые микросхемы помещают в герметичную камеру, которую наполняют радиоактивным газом. После выдержки в течение некоторого времени в этой камере радиоактивный газ удаляется, микросхемы извлекаются и проверяется интенсивность радиации микросхем. Очевидно, если в корпусе испытуемой микросхемы нарушена герметизация, то радиоактивный газ проникает внутрь и после извлечения из камеры такие микросхемы будут давать интенсивное излучение.

Недостаток этого метода заключается в его сложности, высокой стоимости и опасности работы с радиоактивными изотопами.

Метод испытания на герметичность горячим маслом самый простой и дешевый. Готовые микросхемы погружают в сосуд с прозрачным маслом, нагретым до температуры порядка 120°C . В результате нагрева давление воздуха внутри корпуса микросхемы повышается и воздух начинает выходить в виде пузырьков через негерметичные участки в корпусе.

Электрические испытания заключаются в проверке работоспособности микросхем и стабильности их параметров в различных рабочих режимах. Работоспособность микросхем проверяют путем тренировки. Различают два способа тренировки: электрический и термоэлектрический.

При электрической тренировке микросхемы включают в электрическую схему с максимально допустимыми электрическими параметрами: токами и напряжениями. В таких условиях микросхемы выдерживают определенное время в соответствии с техническими условиями (ТУ).

При термоэлектрической тренировке микросхемы помещают в камеру, в которой создана максимально допустимая температура и устанавливаются максимально допустимые электрические параметры. В этих условиях микросхемы выдерживаются определенное время в соответствии с ТУ.

Механические испытания заключаются в испытании микросхем на устойчивость к длительной вибрации в требуемом диапазоне частот; вибропрочность в требуемом диапазоне частот; устойчивость к длительной вибрации на фиксированной частоте; устойчивость к одиночным и многократным ударам и к постоянному ускорению.

Испытания проводят при жестком креплении микросхем к платформам испытательных стендов, чтобы воздействие нагрузки передавалось испытываемым микросхемам с минимальной амортизацией. Обычно механические испытания производятся в двух наиболее опасных для микросхем положениях, указываемых в ТУ.

Микросхемы испытывают в электрическом режиме за исключением испытаний на длительную вибрацию в требуемом диапазоне частот.

Устойчивость микросхем к длительной вибрации в требуемом диапазоне частот производится на вибростенде, создающем гармонические колебания. Испытания проводятся в диапазоне частот от нескольких герц до нескольких килогерц с заданным ускорением. Весь диапазон частот разбит на 14 поддиапазонов. При испытании плавно изменяют частоту в каждом поддиапазоне. Время прохождения каждого поддиапазона порядка 1 мин. На высшей частоте каждого поддиапазона микросхемы выдерживают в течение нескольких часов. Вибропрочность микросхем в требуемом диапазоне частот проверяют в электрическом режиме. На сигнальном щите каждой испытываемой микросхеме соответствует группа сигналов, информирующих об обрыве, коротких замыканиях и т.п. При обнаружении частот, на которых наблюдается выход микросхем из строя, проводятся дополнительные испытания группы микросхем на вибрацию на этих частотах.

Устойчивость микросхем к длительной вибрации на фиксированной частоте проверяют на вибростенде, обеспечивающем гармонические колебания с заданным ускорением по нескольким десяткам часов в каждом положении микросхем.

Устойчивость микросхем к одиночным ударам проверяется на ударном стенде с ускорением, во много раз превышающем ускорение свободного падения, и очень короткой длительностью удара. Микросхемы помещают в металлическую гильзу (сборку) и заливают парафином. Обычно микросхемы в сборке подвергаются нескольким одиночным ударам.

Устойчивость микросхем к многократным ударам проверяют на ударном стенде. В каждом положении микросхема подвергается заданному количеству ударов с очень большим ускорением.

Устойчивость к постоянному ускорению производится на центрифуге. Обычно испытание проводят при ускорении $150g$ в течение нескольких минут в каждом положении прибора.

Климатические испытания - это проверка на теплоустойчивость; холодоустойчивость; влагуустойчивость; на устойчивость к пониженному атмосферному давлению; к повышенному атмосферному давлению и к воздействию морского тумана.

Теплоустойчивость микросхем испытывается в камере тепла при температурах порядка 120°C в предельном электрическом режиме. Время выдержки и электрический режим испытаний оговаривается в ТУ.

Холодоустойчивость микросхем испытывается в камерах холода при температуре -60°C .

Испытание на влагуустойчивость проводится в камере влажности в течение нескольких суток при температуре и влажности, оговоренных в ТУ.

Устойчивость к термоциклированию устанавливается следующим образом. Микросхему помещают в камеру тепла, температура которой доведена до предельно допустимой, и выдерживают там в течение 30 мин. Потом микросхему сразу же переносят в камеру холода и выдерживают там в течение 30 мин. Затем все повторяется. Обычно проводят три цикла испытаний.

Устойчивость к пониженному атмосферному давлению проверяют в барокамере при давлении 5 мм рт.ст. По окончании испытания микросхемы извлекают из камеры и измеряют электрические параметры, оговоренные в ТУ.

Устойчивость к повышенному атмосферному давлению проверяют в барокамере при давлении 3 атм.

Устойчивости к воздействию морского тумана проверяют при температуре $+26^{\circ}\text{C}$ в камере, в которой созданы условия, имитирующие морской туман путем распыления растворов солей. Обычно испытание длится несколько суток. По окончании испытаний измеряют электрические параметры, оговоренные в ТУ.

Радиационные испытания относятся к числу специальных и производятся путем облучения испытуемых микросхем заданной дозой ионизирующего излучения: гамма-излучением, рентгеновским излучением потоком нейтронов и т.п. После испытаний производятся электрические измерения параметров микросхем, оговоренных в ТУ.

3. Надежность интегральных схем

Одним из основных преимуществ микроэлектроники является возможность создания на базе интегральных схем высоконадежных узлов, блоков и радиоэлектронной аппаратуры в целом. Высокая надежность интегральных схем обеспечивается особыми технологическими и конструктивными принципами их изготовления, а также использованием новых особо чистых материалов.

Под надежностью интегральных схем понимают свойство выполнять заданные функции при сохранении эксплуатационных показателей в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Надежность различных элементов радиоэлектронной аппаратуры, в том числе и интегральных схем, характеризуется вероятностью безотказной работы (P) и интенсивностью отказов в единицу времени (λ). Опыт показывает, что надежность гибридных микросхем характеризуется интенсивностью отказов, что в нормальных условиях эксплуатации составит $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-9}$ в час, т.е. в десятки и сотни раз меньше, чем обычных дискретных элементов.

При оценке надежности интегральных схем используется ряд терминов, на которых следует остановиться.

Параметр-критерий годности - параметр микросхемы, по величине или изменению которого считают микросхему годной или отказавшей.

Отказ - событие, заключающееся в полной утрате работоспособности микросхемы или уходе значения одного или нескольких параметров, установленных техническими условиями в качестве критериев годности, за пределы заданных норм.

Полный отказ - нарушение электрической, механической или тепловой прочности микросхемы (короткое замыкание, пробой диэлектрика, отрыв вывода и пр.), а также уход параметров - критериев годности за критическое значение, при котором микросхема становится практически неработоспособной в любой схеме применения при допустимых условиях эксплуатации.

Условный отказ - отказ, возникающий в результате постепенного ухода одного или нескольких параметров-критериев годности (без потери работоспособности микросхем) за установленную (условную) норму, указанную в технических условиях.

Гарантийная наработка - наработка микросхемы, до завершения которой изготовитель гарантирует безотказную работу микросхемы

(при условии соблюдения правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования) не менее величины

$$P(t_{2n}) = 1 - \frac{q}{100},$$

где q - установленный техническими условиями процент микросхем с отклонениями от технических условий, допускаемый за время гарантийной наработки.

Доверительные границы - величины, устанавливаемые по результатам испытаний, в пределах которых с заданной достоверностью находится оцениваемый параметр. Различают нижнюю и верхнюю доверительные границы. Достоверность (доверительная вероятность) P^x - вероятность того, что оцениваемый параметр лежит между доверительными границами.

Минимальное значение вероятности безотказной работы P_2 - значение вероятности безотказной работы микросхем, вероятность приема которых равна риску заказчика β , т.е. уровень надежности, который подтверждается с достоверностью

$$P^x = 1 - \beta.$$

Величина P_2 задается на время t_3 , обусловленное требованиями технических условий по надежности микросхем, или пересчитывается на время испытаний t_u .

Риск заказчика β - вероятность того, что по результатам выборочного контроля могут быть приняты микросхемы, не отвечающие требованиям технических условий. Риск изготовителя λ - вероятность того, что по результатам выборочного контроля могут быть забракованы микросхемы, удовлетворяющие требованиям технических условий.

Вероятность безотказной работы P , т.е. вероятность того, что в определенных условиях работы (испытаний) в течение заданного времени t отказа не возникнет, и интенсивность отказов λ , т.е. среднее число отказов в единицу времени, связаны соотношениями

$$\lambda = \frac{1 - P}{t} \quad \text{при } P \geq 0,9 \quad \text{и} \quad \lambda = -\frac{2,3 \lg P}{t} \quad \text{при } P < 0,9.$$

Высокая надежность интегральных схем практически не позволяет определять показатели их надежности обычными методами математической статистики при нормальных условиях испытаний. Например, если для подтверждения интегральности отказов 10^{-5} в час с достоверностью 0,95 требуется около $5 \cdot 10^5$ элементо-часов наработки при выборке в 1000 элементов, то для подтверждения интенсивности отказов 10^{-7} в час при тех же условиях потребуется уже более 10 лет. Ясно, что такие испытания на надежность являются неприемлемыми.

Поэтому применяемые в настоящее время методы оценки надежности интегральных микросхем основываются не на определении фактической надежности микросхем, а на подтверждении лишь нижней приемлемой границы надежности, по которой производится контроль уровня производства. Фактическая надежность интегральных схем определяется по данным эксплуатации микроэлектронной аппаратуры и обобщения статистического материала различных видов испытаний.

В качестве показателя производственной надежности, оцениваемого по результатам испытаний в процессе производства в максимально допустимых электрических режимах при максимальной положительной температуре, принимается минимальное значение вероятности безотказной работы на условный каскад микросхемы (обычно уровень надежности на 500 часов при риске заказчика $\beta = 0,1$). За условный каскад гибридной микросхемы принимается один полупроводниковый навесной элемент совместно со средним количеством связанных с ним пассивных элементов. Введение понятия условного каскада позволяет при определении размера выборки для испытаний учитывать сложность микросхем.

Исходные данные, необходимые для проведения испытаний микросхем на надежность, устанавливаются техническими условиями на микросхемы. Таковыми данными являются:

минимальное значение вероятности безотказной работы P_1 на время t_1 в заданном режиме испытаний (P_1 принимается равным заданному в технических условиях значению P_{cm} на время t_1);

Если закон распределения отказов во времени неизвестен, то по заданным значениям P_1 , P_2 , λ и β определяют:

размер выборки n , т.е. часть партии микросхем, непосредственно подвергаемая испытанию с целью оценки надежности всей партии, состоящей из N микросхем;

приемочное число C , характеризующее наибольшее число отказавших микросхем в выборке, при котором результаты испытаний считаются положительными.

Приемочное число C определяется по табл. IV.1 в зависимости от значений α и β и величины A , определяемой по формуле

$$A = \frac{(I - P_2) (I + P_1)}{(I - P_1) (I + P_2)}$$

Размер выборки n определяется по табл. IV.2 в зависимости от величины приемочного числа C , заданного значения P_2 и риска за-казчика β .

Оценка результатов испытаний производится по истечении времени $t_n = t_3$. Если число отказавших микросхем $d \leq C$, то результаты испытаний считаются положительными, если $d > C$, то отрицательными.

Допускается испытание двух подвыборок при условии, что суммарное количество микросхем в обеих подвыборках не превысит числа микросхем, соответствующего выбранному плану контроля в полном объеме. В этом случае размер первой подвыборки устанавливается соответствующим заданному P_2 и предыдущему (меньшему) значению приемочного числа C . Рассмотрим один из примеров. Допустим, что $P_1=0,985$; $P_2=0,9$; $t_3=500$ часов; $\alpha=0,05$; $\beta=0,1$.

Определяем приемочное число C , для чего находим величину A

$$A = \frac{(I - P_2) (I + P_1)}{(I - P_1) (I + P_2)} = \frac{(I - 0,9) (I + 0,985)}{(I - 0,985) (I + 0,9)} = 6,96.$$

По табл. IV.1 для $A=6,96$, $\alpha=0,05$ и $\beta=0,1$ находим $C=2$. По табл. IV.2 для $P_2=0,9$; $C=2$ и $\beta=0,1$ находим размер выборки $n=52$ микросхем.

В случае, если выборку разделить на две части, по табл. IV.2 находим:

$$\begin{aligned} \text{для } C_1 &= 1 - n_1 = 37; \\ \text{для } C_2 &= 1 - n_2 = 22. \end{aligned}$$

Если в течение 500 час испытаний первой подвыборки в количестве 37 микросхем число отказов не превышает одного, результаты испытаний положительны. В случае трех отказов результаты испытаний отрицательны. При получении двух отказов испытывается вторая подвыборка оставшихся 15 микросхем. При отсутствии отказов во второй подвыборке результаты испытаний положительны. При наличии хотя бы одного отказа суммарное число отказов равно трем (превышает $C=2$) и результаты испытаний отрицательны.

Т а б л и ц а IY.I

Значения приемочного числа C в зависимости
от величин λ , β и A

β	C	A при λ		β	C	A при λ	
		0,05	0,1			0,05	0,1
0,1	0	44,7I	2I,82	0,2	0	3I,25	I5,26
	I	IO,94	7,3I		I	8,42	5,63
	2	6,5I	4,83		2	5,23	3,89
	3	4,89	3,83		3	4,04	3,I6
	4	4,06	3,29		4	3,4I	2,76
	5	3,55	2,94		5	3,03	2,5I
	6	3,2I	2,70		6	2,76	2,33
	7	2,96	2,53		7	2,57	2,20
	8	2,77	2,39		8	2,42	2,09
	9	2,62	2,28		9	2,3I	2,0I
	IO	2,50	2,I9		IO	2,2I	I,94
	II	2,40	2,I2		II	2,I3	I,89
	I2	2,3I	2,06		I2	2,07	I,84
	I3	2,24	2,00		I3	2,0I	I,80
	I4	2,I8	I,95		I4	I,96	I,76
	I5	2,I2	I,9I		I5	I,92	I,73
	I6	2,07	I,87		I6	I,88	I,70
	I7	2,03	I,84		I7	I,84	I,67
	I8	I,99	I,8I		I8	I,8I	I,65
	I9	I,95	I,78		I9	I,78	I,63
20	I,92	I,76	20	I,76	I,6I		

Примечание. Если вычисленное значение A не совпадает с табличным, следует взять ближайшее табличное значение для данных рисков λ и β ; при этом, если взять большее табличное значение, то заданному риску λ будет соответствовать больший уровень надежности P_1' , чем используемый P_1 , и наоборот.

Размер выборки n в зависимости от величин P_2, β и C

β	C	n при P_2																
		0,999	0,995	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,85	0,80			
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
	0	2301	459	229	114	76	56	45	37	32	28	24	22	14	10			
	1	3888	753	388	193	128	96	76	63	54	47	42	37	24	18			
	2	5820	1062	532	265	176	132	105	87	74	65	57	52	34	25			
	3	6679	1334	668	333	221	165	132	109	94	82	72	65	43	32			
	4	7991	1596	798	398	265	198	158	131	112	98	87	78	52	38			
	5	9272	1853	927	462	308	231	182	153	130	114	101	91	60	44			
	6	10530	2104	1050	527	349	261	209	174	148	129	115	103	68	50			
	7	11768	2352	1175	588	390	293	234	194	166	143	129	116	76	56			
	8	12992	2596	1296	648	431	323	258	215	183	160	142	128	84	62			
	9	14203	2838	1418	709	471	353	281	235	200	175	156	139	92	68			
0,1	10	15403	3078	1537	770	513	383	306	255	218	190	168	152	100	74			
	11	16595	3317	1657	829	551	413	330	275	235	206	182	163	108	80			
	12	17778	3553	1775	893	592	442	353	294	252	219	195	175	116	86			
	13	18955	3789	1893	945	632	472	377	318	268	235	209	187	124	92			
	14	20125	4022	2099	1003	671	500	400	333	285	250	220	198	131	98			
	15	21289	4255	2126	1062	708	533	424	353	301	264	235	211	139	104			
	16	22448	4487	2241	1119	746	560	446	372	318	278	247	221	147	109			
	17	23602	4717	2357	1177	786	590	470	391	335	293	259	234	155	115			
	18	24753	4948	2472	1234	824	619	492	410	350	307	273	245	162	121			
	19	25899	5177	2587	1292	862	645	518	429	367	320	285	256	169	127			
	20	27041	5405	2700	1348	898	676	540	448	383	335	297	268	177	132			

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	1608	321	160	79	53	39	31	26	22	19	17	15	10	7	
1	2993	598	299	149	99	74	59	49	42	36	32	29	19	14	
2	4278	855	427	213	142	106	85	70	60	52	46	42	27	20	
3	5513	1102	550	275	183	137	109	91	78	68	60	54	35	26	
4	6720	1343	672	335	223	167	135	111	95	83	73	66	43	32	
5	7904	1579	790	394	262	196	157	130	112	97	86	78	51	38	
6	9073	1814	906	452	301	226	180	150	128	112	99	89	59	44	
7	10230	2045	1022	511	340	255	203	169	145	127	112	101	67	50	
8	11378	2274	1136	569	378	283	227	188	161	141	125	112	74	55	
9	12517	2502	1250	626	416	312	249	208	177	155	138	124	82	61	
10	13648	2728	1363	682	454	339	272	225	193	169	150	135	89	66	
11	14775	2953	1476	738	491	368	294	244	210	183	162	146	97	72	
12	15895	3178	1588	794	530	396	316	263	226	197	175	157	104	77	
13	17011	3401	1699	849	567	423	338	282	241	212	187	168	112	88	
14	18123	3622	1810	905	602	451	360	300	256	225	199	179	119	89	
15	19231	3844	1921	960	640	479	383	319	273	239	212	190	126	94	
16	20335	4065	2031	1016	678	508	405	333	289	253	224	201	134	100	
17	21437	4286	2142	1070	714	536	427	355	304	266	236	213	141	105	
18	22536	4505	2251	1126	750	568	449	374	320	280	248	223	148	110	
19	23632	4724	2361	1180	787	590	471	392	336	294	260	235	156	116	
20	24726	4943	2470	1236	824	618	493	410	351	307	273	245	163	121	

Примечание. Если значение R_2 не совпадает с табличным, размер выборки n определяется путем интерполяции $n = \frac{1-R_2}{1+R_2} n'$, где R_2 — ближайшее табличное значение вероятности безотказной работы; n' — размер выборки, выданный по значениям R_1, C и B .

Комплекс внешних воздействий (воздействующие факторы, их последовательность и длительность воздействия), которому подвергаются микросхемы при испытаниях на надежность, определяется степенью влияния окружающих условий на надежность конкретных типов микросхем и оговаривается наряду с электрическим режимом работы микросхемы в технических условиях.

В качестве параметров-критериев годности при испытаниях на надежность рекомендуется выбирать параметры, от значений которых зависит работоспособность аппаратуры в реальных условиях эксплуатации. Нормы на значения параметров-критериев годности устанавливаются либо в виде абсолютных величин, либо в виде допустимого изменения параметра по сравнению с первоначальным его значением. При необходимости допускается устанавливать несколько норм на значения параметров-критериев годности с учетом специфики применения микросхем. При этом одна из установленных норм является основной, по которой оцениваются результаты испытаний, а другие являются справочными и служат для контроля неизменности уровня надежности и набора информации.

В процессе производства целесообразно вести непрерывный контроль надежности микросхем. При непрерывном методе испытаний микросхемы отбираются через равные промежутки времени равными группами. Количество микросхем в группе Δn и время t' , через которое ставят эти группы на испытания, определяются по формулам:

$$\Delta n = \frac{n}{z}, \quad t' = \frac{t_n}{z},$$

где t_n - продолжительность периода, за который производится оценка надежности микросхем;

z - количество групп.

Каждую группу микросхем снимают с испытаний по истечении времени t_n и заменяют новой группой микросхем.

Результаты испытаний оценивают по числу отказавших микросхем в z группах, которые составляют выборку и испытаны в течение времени t_n .

Метод непрерывных испытаний может быть использован для контроля технологии производства микросхем. С этой целью по окончании первого цикла и в дальнейшем каждый раз при замене очередной группы испытуемых микросхем определяют показатели надежности R_c - значение вероятности безотказной работы за цикл или λ_c - значение интенсивности отказов за цикл.

Значения средней вероятности безотказной работы $P_i(t_{ni})$ или средней интенсивности отказов $\lambda_{cp.i}$ на время t_{ni} , по результатам испытаний каждой выборки микросхем, определяются по формулам:

$$P_i(t_{ni}) = \frac{n_i - d_i}{n_i}, \quad \lambda_{cp.i} = \frac{d_i}{(n_i - \frac{d_i}{2})t_{ni}}$$

где n_i - число испытываемых микросхем при i -ом испытании;

d_i - количество полных отказов, полученное к моменту времени t_{ni} , на которое рассчитывается P_i или $\lambda_{cp.i}$,

Допустим, что $P_2 = 0,99$; $t_3 = t_4 = 1000$ час; $\beta = 0,1$; $C=1$; $n=388$ шт. Требуется проконтролировать надежность микросхем один раз в два месяца ($t_n = 6$ мес.). Тогда, принимая число групп $\tau = 4$, получим

$$\Delta n = \frac{n}{\tau} = \frac{388}{4} = 97 \text{ шт.}$$

Периодичность замены групп t' будет равна

$$t' = \frac{t_n}{\tau} = \frac{6 \text{ мес.}}{4} = \frac{24 \text{ недели}}{4} = 6 \text{ недель.}$$

Таким образом, для испытаний микросхем на надежность непрерывным методом следует ставить на испытание каждые шесть недель по 97 микросхем или по 16-17 микросхем в неделю. Оценку результатов испытаний следует производить после того, как все четыре группы микросхем будут испытаны в течение времени $t_n = 1000$ час. Если число отказавших микросхем не превысит одной, то результаты испытаний считают положительными.

Очень важным вопросом является оценка количественных показателей надежности гибридных микросхем на этапе проектирования. Такая оценка будет весьма приближенной, однако она даст возможность сопоставить результаты расчета с заданными требованиями по надежности.

Основными исходными данными при расчете надежности гибридных интегральных схем при их проектировании являются средние статистические данные по интенсивности отказов активных и пассивных элементов гибридных микросхем. Эти данные накапливают постепенно по результатам различных видов испытаний и исследований надежности гибридных микросхем и их элементов аналогичного назначения. Расчет надежности микросхемы ведется по полным отказам. Для определения расчетной интенсивности отказов λ_p и вероятности безотказной работы $P_p(t_3)$ все элементы проектируемой микросхемы разбиваются на группы, имеющие примерно одинаковые интенсив-

ности отказов внутри группы. Подсчитывается количество элементов в каждой группе N_i . Затем вычисляются произведения $N_i \lambda_i$, характеризующие долю отказов, вносимых элементами данной группы в общую интенсивность отказов микросхемы. Общая интенсивность отказов микросхемы определяется путем суммирования произведений $N_i \lambda_i$ по всем K группам по формуле

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^K N_i \lambda_i .$$

Вероятность безотказной работы микросхемы в отношении появления полных отказов определяется по формулам:

$$P_p(t_s) = 1 - \lambda_p t_s \quad \text{при } \lambda_p t_s \leq 0,1; \quad P_p(t_s) = e^{-\lambda_p t_s} > 0,1.$$

Приведенный выше анализ надежности интегральных схем и методов испытаний на надежность показывает, что общие положения теории надежности справедливы и для изделий микроэлектроники, но практическое их применение связано с рядом трудностей.

В частности, оценка истинной надежности микросхем традиционным статистическим методом приводит к большим затратам средств, необходимого числа схем и времени, нужного для проведения испытаний. В связи с этим проводятся исследования, направленные на изыскание методов ускоренного получения информации о надежности микросхем. Перспективным является разработка методов ускоренных испытаний, а также применение физико-технических методов неразрушающего контроля для индивидуального прогнозирования надежности.

Ускоренные методы испытаний могут быть разделены на:

- 1) ускоренные испытания в нормальных условиях и режимах;
- 2) ускоренные форсированные испытания, когда используются форсированные режимы работы микросхем или они работают в более жестких внешних условиях.

В первом случае учитываются более узкие допустимые пределы изменения параметра, определяющего параметрические отказы, а также физические или математические модели отказов и по изменениям основного параметра микросхемы можно определить ожидаемое среднее время появления катастрофических или параметрических отказов. При форсированных испытаниях используют изменение одного воздействующего фактора (например, нагрузки или температуры окружающей среды и т.п.) либо одновременное воздействие нескольких факторов, связанных с режимами или условиями работы микросхем.

Следует отметить, что ускоренные испытания целесообразны тогда, когда известны основные физико-химические процессы, вызывающие отказы, и, следовательно, зависимости изменения интенсивности отказов от возрастания физических факторов, характеризующих режим работы и условия эксплуатации микросхем.

Нахождение чисто статистических (корреляционных) связей между интенсивностями отказов при ускоренных испытаниях и при реальных режимах и условиях работы микросхем требует проведения двух групп испытаний (ускоренных и обычных) и дает лишь частную корреляционную связь между результатами ускоренных и обычных испытаний, которая не позволяет оценить роль каждого из физических факторов и влияния на отказы различных физико-химических процессов.

Под физико-техническими методами неразрушающего контроля (НРК) понимаются все методы измерения физических, физико-химических и других характеристик материалов и изделий, в том числе характеристик и параметров электрических сигналов и цепей, при которых сохраняется качество и надежность контролируемого изделия. Применение методов НРК обусловлено необходимостью выявления не только дефектов, вызывающих отклонение свойств и параметров микросхем (или потерю их работоспособности) уже в момент контроля, но и дефектов скрытых и потенциальных, способных создавать отказы через некоторое время. Обнаружение таких дефектов позволяет с определенной достоверностью прогнозировать индивидуальное время безотказной работы контролируемой микросхемы, не прибегая к статистическим результатам, полученным в процессе испытаний аналогичных схем на срок службы.

Благодаря использованию методов НРК можно:

1) контролировать микросхемы в процессе и после окончания производства, осуществляя отбраковку схем со скрытыми дефектами или предпосылками к их появлению и повышая тем самым надежность изготовленных микросхем;

2) контролировать микросхемы после потери ими частичной или полной работоспособности, позволяя вскрывать причины уже происшедших отказов и как бы увеличивая тем самым объем информации, которая может быть использована при совершенствовании технологического процесса изготовления микросхем, а также при их проектировании. Это также способствует повышению надежности микросхем.

В настоящее время для оценки качества и надежности микросхем и их компонентов наиболее применимыми являются следующие физико-

технические методы НРК: рентгено-телевизионный, метод рентгеновской дифракционной топографии, метод сканирующей электронной микроскопии, тепловые методы, методы измерения шумовых характеристик и нелинейностей, голография, метод микротоков.

Развитие, совершенствование и применение методов НРК для оценки надежности микросхем определяется их информативностью и быстродействием получения информации, возможностью построения автоматических измерительных устройств. Данные, характеризующие возможности каждого из методов НРК и области их применения, приведены в табл. IУ.3.

Естественно, что ни один из рассмотренных методов в силу своих ограниченных возможностей не может самостоятельно обеспечить полного контроля качества и определения надежности микросхем как в процессе производства, так и готовых. Данная задача должна решаться в комплексе на базе электрических методов и физико-технических методов НРК, исходя из их информативности и эффективности применения. При этом также необходимо учитывать-будет ли контроль сплошным или выборочным.

При выборочном контроле использование неразрушающих методов позволяет:

сократить объем выборки при сохранении прежней достоверности и надежности выборочного контроля;

повысить достоверность (надежность) контроля без увеличения объема выборки.

При сплошном контроле в основе выбора метода лежит экономическая эффективность, что будет определяться степенью автоматизации неразрушающего контроля.

Что касается информативности, то из рассмотренных выше наибольший интерес представляют методы визуальной дефектоскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгенодефектоскопии и инфракрасной радиометрии. Метод визуальной дефектоскопии наиболее опробованный и экономически выгодный. Для повышения его информативности необходимо для каждого технологического производства микросхем систематизировать проявление дефектов по этапам техпроцесса (после каждой технологической операции в виде фотоснимков) с указанием возможных причин их образования в форме наглядных пособий.

Метод сканирующей электронной микроскопии может успешно применяться для оперативного изучения поверхностных дефектов микросхемы после наиболее ответственных (исходя из ка-

чества и надежности) операций как при групповой, так и индивидуальной технологии микросхем. При этом контроль может быть сплошным или выборочным. Наиболее целесообразным является использование данного метода для качественного и количественного исследования поверхностных явлений в микросхемах, связанных с распределением поверхностного потенциала, инверсионных каналов, для оценки областей или участков с повышенной плотностью заряда, для определения пространственного рельефа залегания и контуров р-п-переходов, изучения динамических характеристик микросхем.

Из методов рентгенодефектоскопии наиболее перспективным является рентгено-телевизионный для контроля скрытых дефектов герметизированных микросхем. Метод инфракрасного контроля позволяет исследовать тепловые режимы, определять рабочую температуру отдельных компонентов и, тем самым, оценивать качество и прогнозировать надежность микросхем. Для получения и исследования температурных профилей микросхем необходимо решить вопросы уравнивания излучательной способности компонентов микросхем, применять ИК-радиометры для снятия температурных полей с выдачей информации на ЭЦМ.

Следует отметить, что несмотря на ценность информации о качестве и надежности микросхем, получаемой методами НРК и их возможностями, практическое внедрение методов затруднено и осуществляется медленно из-за сложности построения на их основе измерительных устройств, отвечающих требованиям современной интегральной технологии по производительности, регистрации результатов и автоматизации.

Несмотря на это, уже сейчас можно выделить две наиболее важные области применения методов НРК:

1) пооперационный контроль изготавливаемых микросхем на этапе отработки и совершенствования технологического процесса, что позволит заранее отбраковать потенциально ненадежные образцы схем, для чего требуется построение автоматических систем управления качеством;

2) анализ отказов и установление причин брака микросхем и их компонентов, для чего могут быть применены установки НРК с последующей обработкой информации на ЭЦМ.

Т а б л и ц а IV.3

Общая характеристика методов НК микроскопом

Наименование метода	Возможность метода и виды дефектов	Разрушающая способность, чувствительность	Получение информации, возможность автоматизации
I Рентгено-телевизионный	2 При снятии портретов открытых и герметизированных микроскопом: нарушение геометрических размеров пассивных элементов; механические дефекты: обрывы токовыводов активных элементов; обрывы токоведущих соединений; неоднородности и включения (пашины, трещины, пустоты, обрывы); качество соединений при сварке, термокомпрессии, пайке; дефекты, обусловленные ошибкой операторов при разварке активных элементов (несоответствия, к.з., обрывы).	3 РС - 10 мкм; 25 линий/мм; Размер фокусного пятна 0,3 мкм	4 Наблюдение, измерение и фотографирование увеличенного изображения микроскопом на экране ЭЛТ. Автоматизация невозможна.
Рентгеновская дифракционная топография	Структурные дефекты в объеме и на поверхности полупроводниковых элементов для открытых микроскопом	РС - 5 мкм; Увеличение до 500 раз	Топограммы на фотобумаге. Автоматизация невозможна.

1	2	3	4
<p>Сканирующая электронная микроскопия</p>	<p>При топографии открытых микросхем: размеры и форма дислокации и дефектов; качество активных элементов: размеры областей, находящихся под соединением или защитными слоями; смещение на p-n-переходах, начиная с 10 мВ; качество соединений выводов</p> <p>Распределение электрических потенциалов (электрического поля) рабочей микросхемы</p>	<p>РС - 10А; Плотность сканирования 100 мкм²+ 1,5 мм²</p>	<p>Наблюдения, измерения увеличенного изображения на экране ЭПТ; фотографирование. Возможна регистрация и обработка информации с помощью ЭПТМ</p>
<p>Измерение шумовых характеристик</p>	<p>Разбор и уход номиналов компонентов микросхем</p> <p>Качество соединений</p> <p>Структурные дефекты в объеме и на поверхности компонентов микросхем</p>	<p>Определяется чувствительность приборов для измерения шумовых характеристик</p>	<p>Оценка качества осуществляемых по показаниям измерительных приборов после испытаний.</p> <p>Возможна автоматическая регистрация результатов контроля с помощью печатающего механизма</p>

1	2	3	4
Тельные	Снятие температурных полей микросхем и определение тепловых режимов отдельных компонентов	РС-25 мкм; 0,5-20С	Контроль температуры по ин-формации, записанной на са-мопишущем приборе или зафик-сированной на экране ЭЛТ. Возможна автоматическая ре-гистрация результатов кон-троля
Голография	Получение объемного изображения микро-схем в увеличенном масштабе	РС - 0,3 мм (при оценке дефектов); увеличение изоб-ражения до 100 раз	Визуальный контроль микро-схемы
Измерение нелинейности	Неравномерности осаждения пленки Дефекты подложки и пленочных компонен-тов Несовершенство материалов и контактных соединений Определение коэффициента потерь на гис-терезис в магнитных компонентах и мате-риалах	Определяются точ-ностью и чувстви-тельностью стандартных измерительных при-боров	Оценка по графикам, построен-ным в результате снятия кри-вых нелинейности
Микрорежим	Качество активных элементов микросхем: Р-П-переходов; мест и вида нарушений кристалличе-ской структуры полупроводникового материала; характер изменения электрических параметров	Определяется точ-ностью и чувстви-тельностью приборов для измерения малых по-токов	Расчетным путем на основе данных микрорежима активных элементов

4. Пути повышения надежности микросхем

Микросхемы по своей природе более надежны, чем аналогичные схемы на дискретных компонентах, что объясняется следующими причинами:

- совместимостью компонентов микросхемы;
- меньшим количеством межкомпонентных соединений;
- защищенностью наиболее чувствительных элементов схемы;
- автоматизацией ручных операций;
- малыми мощностями рассеяния;
- отсутствием возможности неправильного применения компонентов;
- отсутствием механизма изнашивания при нормальных условиях работы;
- конкретной областью применения компонентов;
- выполнением основных операций по созданию структур в едином технологическом цикле;
- защищенностью поверхности полупроводника, особенно в месте выхода р-п-перехода на поверхность.

Однако возрастающая функциональная сложность микроэлектронной аппаратуры, различные области применения микросхем, повышение степени интеграции компонентов требуют повышения качества и надежности микросхем.

Технические пути повышения надежности микросхем могут быть разными: развитие научных основ проектирования изделий (аппаратуры) с целью обеспечения заданных требований к надежности и долговечности и принятие ряда мер по совершенствованию методов конструирования, улучшение технологии, применение более надежных материалов и комплектующих изделий, применение специальных приемов, изучаемых теорией надежности (например, резервирования) и др. Результаты испытаний микросхем на надежность и прогнозирование надежности показывают, что очень полезным инструментом для повышения надежности микросхем, особенно тех, которые должны иметь высокую надежность, является анализ отказов. Анализ отказов на основе механизмов, возникающих при ускоренных испытаниях микросхем на надежность, требует понимания физики отказов.

Дальнейшее повышение надежности микросхем требует выяснения причин отказа или ухудшения рабочих характеристик схем и устранения этих причин или ослабления их действия. Причем, вначале из

всех возможных отказов следует выделить отказы, наиболее типичные для микросхем, т.е. обусловленные физикой поверхности, нарушением кристаллической структуры полупроводника, химическим взаимодействием различных материалов, несовершенством термокомпрессии и сварки, усадкой компаунда при герметизации, механическими повреждениями схемы, затем определить и устранить их причины.

Так как надежность микросхем, заложенная при проектировании, должна быть обеспечена в процессе изготовления схем, то выбор технологии и ее совершенствование является во многом определяющим при разработке высоконадежных микросхем.

Поэтому достичь высокой надежности изделий микроэлектроники можно путем реализации единой системы мероприятий, включающих: оптимизацию проектирования микросхем по критерию надежности; использование оптимального построения технологического процесса, исходя из принципа контролируемости каждой технологической операции;

применение систем автоматического управления качеством технологического процесса изготовления микросхем;

тщательный анализ отказов микросхем при испытаниях и эксплуатации.

Совершенно очевидным и необходимым условием обеспечения высокой надежности при реализации данной системы мероприятий является введение рациональной системы контроля качества исходных материалов, полуфабрикатов, элементов и комплектующих изделий: микросхем целиком на этапах разработки, при опытном и серийном производстве, при всех видах испытаний и эксплуатации. Естественно, что такая система контроля качества должна базироваться на комплексе методов разрушающих и неразрушающих испытаний при обязательном исследовании физики отказов.

Г л а в а У

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Интенсивное развитие микроэлектроники в последние годы привело к подлинной революции во многих основных областях современной техники. Характерной чертой микроэлектроники, отличающей ее от других отраслей техники, является постоянное практическое использование самых последних достижений науки и техники.

Развитие микроэлектроники показало возможность использования таких направлений науки, которые ранее, казалось, никакого отношения к электронике иметь не могли. Микроэлектроника быстро осваивает оптические явления, сверхпроводимость, "горячие электроны" в полупроводниках и металлах, электрохимические явления в жидких и твердых электролитах и т.д. Все более широко начинают использоваться результаты исследования биологических систем.

Благодаря развитию микроэлектроники на повестку дня уже поставлены и практически решаются задачи построения малогабаритных самоорганизующихся и обучающихся систем управления и классификации. Уже не кажется фантастической мыслью о возможности построения техническими методами "думающих" систем, сравнимых по своим логическим возможностям с человеком.

Функциональные схемы

Одним из новых направлений микроэлектроники является создание функциональных схем. Под функциональной схемой понимается полупроводниковая интегральная схема, выполняющая определенную достаточно сложную законченную функцию и неделимая на отдельные элементы.

В функциональных схемах могут быть использованы паразитные связи между обычными элементами полупроводниковых интегральных схем, либо новые явления и свойства твердого тела и твердотельных приборов.

Построение функциональных схем позволяет значительно сократить число составляющих элементов, так как активную роль начинают играть и связи между ними, а таких связей много даже при малом числе элементов. В соответствии с этим оказывается возможным значительно понизить стоимость, габариты и, главное, резко повысить надежность схем и устройств в целом, что открывает новые конструктивно-технологические возможности

построения высоконадежной микроэлектронной аппаратуры.

Следует также отметить и другую сторону развития функциональных схем. В функциональных схемах нет отдельно сосредоточенных функционирующих транзисторов, конденсаторов и других привычных схемных элементов. По этой причине в основу принципов конструирования функциональных схем положены методы синтеза исходя из основных функций, выполняемых системой.

Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением являются одним из перспективных элементов для создания функциональных схем, так как они обладают большими функциональными возможностями по сравнению с обычными диодами и транзисторами. На основе приборов с отрицательным сопротивлением значительно проще создавать различного рода пороговые схемы, генераторы, резонансные усилители и многие другие устройства.

В биологических объектах элементы с отрицательным дифференциальным сопротивлением также играют решающую роль в обработке информации. В частности, электрическая активность нейрона определяется наличием в вольт-амперной характеристике клеточной мембраны участка отрицательного сопротивления.

Важное место в микроэлектронике начинают занимать твердотельные генераторы электромагнитных колебаний. В настоящее время уже экспериментально подтверждена возможность создания твердотельных генераторов достаточно большой мощности на частоты от инфранизких до десятков гигагерц. Таким образом, микроэлектроника успешно наступает на позиции вакуумной электроники и в наиболее "трудных" диапазонах длин волн. Конструкции таких приборов оказываются очень простыми. Они обладают высоким к.п.д., высокой надежностью и стабильностью в работе.

Одним из новых и перспективных направлений функциональной схемотехники в микроэлектронике являются нейристоры. Нейристор представляет собой активную линию, обладающую следующими основными свойствами: реагированием на внешний сигнал определенной величины, формированием импульсов строго определенной амплитуды и формы, постоянством скорости распространения, наличием зоны рефракторности и другими.

Благодаря этим свойствам нейристоры представляют логически полную систему элементов. Нейристоры открывают возможность создания устройств большой сложности на основе только одного типа элементов и двух способов их соединения. Такая простота позволяет создавать

практически все устройство в едином технологическом цикле, позволяет почти полностью избавиться от внешних соединений и осуществить всю сложную схему в объеме одного монокристалла с высокой плотностью монтажа. Нейристоры открывают новое, бестранзисторное направление в микроэлектронике, основанное на использовании некоторых закономерностей биологических систем.

Основным элементом нейристоров является, как правило, твердотельный прибор с отрицательным сопротивлением в вольт-амперной характеристике. Поэтому с развитием нейристорного направления резко возрастает интерес ко всякого рода приборам с отрицательным сопротивлением, к выяснению действующих в них механизмов, к выяснению возможности и к осуществлению активной связи между ними, к отысканию новых принципов построения таких приборов, к отработке технологии получения воспроизводимых приборов и т.д.

В настоящее время предложено несколько вариантов нейристоров, показавших их практическую реализуемость в микроэлектронном исполнении с требуемыми для построения сложных систем параметрами.

Большие интегральные системы (БИС)

Основными факторами, способствовавшими совершенствованию интегральных микросхем, явились требования высокой надежности, большого быстродействия и малой стоимости цифровых систем. Полная стоимость полупроводниковых микросхем, отнесенная к одной функции, связана сложной зависимостью с рядом параметров, в том числе с оплатой труда инженерного персонала, затратами на технологию, сборку и контроль.

Более высокая степень интеграции у БИС приведет к уменьшению временных задержек в межсоединениях современных вычислительных машин и таким образом увеличит быстродействие. Перенесение большей части схемного межсоединительного монтажа на кристалл увеличит надежность системы. С использованием БИС ожидается заметное увеличение надежности и ремонтпригодности аппаратуры.

Основными направлениями развития БИС являются:

I. Полупроводниковые микросхемы, близкие к 100-процентному выходу годных элементов или элементарных схем на кристалле. Повышение качества технологии уже позволило сократить средний размер элемента в полупроводниковой микросхеме с 0,07 до 0,036 мм² и увеличить среднюю площадь кристалла схемы с 1,68 до 4,5 мм². Это дает возможность изготавливать микросхемы с числом элементов 150-200 (счетчики, регистры, де-

шифраторы, преобразователи и др.).

2. Полупроводниковые микросхемы, изготавливаемые на неразрезаемой пластине кремния. Возможность работы с пластинами, которые имеют выход меньше 100%, обеспечивается применением избирательных межсоединений и избыточности по элементам.

3. Полупроводниковые микросхемы на основе структур металл-окисел-полупроводник. Только эти схемы в силу малых размеров элементов обеспечивают в настоящее время степень интеграции в несколько тысяч элементов на кристалле. Однако они уступают по быстродействию и стабильности параметров микросхемам на биполярных транзисторах.

4. Гибридные микросхемы, основанные на объединении на диэлектрических подложках кристаллов полупроводниковых микросхем с помощью пленочного монтажа. В результате получены схемы с высокой степенью интеграции. Большие гибридные схемы обычно не требуют сложной системы проектирования и проще в изготовлении, имеют большую гибкость в специализации функций по требованию заказчика и их изменений в ходе разработки, а также исправления брака на каждом отдельном этапе производства.

Повышение функциональной сложности микросхем при увеличении степени интеграции ведет к специализации функции, выполняемой схемой, и к сужению сферы ее применения. Необходимо или бесконечно расширять номенклатуру выпускаемых микросхем, или изготавливать микросхемы, специализация функций которых может быть проведена быстро и экономически выгодными методами.

При проектировании БИС стремятся придерживаться трех основных принципов:

организации дешевого и быстрого машинного проектирования вплоть до расчета топологии и трассировки межсоединений;

автоматического изготовления масок и фотошаблонов или непосредственная обработка пластин световым или электронным лучом без применения фотошаблонов;

максимальной стандартизации технологии базовой пластины с целью сокращения расходов, цикла проектирования и производства.

Все это требует введения программ машинного проектирования в производственный процесс изготовления БИС.

Интегральные схемы СВЧ диапазона

СВЧ интегральные микросхемы – сравнительно молодое направление в микроэлектронике, в последние годы стало одним из самых перспективных.

В настоящее время наиболее обширными потенциальными сферами использования интегральных микросхем СВЧ являются космические системы, в особенности радиолокационные станции (РЛС). Основными причинами быстрого развития микросхем СВЧ являются их сравнительно малая стоимость, высокая надежность, малые размеры, вес и высокие эксплуатационные характеристики. Рабочие частоты микросхем СВЧ простираются от 300 МГц до 100 ГГц, уровень мощности изменяется от долей милливатта до 1–2 Вт и более.

В настоящее время большинство СВЧ интегральных схем являются гибридными, а не полупроводниковыми. Основная причина заключается в том, что гибридная технология позволяет реализовать почти любое СВЧ-устройство. При полупроводниковой технологии еще не удается наладить дешевое серийное производство.

Бионические направления микроэлектроники

Для успешного развития бионического направления необходимо обратить самое серьезное внимание на исследование молекулярных механизмов функционирования различных элементов биологических систем. Особое внимание следует уделять исследованию свойств нейронов, являющихся основным конструктивным элементом в системе переработки и хранения информации в биологических объектах.

По современным представлениям, наиболее существенную роль в кодировании, передаче и запоминании информации на клеточном уровне играют клеточная мембрана и синапсы. Поэтому одной из первоочередных задач бионики, как раздела микроэлектроники, является выяснение механизмов функционирования мембраны и синапсов и отыскание путей их моделирования. Первые успехи в моделировании мембран уже достигнуты. В ряде лабораторий получены устойчивые биомолекулярные структурированные пленки в том числе и обладающие отрицательным сопротивлением. Эти работы открывают перспективы создания активных элементов на сверхтонких пленках.

В биологических объектах процессы обработки информации протекают, как правило, на молекулярном уровне. Благодаря этому достигаются весьма малые рабочие мощности и очень высокий уровень микроминиатюризации.

Это и есть собственно "молекулярная электроника" в отличие от называемого нередко этим термином направления полупроводниковых и функциональных схем. В электронике органические материалы используются пока только как защитные покрытия, хотя благодаря практически бесконечному многообразию их свойств они могут обеспечить работу элементов и устройств с практически неограниченным набором функциональных возможностей. По-видимому, только на уровне органических молекул может быть построена собственно молекулярная электроника, ибо другие материалы вряд ли смогут обеспечить требуемые для молекулярных элементов функциональные возможности. Это, естественно, потребует разработки не только новой технологии, но и существенно нового подхода к схемотехнике.

Оптоэлектроника

Под этим новым направлением электроники понимается возможность использования для хранения, передачи и обработки информации электромагнитных колебаний оптического диапазона, а также их преобразования в электрические сигналы. Оптоэлектронный элемент - это элемент, преобразующий по определенному закону оптические сигналы в электрические, или наоборот.

Одним из наиболее перспективных и важных направлений оптоэлектроники является разработка малогабаритных безвакуумных устройств для считывания и воспроизведения информации в виде зрительных образов. Это направление представляет интерес не только для создания безвакуумных приемных и передающих телевизионных трубок, но и для разработки устройств ввода и вывода информации в различных логических системах.

Важным направлением оптоэлектроники является создание устройств памяти на основе оптической записи и считывания информации. Для этой цели перспективно использование целого ряда эффектов в твердом теле: магнитооптические явления, термопластические явления, перезарядка светом глубоких уровней в высокоомных полупроводниках и ряд других.

Ионика

Электроника будущего будет использовать физические явления в жидкостях. Одним из интересных новых направлений микроэлектроники является ионика (хемотроника), которая использует для обработки информации процессы, связанные с переносом ионов, а не электронов, в отличие от электроники. На базе ионики могут быть реализованы микроминиатюрные

функциональные приборы для преобразования сигналов микроомощного уровня (до 10^{-3} вт) на низких и инфранизких частотах (до 10^{-7} - 10^{-5} гц), где применение твердотельных приборов либо неэффективно, либо в принципе невозможно. Верхняя граница рабочих частот ионотронов может достигать $10^5 \div 10^7$ гц.

Ионотроны хорошо стыкуются с полупроводниковыми приборами и существенно расширяют функциональные возможности последних.

На базе ионики могут быть реализованы усилители, интеграторы, элементы аналоговой памяти, бесконтактные коммутаторы с памятью, цветовые индикаторы напряжения, индикаторы ресурса электронного оборудования и различные типы других приборов.

В перспективе имеется возможность создания на базе ионики адаптивных однородных вычислительных сред по типу биологических нейронных сетей с высокой степенью надежности и многофункциональных по логической нагрузженности.

В задачах сегодняшнего дня ионика позволяет полностью исключить из бортовой аппаратуры несиловую электромеханику, создать микроминиатюрные накопители для различных задач обработки информации.

Ионические элементы просты по конструкции и выполняются на базе тонкопленочной и толстопленочной технологии современной микроэлектроники.

Криотроника

Развитие микроэлектроники приводит к существенному снижению потребляемых мощностей и габаритов и тогда проблема температурной стабильности параметров приборов сводится к следующему: оказывается выгоднее обеспечить температурную стабильность работы всего устройства в целом, а не отдельных его элементов. Термостатирование всего устройства и создание микроклимата позволит использовать все элементы в наиболее выгодных условиях, что обеспечит возможность создания более надежно работающих устройств в меньших габаритах и с меньшей, даже учитывая расходы на термостатирование, потребляемой мощностью.

Особый интерес представляет область сверхнизких температур, близких к абсолютному нулю. Область электроники, использующая явления в твердых телах при сверхнизких температурах, называют КРИОТРОНИКОЙ.

Наиболее важным физическим явлением здесь является сверхпроводимость, т.е. способность некоторых металлов полностью терять сопротивление прохождению электрического тока. На основе использования этого

эффекта можно создать, например, запоминающее устройство большой емкости.

Важнейшим направлением криотроники является создание криоэлектронных интегральных СВЧ-схем. Охлаждение до низких температур позволяет существенно снизить уровень шума и улучшить другие параметры таких схем.

ЛИТЕРАТУРА

- I. Интегральные схемы. Принципы конструирования и производства. Пер. с англ. под ред. А.А.Колосова, М., "Сов.радио", 1968.
2. Анализ и расчет интегральных схем. Ч. I и II. Под ред. Д.Линна и др. М., "Мир", 1969.
3. ШАЛАБУТОВ Ю.К. Введение в физику полупроводников. Л., "Наука", 1969.
4. СТЕПАНЕНКО И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., "Энергия", 1967.
5. Микроэлектроника. Под ред. Э.Кеонджана. Пер. с англ. под ред. Н.П.Богородицкого. М., "Сов.радио", 1966.
6. КОЛОСОВ А.А., ГОРЕУНОВ Ю.И., НАУМОВ Ю.Е. Полупроводниковые твердые схемы. М., "Сов.радио", 1965.
7. ПРАНТИШВИЛИ И.В. и др. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. М., "Наука", 1967.
8. Многослойные полупроводниковые структуры. Рига, "Знание", 1967.
9. САЛЛИ И.В., ФАЛЫКЕВИЧ Э.С. Производство полупроводникового кремния. М., "Металлургия", 1970.
10. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление. Диффузия. Эпитаксия. Под ред. Р.Бургера и Р.Донована. Пер. с англ. М., "Мир", 1969.
11. ФЕДОТОВ Я.А. Основы физики полупроводников. М., "Сов. радио", 1969.
12. СТИЛЬБАНС Л.С. Физика полупроводников. М., "Сов.радио", 1967.
13. БОЛТАКС Б.И. Диффузия в полупроводниках. М., Физматгиз, 1961.
14. БОГОРОДИЦКИЙ Н.П., ПАСЫНКОВ В.В. Материалы радиоэлектронной техники. М., "Высшая школа", 1969.
15. ГАВРИЛОВ Р.А., СКВОРЦОВ А.М. Технология производства полупроводниковых приборов. М., "Энергия", 1968.
16. Proceedings of the JEEE, 1969, vol.57, N9.
17. ШИРОКОВ А.М. Основы надежности и эксплуатации электронной аппаратуры. М., "Наука и техника", 1965.
18. Надежность радиоэлектронных систем. Пер. с англ. под ред. А.М.Половко и А.Г.Варжапетяна. "Сов.радио", 1968.
19. ШОР Я.Б. Статические методы анализа и контроля качества и надежности. М., "Сов.радио", 1962.

20. ИТДЕЛЕНКО Б.В., БЕЗЫКОВ Ю.И., СОЛОВЬЕВ А.Х. Математические методы теории надежности. М., "Наука", 1965.
21. ЕФИМОВ И.Е., КАЛЬМАН И.Г., МАРТЫНОВ В.И. Надежность интегральных полупроводниковых схем. М., изд-во Комитета стандартов, мер и измер. приборов при Сов.Министров СССР, 1969.
22. ГРУНИЧЕВ А.С., КУЗНЕЦОВ В.П., ШИЛОВ Е.В. Испытание радиоэлектронной аппаратуры на надежность. М., "Сов.радио", 1969.
23. ВАСИЛЬЕВ Б.В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. М., "Сов. радио", 1970.
24. Физико-технические методы неразрушающего контроля элементов и приборов электронной техники. - Сб. статей по обмену опытом, М., 1969.
25. Микроэлектроника. - Сб. статей под ред. Ф.В.Лукина, вып.1-3. М., "Сов. радио", 1967-1969.

Содержание

	Стр.
Глава I. Физические основы полупроводниковых интегральных схем	
1. Основные понятия физики полупроводников.....	3
2. Контактные явления в полупроводниках.....	2I
3. Активные элементы полупроводниковых микросхем.....	33
4. Транзисторы.....	49
Глава II. Основы технологии полупроводниковых интегральных схем	
1. Технологический процесс изготовления полупроводниковых интегральных схем и его особенности.....	85
2. Материалы полупроводниковых интегральных схем.....	89
3. Подготовка материалов.....	93
4. Спекление поверхностей полупроводников.....	10I
5. Фотолитография.....	124
6. Диффузия примесей в полупроводниках. Особенности процесса диффузии.....	133
7. Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых пленок.....	163
8. Изоляция компонентов в полупроводниковых ИС..	176
9. Методы создания полупроводниковых ИС.....	188
10. Завершающие операции изготовления полупроводниковых ИС.....	196
Глава III. Проектирование интегральных схем	
1. Общие положения.....	203
2. Моделирование при проектировании интегральных схем.....	21I
3. Теоретическая модель полевого транзистора.....	214
4. Теоретическая модель биполярного транзистора.....	23I
5. Расчет параметров элементов микросхем.....	256
6. Расчет емкости микросхем.....	264
7. Расчет сопротивления резисторов микросхем.....	274
8. Индуктивные элементы микросхем.....	280
9. Многослойные ИС-структуры с распределенными параметрами.....	288
10. Особенности проектирования активных элементов интегральных схем.....	306

II. Некоторые особенности проектирования топологии микросхем	310
Глава IV. Измерения, испытания и надежность микросхем	
1. Измерения микросхем.....	316
2. Испытания микросхем.....	319
3. Надежность интегральных схем.....	323
4. Пути повышения надежности микросхем.....	339
Глава V. Новые направления развития микроэлектроники....	341
Литература.....	349

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ

(Учебное пособие)

Ответственный редактор проф. И. Е. Ефимов

Редактор Т. Н. Камнева

Корректор Н. В. Самохина

Л - 45278

Тираж 500

Заказ № 76

Подписано к печати

3/VI-71г. Объем 14,6 уч.-изд.л. Цена 61коп.

Редакционно-издательский отдел
Московского института электронной техники

