

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

---

О. Д. ПАРФЕНОВ

**КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Методические указания по курсовому проектированию  
по курсу «Конструирование и технология микросхем»

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом.

Рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 31.10.83 г., методической комиссией факультета П 21.12.83 г. и учебно-методическим управлением 4.01.84 г.

Рецензент к.т.н. доц. Иванов С.Р.

© Московское высшее техническое училище  
имени Н.Э. Баумана

Олег Дмитриевич Парфенов

Редактор В.Т. Карасева      Корректор Л.И.Малютина

---

Заказ 862. Объем 1,75 п.л. (1,75 уч.-изд.л.). Тираж 400 экз.  
Бесплатно. Подписано к печати 29.03.84 г. План 1984 г., № 45.

---

Типография МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

## Введение

В системе подготовки инженеров-конструкторов-технологов ЭВА и РЗА конструированию микросхем отводится особенно важная роль. Конструктивно-технологические решения, принятые на уровне элементной базы, существенным образом определяют принципы компоновки и характер межсоединений на более высоких конструктивных уровнях и, в конечном счете, габариты, массу, экономичность, надежность и быстродействие аппаратуры. Естественно, что бессмысленный, творческий подход к конструированию микросхем невозможен без глубокого понимания технологических возможностей и ограничений. Именно поэтому в курсе "Конструирование и технология микросхем" сведения по технологии перемежаются с вопросами конструирования, каждый раз предшествуя им.

Настоящие методические указания являются первой из трех частей и имеют целью сконцентрировать сведения по структурному и топологическому проектированию полупроводниковых интегральных схем, дополнив их необходимыми справочными данными. Основное внимание при этом уделено эпитаксиально-планарной структуре на биполярных транзисторах, включающей в себя наиболее общие черты структур других модификаций, и в особенности биполярному интегральному транзистору как базовому элементу. Для интегральных схем более поздних разработок (ТТЛШ, КМДП, И<sup>2</sup>Л), применение которых особенно эффективно в микропроцессорных БИС, СБИС и микросборках, рассматриваются специфические особенности структурного и (или) топологического проектирования.

Конструированию гибридных пленочных микросхем посвящена вторая часть методических указаний. В третьей части рассматриваются вопросы конструирования микросборок, а также конструирования корпусов для микросхем и микросборок.

### I. Основные соотношения и константы, используемые в расчетах

Концентрация равновесных носителей (электронов или дырок) в собственном полупроводнике определяется из соотношения

$$n_i^2 = p_i^2 = n_i \cdot p_i = 1,5 \cdot 10^{33} \cdot T^3 \exp(-E_g / kT), \quad (I)$$

где  $n_i$  и  $p_i$  - концентрация электронов и дырок соответственно, см<sup>-3</sup>;

$T$  - абсолютная температура, К;

$k$  - постоянная Больцмана ( $8,63 \cdot 10^{-5}$  эВ/К);  
 $E_g$  - ширина запрещенной зоны (для кремния при  $T = 300$  К  
 $E_g = I, II$  эВ).

Для собственного кремния при  $T = 300$  К  $n_i = p_i = 1,38 \cdot 10^{10}$  см $^{-3}$ .

Для легированного полупроводника при фиксированной температуре произведение концентрации электронов на концентрацию дырок также постоянно и не зависит от степени легирования. Для  $n$ - и  $p$ -полупроводника справедливы соответственно следующие соотношения:

$$(n + N_n) p = n_i^2; \quad (p + N_p) n = n_i^2, \quad (2)$$

где  $n$  и  $p$  - концентрация равновесных носителей (электронов и дырок) собственной проводимости, см $^{-3}$ ;

$N_n$  и  $N_p$  - концентрация донорной и акцепторной примеси, см $^{-3}$ ,

$n_i^2$  - определяется из соотношения (1).

Поскольку в рабочем диапазоне температур вся введенная примесь ионизирована, то  $N_n = n_n$  и  $N_p = p_p$ , где  $n_n$  и  $p_p$  - концентрации электронов и дырок примесной проводимости. С учетом этого для полупроводника, содержащего примесь обоих типов, справедливо соотношение (уравнение нейтральности)

$$p + N_n + p_p = n + N_p + n_n \quad (3)$$

или (так как  $p = n$ )

$$N_n - N_p = n - p_p. \quad (3')$$

Здесь  $N_n$  и  $N_p$  - концентрации положительных и отрицательных ионов, численно равные концентрациям соответствующих примесей. Знак и величина разности (эффективной концентрации примеси) определяют тип и величину удельной проводимости.

Подвижность электронов и дырок  $\mu_n$  и  $\mu_p$  см $^2$ /(В.с) зависит от температуры и суммарной концентрации примеси  $N_\Sigma$  см $^{-3}$ . Для кремния при  $T = 300$  К она может быть вычислена из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \mu_n &= 65 + 1265 / [1 + (N_\Sigma / 18,5 \cdot 10^{16})^{0,72}], \\ \mu_p &= 47,7 + 447,3 / [1 + (N_\Sigma / 9,3 \cdot 10^{16})^{0,76}]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Удельное объемное сопротивление полупроводника  $\rho$  Ом.см

$$\rho_n = 1/q \cdot \mu_n \cdot N_n; \quad \rho_p = 1/q \cdot \mu_p \cdot N_p, \quad (5)$$

где  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

$N_n$  и  $N_p$  - эффективная концентрация донорной и акцепторной примеси, см $^{-3}$ .

Для диффузионных областей, полученных в двухстадийном процессе, эффективная концентрация примеси определяется как средняя концентрация в пределах толщины области:

$$N_{ср} = Q \cdot \operatorname{erf}(X_{пер} / 2 \sqrt{D_p t_p}) / X_{пер}, \quad (6)$$

где  $Q$  - доза легирования, см<sup>2</sup>;

$X_{пер}$  - толщина области (глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода), см;

$D_p$  и  $t_p$  - коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с, и время на этапе разгонки примеси, с;

$\operatorname{erf} V$  - функция ошибок.

Дополнения функции ошибок  $\operatorname{erfc} V = 1 - \operatorname{erf} V$  приведены в таблице.

$V$	$\operatorname{erfc} V$	$V$	$\operatorname{erfc} V$	$V$	$\operatorname{erfc} V$	$V$	$\operatorname{erfc} V$
0,0	1,00000	1,0	0,15730	2,0	0,00468	3,0	0,00002209
0,1	0,88754	1,1	0,11980	2,1	0,00298	3,1	0,00001165
0,2	0,77730	1,2	0,08969	2,2	0,00186	3,2	0,00000603
0,3	0,67137	1,3	0,06599	2,3	0,00114	3,3	0,00000306
0,4	0,57161	1,4	0,04772	2,4	0,000689	3,4	0,00000152
0,5	0,47950	1,5	0,03390	2,5	0,000407	3,5	0,000000743
0,6	0,39614	1,6	0,02365	2,6	0,000236	3,6	0,000000356
0,7	0,32220	1,7	0,01621	2,7	0,000134	3,7	0,000000167
0,8	0,25790	1,8	0,01091	2,8	0,000075	3,8	0,000000077
0,9	0,20309	1,9	0,00721	2,9	0,000041	3,9	0,000000035

Для равномерно легированного кремния, содержащего примесь одного типа, удельное объемное сопротивление может быть определено из графика (рис. 1). График позволяет по расчетному значению концентрации примеси  $N$  выбрать стандартную заготовку-подложку с близким значением  $\rho$ .

При приложении к  $p$ - $n$ -переходу обратного напряжения с каждой его стороны возникает обедненный слой, толщина которого обратно пропорциональна концентрации примеси на данной стороне.

Для умеренно несимметричного ступенчатого перехода (различия в концентрациях до одного порядка) суммарная толщина обедненной области, см:

$$X_0 = [2 \epsilon \epsilon_0 \cdot U_E (N_p + N_n) / q \cdot N_p \cdot N_n]^{1/2} \quad (7)$$

Для резкого ступенчатого перехода толщина обедненного слоя на

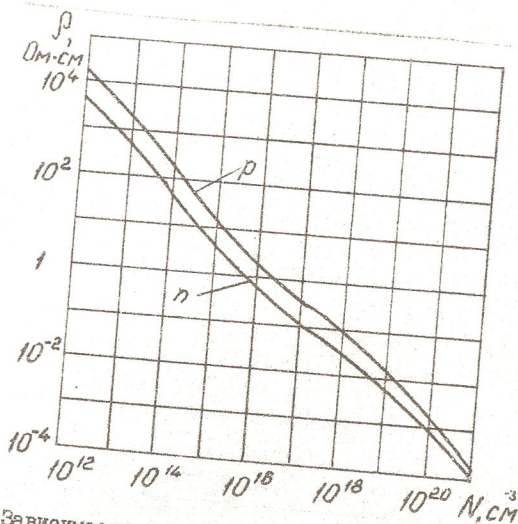


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления кремния, содержащего примесь одного типа, от концентрации примеси при температуре 300 К

слабелегированной стороне;

$$X_0 = (2\epsilon\epsilon_0 \cdot U_{\Sigma} / q \cdot N)^{1/2} \quad (8)$$

Для линейно-плавного перехода суммарная толщина обедненной области:

$$X_0 = (12\epsilon\epsilon_0 \cdot U_{\Sigma} / q \cdot a)^{1/3} \quad (9)$$

В приведенных выражениях:

$\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника (для кремния  $\epsilon = 12$ );

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см - диэлектрическая проницаемость вакуума;

$N$  - концентрация примеси на слабелегированной стороне перехода, см<sup>-3</sup>;

$U_{\Sigma}$  - полное напряжение на переходе, В;

$a$  - градиент концентрации примеси на уровне перехода, см<sup>-4</sup>.

Полное напряжение на p-n-переходе:

$$U_{\Sigma} = U_{cm} + U_c,$$

где  $U_{cm}$  - напряжение смещения;

$U_c$  - контактная разность потенциалов;

$$U_c = kT \ln(N_p \cdot N_n / n_i^2) / q.$$

Здесь  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана.

(10)

Для кремния при температуре  $T = 300 \text{ K}$ :

$$U_z = 9,026 \cdot \epsilon_n (N_p \cdot N_n / 1,9 \cdot 10^{20}). \quad (10')$$

При двухстадийной диффузии (распределение примеси по закону Гаусса) градиент концентрации:

$$a = \partial N / \partial x \Big|_{x=x_{пер}} = -Q \cdot X_{пер} \cdot \exp(-X_{пер}^2 / 4D_p t_p) / 2D_p t_p \sqrt{4D_p t_p}. \quad (11)$$

В формулу (9) входит абсолютное значение величины  $a$ .

Обратно смещенный переход обладает барьерной емкостью.

Удельная емкость на единицу площади,  $\Phi / \text{см}^2$ :

для умеренно несимметричного ступенчатого перехода

$$C_0 = [q \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot N_p \cdot N_n / 2U_z (N_p + N_n)]^{1/2}, \quad (12)$$

для резкого ступенчатого перехода

$$C_0 = (q \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot N / 2U_z)^{1/2}, \quad (13)$$

для линейно-плавного перехода

$$C_0 = (\epsilon \cdot \epsilon_0)^{2/3} \cdot (q \cdot a / 12U_z)^{1/3}. \quad (14)$$

Напряжение пробоя,  $V$ , резкого ступенчатого перехода определяется выражением

$$U_{пр} = 2\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E_{кр}^2 / q \cdot N, \quad (15)$$

где  $E_{кр}$  - критическая напряженность поля (для кремния  $10^6 \text{ В/см}$ ).

Из (15) при заданном  $U_{пр}$  определяется допустимая концентрация примеси на слаболегированной стороне перехода:

$$N \leq 2\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E_{кр}^2 / q \cdot U_{пр}. \quad (15')$$

По формулам (15) и (15') могут быть рассчитаны (с некоторым запасом по электрической прочности) также умеренно несимметричные и линейно-плавные переходы.

## 2. Проектирование структуры биполярного интегрального транзистора

Проектирование структуры начинают с задания толщин областей транзистора (рис. 2а). Глубина залегания перехода "эмиттер-база"  $X_{эб}$  должна обеспечивать малое поверхностное сопротивление  $R_{сш}$  для возможности осуществления на основе эмиттерной диффузии каналов пересечений (см. рис. 14б). Практически  $X_{эб}$  выбирают в пределах 1,5–2,5 мкм. Глубину залегания перехода "база-коллектор"  $X_{БК}$  устанавливают с таким расчетом, чтобы обеспечить минимальное и воспроизводимое значение толщины активной базы  $W$ . При формировании переходов методом термической диффузии  $W_{min} = 0,8 \text{ мкм}$ . Таким образом,  $X_{БК} = X_{эб} + W = 2,3\text{--}3,3 \text{ мкм}$ . Глубина залегания перехода "коллектор-подложка"  $X_{кп}$ , т.е. толщина эпитаксиального слоя, должна обеспечивать достаточно малое со-

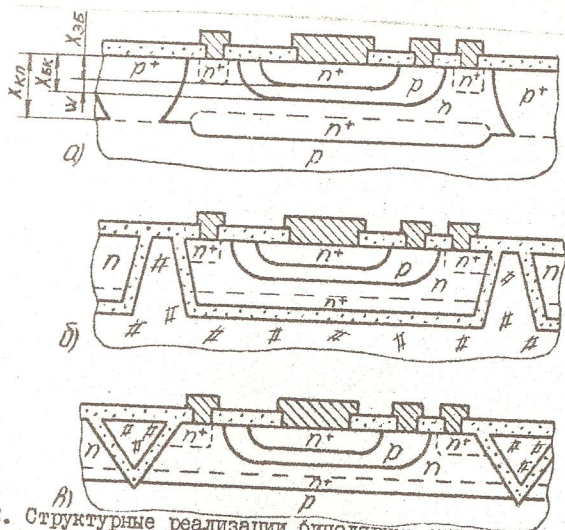


Рис. 2. Структурные реализации биполярных интегральных транзисторов: а - с изоляцией  $p-n$ -переходом; б - с диэлектрической изоляцией; в - с комбинированной изоляцией (полипланарная структура)

противление коллектора и выбирается в пределах 5-10 мкм. Соответственно скрытый слой составляет 2-8 мкм. В зависимости от диаметра групповой подложки - 60, 75 или 100 мм - толщина подложки выбирается равной 350, 400-450 или 650-700 мкм.

Поверхностная концентрация примеси в области эмиттера  $N_{0,э}$  должна быть максимально возможной (ограничена возможностями технологии). Поверхностная концентрация в базе  $N_{0,б}$  определяется по формуле (15') при заданном пробивном напряжении  $U_{пр,э-б}$ . Для коллекторной области (эпитаксиальный слой) наиболее опасной зоной с точки зрения пробоя является граница с разделительным  $p^+$ -слоем на поверхности кристалла. При заданном значении  $U_{пр,к-п}$  по формуле (15') определяется концентрация примеси  $N_k$  в эпитаксиальном коллекторе. Концентрация примеси в подложке (под скрытым слоем) должна быть не более, чем в эпитаксиальном коллекторе. Это обеспечивает необходимую электрическую прочность  $U_{пр,к-п}$  перехода "скрытый слой-подложка".

Для структуры с диэлектрической изоляцией и полипланарной структуры (рис. 2б и в) концентрацию примеси в коллекторе определяют по формуле (15') исходя из заданного пробивного напряже-



ния  $\epsilon_{np, \delta-k}$ . Минимальная толщина диэлектрика в структуре с диэлектрической изоляцией  $d = \epsilon_{np} / \epsilon_{np}$ , где  $\epsilon_{np}$  - пробивная напряженность поля (для двуокиси кремния  $5 \cdot 10^6$  В/см).

Параметры процесса разгонки примеси при базовой диффузии вычисляют по формуле

$$D_p t_p = X_{\delta k}^2 / 4 \epsilon_n (N_{05} / N_k), \quad (16)$$

где  $N_{05}$  - поверхностная концентрация примеси в базе после разгонки,  $\text{см}^{-3}$ ;

$N_k$  - исходная концентрация примеси в эпитаксиальном коллекторе,  $\text{см}^{-3}$ .

Задавая температуру разгонки ( $1000-1200^\circ\text{C}$ ), по графику рис. 3 определяют коэффициент диффузии  $D_p$  и затем вычисляют  $t_p$ . Необходимая доза легирования,  $\text{см}^{-2}$ :

$$Q = N_{05} \sqrt{4 D_p t_p}. \quad (17)$$

Параметры процесса загонки примеси рассчитывают по формуле

$$D_3 t_3 = (Q / 1,13 N_{03})^2, \quad (18)$$

где  $N_{03}$  - поверхностная концентрация примеси на этапе загонки примеси ( $N_{03} \leq 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для фосфора и  $\leq 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для бора).

Задавая температурой загонки ( $800-1000^\circ\text{C}$ ), по графику рис. 3 определяют коэффициент диффузии  $D_3$  и затем вычисляют время загонки  $t_3$ .

Аналогично рассчитывают режимы при диффузии скрытого слоя и разделительной диффузии.

Для эмиттерной области параметры этапа разгонки при известной дозе легирования  $Q$  можно определить из выражения

$$N_{35} = Q \exp(-X_{35}^2 / 4 D_p t_p) / \sqrt{\pi D_p t_p}, \quad (19)$$

где  $N_{35}$  - концентрация примеси в базе на уровне дна эмиттера,  $\text{см}^{-3}$ .

Для неглубоких высоколегированных областей ( $\rho_{\text{с}} = 2-3 \text{ Ом}$ ) необходимая доза легирования определяется выражением

$$Q \approx 1/q \cdot j_n \cdot R_{\text{сн}}. \quad (20)$$

Численное решение уравнения (19) представлено на графике рис. 4, с помощью которого при известных  $Q$ ,  $N_{35}$  и  $X_{35}$  находят произведение  $D_p \cdot t_p$ . Дальнейший расчет аналогичен расчету параметров базовой диффузии.

Эмиттерную область можно формировать одноэтапной диффузией, т.е. путем загонки примеси без разгонки. Для этого случая:

$$\text{erfc}(X_{35} / 2 \sqrt{D_3 t_3}) = N_{\text{сн}} / N_{03}, \quad (21)$$

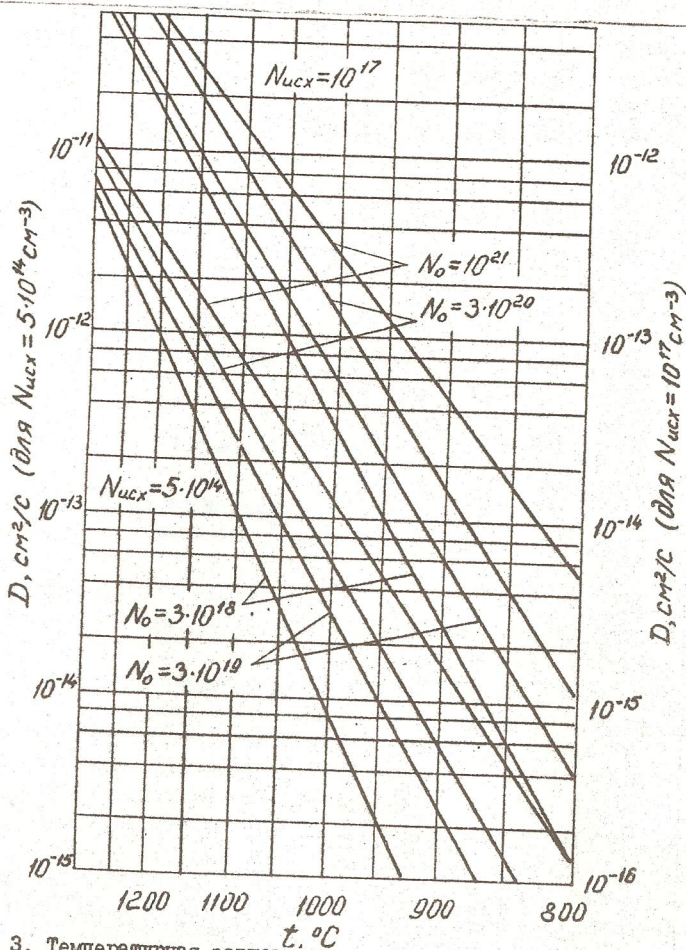


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента диффузии фосфора в кремний.  $N_{\text{исх}}$  и  $N_0$  - исходная и поверхностная концентрации примеси,  $\text{cm}^{-3}$

где  $N_{\text{исх}}$  - концентрация примеси в базовой области на уровне дна эмиттерной области.

С помощью таблиц находят значение аргумента  $V = \chi_{35} / 2\sqrt{D_3 t_3}$

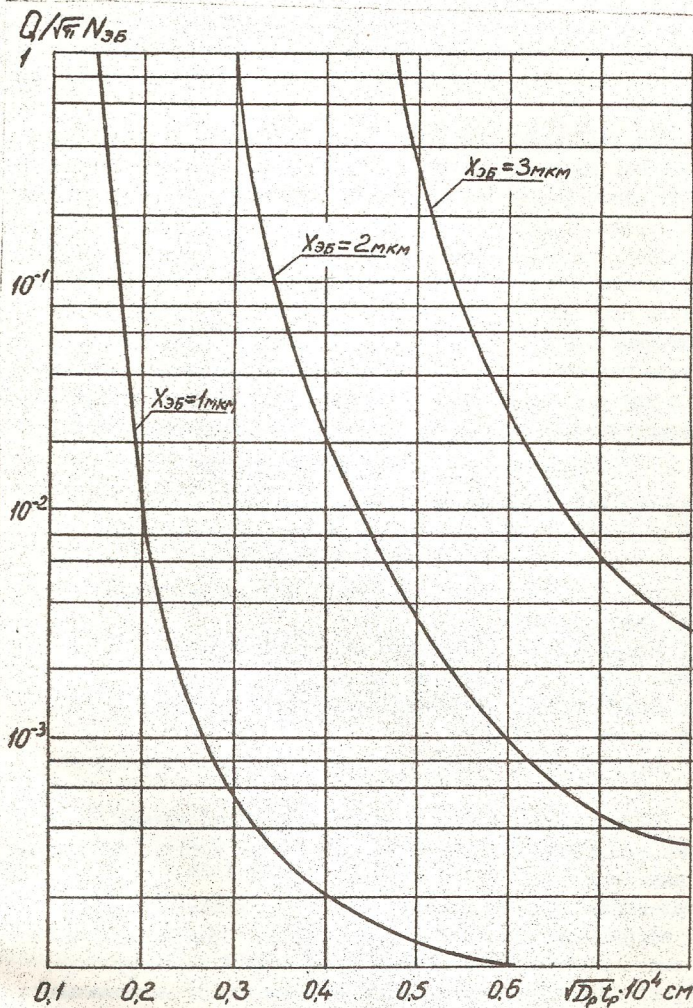


Рис. 4. Графики для определения параметра  $D_p t_p$  в эмиттерной области

вычисляют  $D_3 t_3$ , а затем определяют  $D_3$  и  $t_3$  по ранее приведенной методике.

В структуре с диэлектрической изоляцией и полипланарной

структуре применяются стандартные подложки, несущие эпитаксиальный  $n^+$ -слой, который используется в дальнейшем в качестве скрытого слоя. Методом диффузии формируют лишь базовые и эмиттерные области.

Вместо диффузионной загонки примеси может быть использовано ионное внедрение. Необходимая доза легирования обеспечивается ионным током  $I$  А/см<sup>2</sup> и временем облучения  $t$  с согласно выражению

$$Q = I \cdot t / q. \quad (22)$$

При ускоряющем напряжении не более 60 кВ образуется тонкий (десятые доли мкм) насыщенный примесью слой. Необходимый при этом активационный отжиг совмещают с процессом разгонки примеси. В результате разгонки распределение примеси подчиняется закону Гаусса и для расчета режимов разгонки используется формула (16), а для определения необходимой дозы легирования - формула (17).

### 3. Топологический расчет транзистора

Задачей топологического расчета транзистора является определение минимально возможных размеров его областей в плане с учетом технологических ограничений и нагрузочной способности транзистора. Нижеприведенные расчетные формулы получены с учетом следующих условий:

1. Рассматривается наиболее неблагоприятное сочетание потерь (расчет на худший случай).
2. Гарантируется отсутствие перекрытия перехода кромкой металлического контакта.
3. Гарантируется полное заполнение металлом контактного окна.
4. Гарантируется минимально допустимое расстояние между боковыми переходами смежных областей, равное диффузионной длине неосновных носителей.

Вследствие эффекта оттеснения тока (к краям эмиттерной области) нагрузочная способность транзистора определяется не площадью эмиттера, а его периметром. Минимальный периметр, мкм, эмиттерной области определяется в зависимости от максимального эмиттерного тока, мА, эмпирической формулой

$$P_{min} = 6 I_{max} \quad (23)$$

Поскольку контактное окно к эмиттеру является наименьшим топологическим элементом, задает ширину окна  $L_{окл} \geq a_{min}$ , где

$\alpha_{\text{min}}$  - разрешение литографического процесса.

Ширина металлического контакта  $\ell_{311}$  над контактным окном (рис. 5а)

$$\ell_{311} \geq \ell_{3k1} + 2\Delta_n + 2\Delta_c, \quad (24)$$

где  $\Delta_n$  - погрешность (предельное отклонение) размера топологического элемента на подложке;

$\Delta_c$  - погрешность (предельное отклонение) совмещения двух топологических слоев, формируемых на смежных этапах литографии.

Ширина эмиттерной области (рис. 5б):

$$\ell_{31} \geq \ell_{311} + 2\Delta_n + 4\Delta_c. \quad (25)$$

Здесь происходит накопление погрешности совмещения, поскольку рисунок межсоединений базируется относительно рисунка контактных окон, который, в свою очередь, базируется относительно рисунка окон под эмиттерную диффузию. Длина эмиттерной области

$\ell_{32}$  определяется из условия  $2\ell_{31} + 2\ell_{32} \geq \Gamma_{\text{min}}$ , причем  $\ell_{32} \geq \ell_{31}$ . Соответственно рассчитывается длина контактного окна  $\ell_{3k2}$  ( $\ell_{3k2} \geq \ell_{3k1}$ ).

Размеры окна  $\ell_{30}$  в окисле под эмиттерную диффузию, необходимые для проектирования фотошаблона (рис. 5в):

$$\ell_{30} = \ell_3 - 2\chi_{35}. \quad (26)$$

Топологический расчет базовой области сводится к определению двух характерных размеров: расстояния  $d_{531}$  между переходами в месте расположения базового контакта (рис. 5г) и расстояния  $d_{532}$  на участках, где контакт отсутствует (рис. 5д):

$$d_{531} \geq \ell_{57} + 2\Delta_n + 6\Delta_c + \alpha_{\text{min}}, \quad (27)$$

$$d_{532} \geq \Delta_n + \Delta_c + L_{n5}, \quad (28)$$

где  $\ell_{57}$  - ширина металлического контакта над контактным окном. Аналогично формуле (24)  $\ell_{57} \geq \ell_{5k} + 2\Delta_n + 2\Delta_c$ ;

$L_{n5}$  - диффузионная длина неосновных носителей (электронов) в базе ( $L_{n5} \sim 4$  мкм).

Соответствующий размер базовой области в общем случае:

$$\ell_5 = \ell_3 + d_{531} + d_{532}. \quad (29)$$

Размер окна под базовую диффузию (для фотошаблона):

$$\ell_{50} = \ell_5 - 2\chi_{5k}. \quad (30)$$

Размеры коллекторной области определяются аналогично базовой. Накопленная погрешность совмещения при этом увеличивается за счет погрешности расположения базового слоя относительно коллекторного:

$$d_{k5} \geq \ell_{k7} + 2\Delta_n + 8\Delta_c + \alpha_{\text{min}}. \quad (31)$$

Для уменьшения сопротивления коллектора  $n^+$  - область под кол-

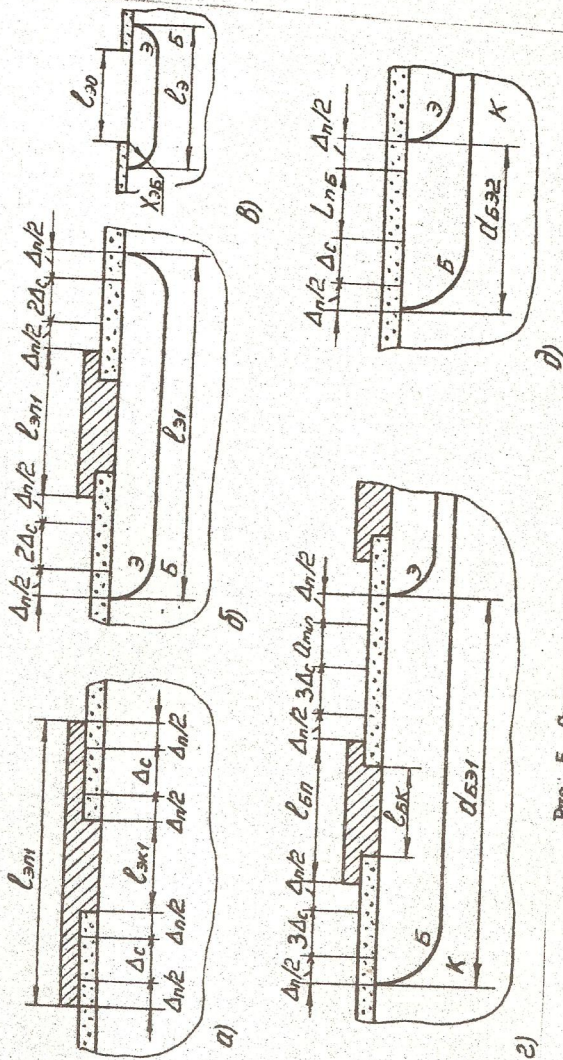


Рис. 5. Схемы к голологическому расчету  
опольярного трансжоста

лекторный контакт выполняется в виде замкнутого канала, а металлический контакт должен быть на возможно большей длине канала.

Поэтому  $d_{K51} = d_{K52} = d_{K5}$  и  $l_K = l_0 + 2d_{K5}$ .

Структура многоэмиттерного транзистора (в схемах ТТЛ) со-

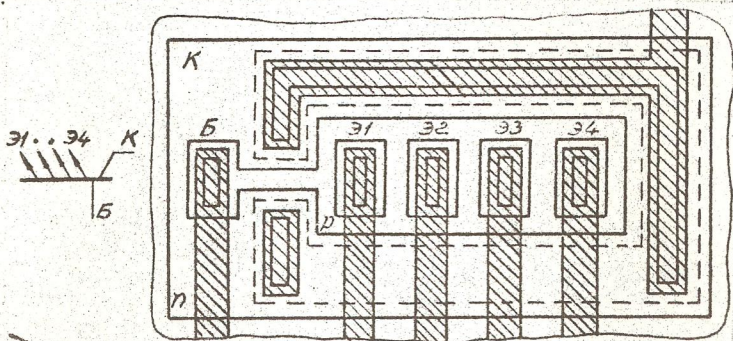


Рис. 6. Схема и топология многоэмиттерного транзистора

держит одну коллекторную область, одну базовую и соответствующее число эмиттерных областей (рис. 6). Для исключения взаимодействия соседних эмиттеров (паразитные горизонтальные  $n^+p-n^+$ -транзисторы) расстояние между ними следует выбирать не менее  $(2+3)l_{ns}$ . Для уменьшения инверсного коэффициента передачи тока сопротивление пассивной базы увеличивают за счет увеличения расстояния от базового контакта до активной области базы. Сопротивление "перешейка" должно быть не менее 300 Ом.

Схемы с инжекционным питанием (И<sup>2</sup>Л) включают многоколлекторные транзисторы (рис. 7): вертикальные  $n-p-n$ -типа и горизонтальные  $p-n-p$ -типа. Для повышения нормального коэффициента передачи тока вертикального транзистора его коллекторы должны располагаться возможно ближе друг к другу, а скрытый  $n^+$ -слой — возможно ближе к базовому. Для горизонтального транзистора повышение коэффициента передачи достигается уменьшением расстояния между  $p^+$ -инжектором (эмиттером  $p-n-p$ -транзистора) и  $p$ -базой  $n-p-n$ -транзистора (т.е. коллектором  $p-n-p$ -транзистора). В обоих случаях следует учитывать не только технологические ограничения, но и опасность смыкания переходов. На рис. 7 показаны фрагменты И<sup>2</sup>Л-схем, где тонкая база  $p-n-p$ -транзистора создается путем двойной диффузии, а тонкая активная база вертикального

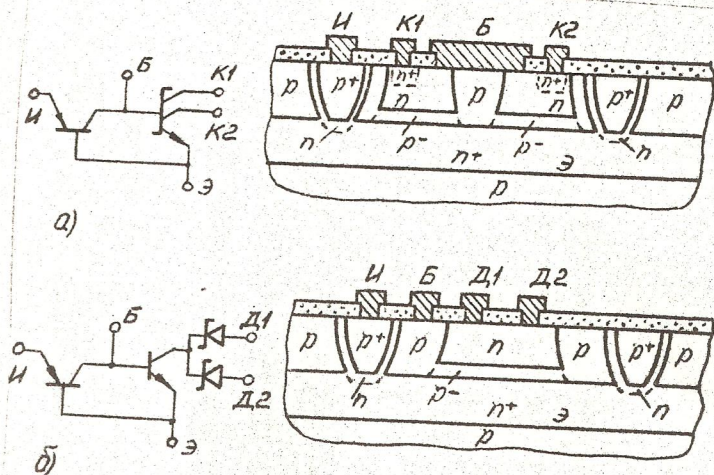


Рис. 7. Фрагменты структуры  $I^2L$ -схем (инверторы) с шунтирующими (а) и развязывающими (б) диодами Шоттки

ного транзистора  $p^-$  - ионным знедрением бора.

Диоды Шоттки находят широкое применение в схемах ТТЛИ и  $I^2L$ .

Вольтамперная характеристика диода Шоттки имеет вид

$$I = I_0 [\exp(U/\varphi_s) - 1], \quad (32)$$

где  $I_0 = S \cdot A \cdot T^2 \exp(-\varphi_b/\varphi_s)$ .

$$(33)$$

Здесь  $\varphi_s = k \cdot T/q$  - температурный потенциал;

$\varphi_b$  - высота температурного барьера контакта "металл-полупроводник";

$S$  - площадь контакта,  $см^2$ ;

$A$  - постоянная Ричардсона (для  $\gamma$ -кремния равна  $112A/(сг \cdot K^2)$ );

$T$  - температура, К.

Выбор металла для диода Шоттки определяется функциональным назначением диода (шунтирующий или развязывающий) и соответствующими требованиями к прямому падению напряжения и логическому перепаду.

Значения  $\varphi_b$  В для некоторых материалов контакта к  $\gamma$ -кремнию:  $Tl$  - 0,5,  $Mo$  - 0,59,  $W$  - 0,67,  $Al$  - 0,77,  $PtSi$  - 0,82.

Площадь металлического контакта должна быть оптимальной, обеспечивая одновременно малую емкость и малое последовательное



сопротивление участка коллектора под контактом.

Барьер Шотки возникает при концентрации донорной примеси в кремнии не выше  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

#### 4. Оценка основных параметров биполярного транзистора

Нормальный коэффициент передачи тока  $\alpha$  (в схеме с общей базой):

$$\alpha \approx \beta \cdot \alpha, \quad (34)$$

где  $\beta$  - коэффициент инжекции;

$\alpha$  - коэффициент переноса носителей в базе.

Коэффициент инжекции (для дрейфового транзистора):

$$\beta = 1 / (1 + W \cdot D_3 \cdot N_5 / 2L_3 \cdot D_5 \cdot N_3 \cdot \beta), \quad (35)$$

где  $W$  - толщина активной базы, мкм;

$L_3$  - диффузионная длина дырок в эмиттере, мкм;

$D_3$  и  $D_5$  - коэффициенты диффузии неосновных носителей в эмиттере и активной базе соответственно,  $\text{см}^2/\text{с}$  ( $D = 0,026 \mu$ );

$N_3$  и  $N_5$  - средняя концентрация примеси в эмиттере и активной базе соответственно,  $\text{см}^{-3}$ ;

$\beta = 0,5 \ln(N_{53} / N_{5K})$  - коэффициент неоднородности активной базы;  $N_{53}$  и  $N_{5K}$  - концентрация примеси на верхней и нижней границах активной базы соответственно,  $\text{см}^{-3}$ .

Коэффициент переноса носителей в базе:

$$\alpha = 1 - W^2 / 2L_5^2 (\beta + 1), \quad (36)$$

где  $L_5$  - диффузионная длина электронов в базе, мкм.

Граничная частота по коэффициенту передачи:

$$f_\alpha = \omega_\alpha / 2\pi, \quad (37)$$

где круговая частота  $\omega_\alpha$  определяется из выражения

$$1/\omega_\alpha = 1/\omega_3 + 1/\omega_5 + 1/\omega_K, \quad (38)$$

т.е. задержка сигнала транзистором складывается из времени задержки сигнала эмиттером ( $1/\omega_3$ ), времени переноса носителей в базе ( $1/\omega_5$ ) и времени задержки сигнала коллектором ( $1/\omega_K$ ).

Отдельные слагаемые выражения (38) определяются по формулам:

$$1/\omega_3 = r_3 \cdot C_3, \quad (39)$$

где  $r_3 = kT/q \cdot J_3$  - сопротивление эмиттера, Ом;

$C_3 = S_3 \cdot C_{03}$  - емкость эмиттерного перехода, Ф;

$J_3$  - ток эмиттера, А;

$S_3$  - площадь перехода "эмиттер-база",  $\text{см}^2$ ;

$C_{03}$  - удельная емкость перехода "эмиттер-база", Ф/ $\text{см}^2$ .

$$1/\omega_5 = W^2 / 2D_5 (\beta + 1), \quad (40)$$

где  $D_0 = k \cdot T \cdot \mu_n / q$  - коэффициент диффузии электронов в базе,  $\text{см}^2/\text{с}$  (при  $T = 300 \text{ К}$   $D_0 = 0,026 \mu_n$ ).

где  $\chi_k = \rho / \omega_k = \chi_k \cdot C_k$ , (41)  
 где  $\chi_k$  - сопротивление тела коллектора коллекторному току, Ом;  
 $C_k = S_k \cdot C_{0k}$  - емкость перехода "база-коллектор", Ф.

При расчете  $\chi_k$  коллекторную область разбивают на участки простой конфигурации, для которых подсчитываются сопротивления (рис. 8):

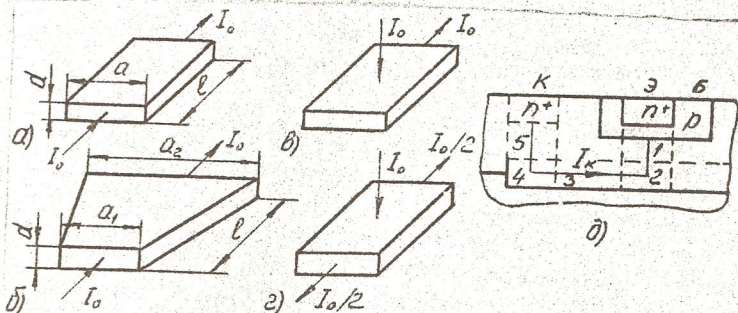


Рис. 8. Элементы тела коллектора (а-г) и схема (д) к расчету сопротивления тела коллектора

для конфигурации а)  $\chi = \rho \cdot l / a \cdot d$ , (42а)

для конфигурации б)  $\chi = \rho \cdot l / d (a_2 - a_1) \ln(a_2 / a_1)$ , (42б)

для конфигурации в)  $\chi = \rho / 3a (l/d + d/l)$ , (42в)

для конфигурации г)  $\chi = \rho / 6a (l/2d + 2d/l)$ . (42г)

Далее находят полное сопротивление  $\chi_k$ , учитывая направления токов.

### 5. Диоды и резисторы

В качестве диодов полупроводниковых ИС обычно используют транзисторные структуры в диодном включении. Возможные схемы диодного включения транзисторов показаны на рис. 9: 1 - с зако-

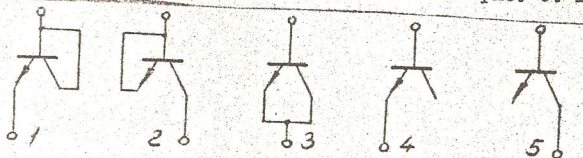


Рис. 9. Возможные варианты диодного включения транзисторов

роченным переходом "база-коллектор" ( $\mathcal{U}_{\kappa 5} = 0$ ); 2 - с закороченным переходом "эмиттер-база" ( $\mathcal{U}_{35} = 0$ ); 3 - с закороченными эмиттером и коллектором ( $\mathcal{U}_{\kappa 3} = 0$ ); 4 - с "оторванным" коллектором ( $\mathcal{U}_{\kappa} = 0$ ); 5 - с "оторванным" эмиттером ( $\mathcal{U}_{3} = 0$ ). В нижеследующей таблице приведена сравнительная оценка различных схем включения по важнейшим параметрам диодов.

Параметр	Схема включения				
	I	2	3	4	5
Напряжение пробоя	мин.	макс.	мин.	мин.	макс.
Обратный ток	мин.	~ макс.	макс.	мин.	~ макс.
Емкость диода	мин.	-	макс.	мин.	-
Емкость на подложку	макс.	макс.	макс.	мин.	макс.
Накопленный заряд неосновных носителей в структуре	мин.	~ макс.	макс.	~ макс.	~ макс.

Чаще других используют варианты I и 4.

Диффузионные резисторы обычно выполняют на основе базовой области (компромисс между требованиями высокого значения  $R_{сн}$  и малого значения ТКС). Проектирование резистора начинают с выбора его ширины  $a$ . Для упрощения последующих расчетов величину  $R_{сн}$  принимают одинаковой по ширине резистора. Погрешность расчета, вносимая высокоомными боковыми участками, при этом будет тем меньше, чем больше ширина резистора по отношению к толщине (т.е. величине боковой диффузии). Для обеспечения сопротивления резистора в пределах  $\pm 15-20\%$  необходимо выбирать  $a \geq 5 \cdot X_{пер}$ , где  $X_{пер}$  - глубина залегания перехода (толщина резистора).

При заданном  $R$  и известном  $R_{сн}$  определяют эквивалентную длину резистора:

$$l_{эKB} = a \cdot R / R_{сн} \quad (43)$$

Эквивалентная длина резистора зависит от конфигурации резистора и его конечных участков (рис. 10). В общем случае для резистора зигзагообразной формы:

$$l_{эKB} = \sum l_i + 0,55 \cdot n \cdot a + k \cdot a, \quad (44)$$

где  $\sum l_i$  - суммарная длина линейных участков (без учета угловых);

$n$  - число угловых участков (изгибов резистора);

$k$  - коэффициент, учитывающий растекание тока в области контактов (для рис. 10в составляет 1,3, для рис. 10г - 0,14).

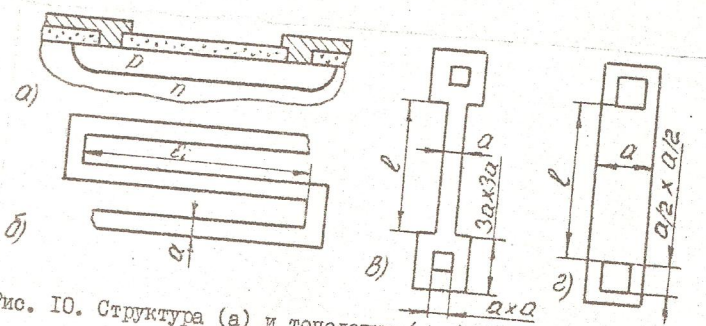


Рис. 10. Структура (а) и топология (б-г) диффузионных резисторов  
 Из (44) находят величину  $L^2$  (или  $\sum L_i^2$ ), необходимую для топологического проектирования резистора.

6. Особенности структурно-топологического проектирования МДП-интегральных схем

В схемах на дополняющих МДП-транзисторах (КМДП-схемы) необходима взаимная изоляция  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов. По технологическим соображениям целесообразно транзисторы с  $n$ -каналами объединить в изолирующих  $p$ -областях, используя в качестве общей подложки КМДП-схем кремний  $n$ -типа (рис. 11). Глубины

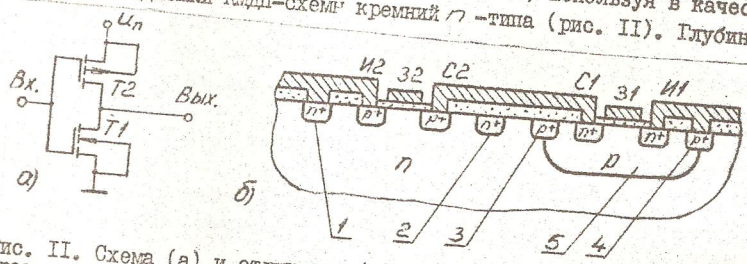


Рис. 11. Схема (а) и структура (б) инвертора на дополняющих МДП-транзисторах: 1-4 - каналоограничительные области; 5 - изолирующая область истока  $p$ -канального транзистора (Т1); 1 - контактная область истока  $n$ -канального транзистора и подложки; 4 - контактная область истока  $n$ -канального транзистора с изолирующей  $p$ -областью

областей истоков и стоков выбирают в пределах 2-4 мкм, а изолирующей  $p$ -области - 8-10 мкм. Концентрация примеси в подложке и изолирующей области определяют из расчета на пробой обратносмещенных переходов. Из условия электрической прочности рассчитывают также толщину диэлектрика под затвором (для двуокиси

кремния  $E_{np} = 5 \cdot 10^6$  В/см). Толщину защитного (изолирующего) окисла выбирают равной 0,8-1 мкм по технологическим соображениям.

Важнейшими параметрами МПТ-транзистора являются пороговое напряжение  $U_0$  и удельная крутизна  $\delta$  передаточной характеристики.

Пороговое напряжение оценивают по формуле

$$U_0 = \varphi_{мп} - Q_{os}/C_0 = 2\varphi_F = 2\sqrt{q\epsilon_0 \cdot \epsilon_n \cdot N_0 \cdot \varphi_F} / C_0, \quad (45)$$

где  $\varphi_{мп}$  - разность работ выхода материала затвора и кремния (см. ниже), В; для кремниевого затвора  $\varphi_{мп} = 0$ ;

$Q_{os}$  - плотность заряда поверхностных состояний ( $5 \cdot 10^{-9} - 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>);

$\varphi_F$  - модуль потенциала Ферми, В; при  $T = 300$  К

$$\varphi_F = 0,026 \ln(N_0/1,38 \cdot 10^{10});$$

$N_0$  - концентрация примеси на поверхности, см<sup>-3</sup>;

$\epsilon_n$  - относительная диэлектрическая проницаемость (для кремния 12);

$C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_g / d_g$  - удельная емкость "затвор-канал";

$\epsilon_g$  и  $d_g$  - относительная диэлектрическая проницаемость и толщина, см, подзатворного диэлектрика. В случае двуслойного диэлектрика  $\epsilon_g = \epsilon_{g1} \cdot \epsilon_{g2} \cdot d_g / (\epsilon_{g2} \cdot d_{g1} + \epsilon_{g1} \cdot d_{g2})$  и  $d_g = d_{g1} + d_{g2}$ .

В формуле (45) знаки "-" третьего и четвертого слагаемых - для  $p$ -канальных транзисторов, а знаки "+" - для  $n$ -канальных. Формула не учитывает активные примеси, которые могут содержаться в подзатворном диэлектрике.

Значения  $\varphi_{мп}$ , В

$N_0$ , см <sup>-3</sup>	Система $Al-SiO_2-n-Si$	Система $Al-SiO_2-p-Si$
10 <sup>14</sup>	-0,36	-0,82
10 <sup>15</sup>	-0,30	-0,88
10 <sup>16</sup>	-0,24	-0,94
10 <sup>17</sup>	-0,18	-1,0

По формуле (45) оценивают также пороговое напряжение, при котором образуются паразитные каналы под металлической разводкой и защитным окислом. Если оно меньше напряжения питания, то необходимо в структуру ИС ввести каналоограничительные области  $p^+$  и  $n^+$ -типа (рис. IIб). Последние в некоторых случаях могут быть использованы в качестве шин питания и земли.

Удельная крутизна, А/В<sup>2</sup>, МПТ-транзистора определяется формулой

где  $\mu$  - подвижность носителей в поверхностном слое, см<sup>2</sup>/(В.с) (46)  
 $z$  и  $L$  - ширина и длина канала.

Для уменьшения остаточного напряжения открытого транзистора и увеличения логического перепада выходного сигнала необходимо стремиться к увеличению крутизны. С этой целью уменьшают длину канала  $L$ . Увеличение  $C_0$  и  $z$ , повышая крутизну, ухудшает быстродействие транзистора.

Минимальную длину канала из условия смыкания (пробоя) областей истока и стока (за счет расширения области пространственного заряда перехода "сток-подложка") определяют с учетом (8) по формуле

$$L_{min} = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 \cdot U_n / q \cdot N} \quad (47)$$

где  $U_n$  - напряжение питания, В;  
 $N$  - концентрация примеси в подложке на уровне дна истока (стока), см<sup>-3</sup>.

С учетом технологических ограничений  $L_{min} = a_{min}$ . Из двух значений  $L_{min}$  выбирают наибольшее.

Из условия гарантированного перекрытия канала затвором номинальная (проектируемая) длина затвора:

$$L_3 = L_{min} + 2\Delta_n + 4\Delta_c \quad (48)$$

Размер проводника над контактом к истоку (или стоку):

$$L_n = L_k + 2\Delta_n + 2\Delta_c \quad (49)$$

где  $L_k \geq a_{min}$ .

Размер области истока (или стока):

$$L = L_n + 2\Delta_n + 4\Delta_c + a_{min} \quad (50)$$

где  $a_{min}$  - минимальный зазор между металлическим контактом и затвором в плоскости межсоединений.

Каналоограничительные области ( $n^+$  и  $p^+$ ) формируют одновременно с соответствующими областями истоков и стоков на расстоянии  $\sim 10$  мкм от соседних областей противоположного типа проводимости. Такие же расстояния проектируют между  $n^+$ -истоками (стоками) и границами изолирующей  $p$ -области.

Быстродействие КМПП-ключа можно оценить длительностью фронта и среза выходного сигнала по формулам:

$$t_p \approx 3U_n \cdot C_3 / V_2 (U_n - |U_{02}|)^2; \quad t_c \approx 3U_n C_3 / V_1 (U_n - U_{01})^2 \quad (51)$$

где  $C_3$  - емкость "затвор-канал".

В схемах с однотипными МПП-транзисторами (рис. 12) для повышения помехоустойчивости и быстродействия необходимо обеспечить

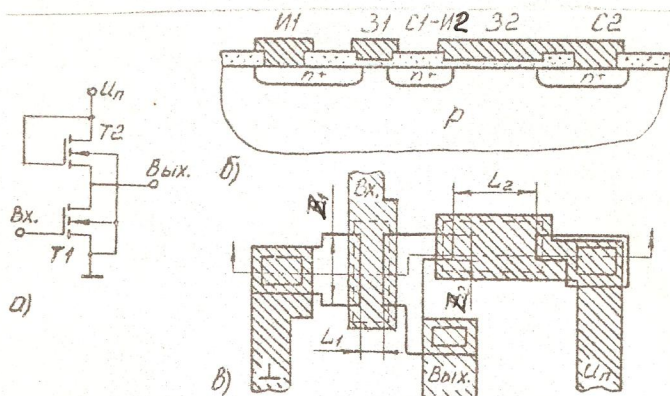


Рис. 12. Схема (а), структура (б) и топология (в) инвертора на  $n$ -канальных транзисторах

ние условия

$$K = L_2 \cdot Z_1 / L_1 \cdot Z_2 \gg 10, \quad (52)$$

где  $L_1$  и  $Z_1$  - длина и ширина канала активного транзистора;

$L_2$  и  $Z_2$  - длина и ширина канала нагрузочного транзистора.

Исходя из условия (52) значения  $L_1$  и  $Z_2$  выбирают минимально возможными с учетом технологических ограничений, а для  $L_2$  - также с учетом опасности замыкания промежутка "исток-сток". Ширина канала  $Z_1$  может быть найдена исходя из заданной крутизны  $\beta_1$ , а длина канала  $L_2$  - из заданного уровня помехоустойчивости (коэффициента  $K$ ).

Минимизация площади, занимаемой активным и нагрузочным МДП-транзисторами, может быть достигнута при соблюдении условий:

$$L_2 = L_1 \sqrt{K}; \quad Z_1 = Z_2 \sqrt{K}. \quad (53)$$

Для увеличения плотности компоновки сток активного и сток нагрузочного транзисторов могут быть совмещены (см. рис. 12в).

Быстродействие ключа с однотипными транзисторами можно оценить длительностью фронта и среза выходного сигнала по формулам:  $t_{\phi} = 9,2 U_n \cdot C_3 / \beta_2 (U_n - U_{02})^2$ ;  $t_c = 3 U_n \cdot C_3 / \beta_1 (U_3 - U_{01})^2$ , (54) где  $U_3$  - отпирающее напряжение на затворе активного транзистора.

## 7. Общие рекомендации по топологическому проектированию

### интегральных схем

Наивыгоднейшая форма кристалла с точки зрения качества лом-

ки групповой подложки — квадратная или близкая к ней.

При проектировании топологии в пределах кристалла предусматривают три зоны (рис. 13): 1) дефектную зону шириной 50–75 мкм; 2) зону периферийных контактов; 3) рабочую зону.

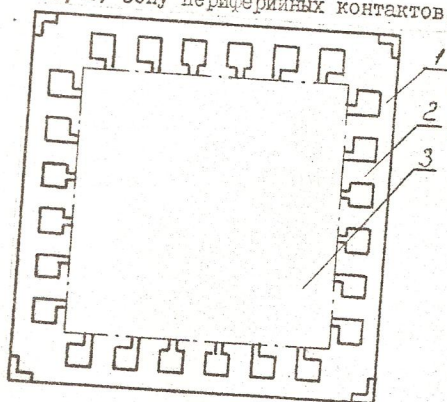


Рис. 13. Зоны кристалла ИС:  
1 — буферная; 2 — периферийных контактов; 3 — элементов и межсоединений

Дефектная (буферная) зона включает в себя сколы, микротрещины и деформированную область, которые возникают при скрайбировании и ломке групповой подложки. В дефектной зоне целесообразно размещать знаки совмещения, тестовые структуры, маркировочные знаки и другие вспомогательные элементы. Для облегчения ориентации групповой подложки относительно инструмента перед скрайбированием на границах модулей следует предусматривать специальные метки (например, металлизированные, полученные одновременно с формированием межсоединений).

Периферийные контакты должны иметь квадратную или прямоугольную форму и размеры не менее 100 x 100 мкм. Последнее необходимо для облегчения совмещения и надежного контактирования при зондовом контроле модулей в групповой подложке и в процессе присоединения проволочных или ленточных перемычек. Расположение контактов на кристалле должно соответствовать расположению выводов корпуса во избежание длинных перемычек и их пересечений. Контакты входных и выходных сигналов желательно располагать на разных сторонах кристалла. Под каждым контактом следует предусмотреть отдельную изолирующую область. Это уменьшает паразитную емкость и исключает опасность закорачивания при наличии проколов в окисле под контактом.

В центральной (рабочей) зоне размещаются элементы ИС и меж-



соединения. Размещение элементов должно обеспечивать минимальную длину межсоединений и минимальное число пересечений. Необходимые пересечения могут быть осуществлены в местах расположения резисторов (рис. I4а), а при отсутствии такой возможности - с

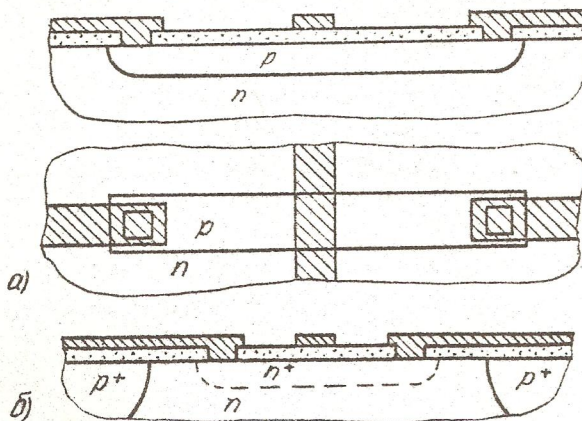


Рис. I4. Выполнение пересечения в месте расположения резистора (а) и с помощью диффузионного  $n^+$ -канала (б)

помощью специально проектируемых высоколегированных диффузионных каналов, формируемых на этапе эмиттерной диффузии (рис. I4б). Топологически такой канал представляет собой низкоомный резистор (малое отношение  $\ell/a$ ), расположенный в изолирующей области (во избежание утечки в подложку). При большом числе пересечений (БИС, СБИС) используют многоуровневую систему межсоединений.

Поскольку диффузионные резисторы выполняются на основе  $p$ -областей (базовая диффузия), все они (или отдельными группами) могут быть объединены в общей изолирующей  $n$ -области, на которую подается наивысший потенциал источника питания. В эпитаксиально-планарной с изоляцией  $p$ - $n$ -переходом и полипланарной структурах подложка  $p$ -типа подключается к наинизшему потенциалу источника питания.

В случае, если ряд транзисторов имеют общий потенциал на коллекторах, последние целесообразно объединить в общую коллекторную область (рис. I5).

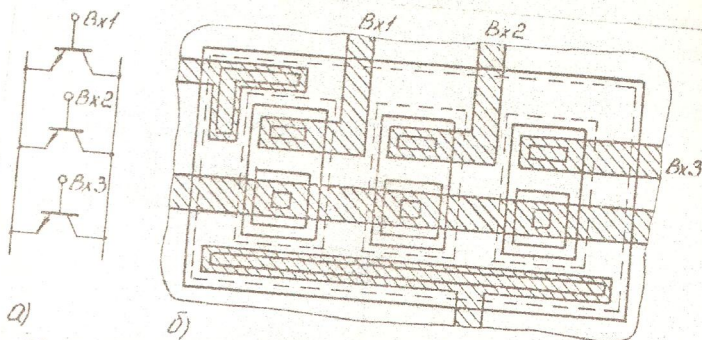


Рис. 15. Фрагмент схемы ЭСД (а) и топология транзисторов с общим коллектором (б)

Минимально допустимые расстояния между соседними элементами ИС зависят от структуры (рис. 16). В эпитаксиально-планарной структуре с изоляцией  $p-n$ -переходом расстояние между элементами в донной части определяется шириной окна в окисле и параметрами изолирующей диффузии и должно составлять не менее 10 мкм.

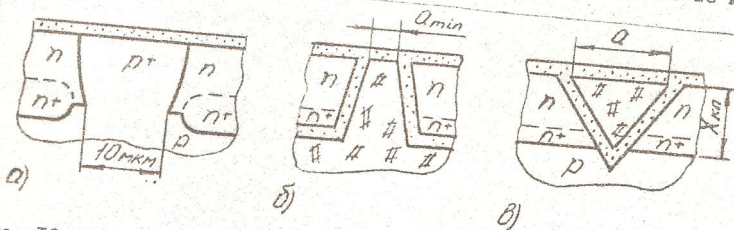


Рис. 16. Расстояния между соседними элементами ИС при изоляции  $p-n$ -переходом (а), диэлектриком (б) и комбинированной изоляции (в)

В структуре с диэлектрической изоляцией расстояние между элементами (толщина поликристаллической прослойки) на поверхности может быть принято равным  $a_{min}$ . В полипланарной структуре ширина изолирующей канавки  $a$  определяется условиями анизотропного травления:  $a \gg X_{n1} \sqrt{2}$ , где  $X_{n1}$  — толщина эпитаксиального слоя.

Расположение и размеры знаков совмещения двух смежных топологических слоев должны быть таковы, чтобы при точной взаимной ориентации слоев по контуру сцентрированных знаков обеспечивался

равномерный зазор (рис. 17). Номинальное (проектируемое) значение зазора, мкм:

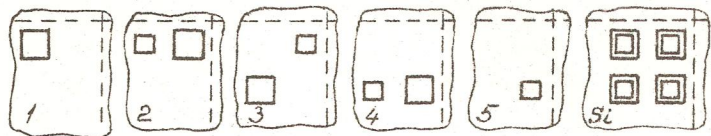


Рис. 17. Расположение знаков совмещения на фотошаблонах (1-5) и на кремниевой подложке после ее полной обработки

$$\sigma_{\text{ном}}^2 = \sigma_{\text{мш}}^2 + \Delta_{\text{ц}} + (\Delta_{\text{п}} + \Delta_{\text{ш}}) / 2, \quad (55)$$

где  $\sigma_{\text{мш}}^2 = 200/\Gamma$ ;

$\Gamma$  - кратность увеличения микроскопа установки совмещения (обычно 100-250 $\times$ );

$\Delta_{\text{ц}}$  - инструментальная погрешность (погрешность фиксации фотошаблона относительно подложки);

$\Delta_{\text{п}}$  и  $\Delta_{\text{ш}}$  - погрешность размеров топологических элементов соответственно на подложке и фотошаблоне.

Результатом топологического проектирования являются чертеж общей топологии ИС и послойные топологические чертежи. На чертеже общей топологии указывают размеры кристалла и обозначения элементов и периферийных контактов, на послойных топологических чертежах - координаты элементов топологического рисунка слоя. Способ задания координат должен быть увязан с видом исходной информации, необходимой для программирования работы технологических установок (координатографов, генераторов изображения).

Топологические чертежи выполняют в масштабах 100:1; 200:1 и других масштабах увеличения, кратных ста.

#### Литература

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. - М.: Сов.радио, 1980.
2. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. - М.: Радио и связь, 1983.
3. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. - М.: Радио и связь, 1982.
4. Аваев Н.А. и др. Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. - М.: Сов.радио, 1977.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Основные соотношения и константы, используемые в расчетах .....	3
2. Проектирование структуры биполярного интегрального транзистора .....	7
3. Топологический расчет транзистора .....	12
4. Оценка основных параметров биполярного транзистора .....	17
5. Диоды и резисторы .....	18
6. Особенности структурно-топологического проектирования МДП-интегральных схем .....	20
7. Общие рекомендации по топологическому проектированию интегральных схем .....	23
Литература .....	27