

Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

О.Д. Парфенов

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
ТРАНЗИСТОРОВ

Методические указания к курсовому проектированию
по курсу
"Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств"

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана

1997

ББК 32.85

П18

Рецензент И.П.Бушминский

П18 Парфенов О.Д. Расчет и конструирование интегральных транзисторов: Методические указания к курсовому проектированию по курсу "Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств". - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1997. - 20 с., ил.

Изложена методика структурного и топологического проектирования биполярных и МДП-транзисторов. Приведены особенности проектирования многоэмиттерных транзисторов, биполярных диодов и диодов Шотки, а также структур с дополняющими МДП-транзисторами. Для студентов 4-го курса специальности "Конструирование и технология электронно-вычислительных средств", выполняющих домашние задания и курсовые работы.

Ил. 9. Табл. 2. Библиогр. 4 назв.

ББК 32.85

Редакция заказной литературы

Олег Дмитриевич Парфенов

Расчет и конструирование интегральных транзисторов

Заведующая редакцией Н.Г.Ковалевская

Редактор С.А.Филиппова

Корректор Л.И.Малютина

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997.

Подписано в печать 12.06.97. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
Печ. л. I, 25. Усл. печ. л. I, 16. Уч.-изд. л. I, 09. Тираж 100 экз. Изд. № 39.
Заказ 67

С

Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана,
типография МГТУ им.Н.Э.Баумана.
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от стандартных транзисторов, имеющих самостоятельное применение (так называемые "дискретные элементы"), интегральные транзисторы имеют ряд конструктивно-технологических особенностей, главные из которых следующие:

1. Независимо от электрических характеристик отдельных транзисторов все они в составе конкретной интегральной микросхемы (ИМС) должны иметь одинаковую вертикальную физическую структуру, что обеспечивает их технологическую совместимость и позволяет формировать их одновременно в едином технологическом процессе. Необходимые различия в электрических характеристиках достигаются соответствующей топологией (формой и размерами в плане) отдельных областей. Принцип технологической совместимости с транзисторами распространяется и на структуру других элементов ИМС (диодов, резисторов, конденсаторов). Таким образом, в структурно-технологическом смысле транзистор представляет собой базовый элемент ИМС.

2. Интегральные транзисторы являются планарными, что означает выход всех его активных областей на одну, общую плоскость кристалла. Это обеспечивает возможность обработки кристалла с одной стороны, упрощая задачу взаимной ориентации отдельных областей в плане, но в то же время порождает ряд нежелательных побочных явлений (эффект оттеснения эмиттерного тока, повышенное сопротивление коллектора, возможность образования паразитных проводящих каналов на поверхности и др.), требующих специальных мер для их подавления или ослабления.

3. Плотная "упаковка" элементов ИМС в общем кристалле выдвигает на первый план задачу надежной межэлементной изоляции, т.е. создание разделительных областей, уменьшающих или исключаящих паразитные емкостные и гальванические связи между соседними элементами. Способ межэлементной изоляции оказывает заметное влияние на состав операций технологического процесса производства ИМС. Например, переход от эпитаксиально-планарной структуры (изоляция $p-n$ -переходом) к изопланарной (изоляция прокислением кремния через толщину эпитаксиального слоя) не только улучшает изоляцию, но и позволяет исключить из основного процесса формирование скрытых слоев и эпитаксиального слоя, перенеся их на этап получения универсальных пластин-заготовок.

Проектирование транзисторов рассматривается здесь на примере традиционных и хорошо освоенных производством структур. Изложенные

принципы и подходы к решению отдельных задач проектирования студент, как надеется автор, может применить и в новых перспективных разработках.

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И КОНСТАНТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАСЧЕТАХ

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

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

где n_i и p_i - концентрация электронов и дырок соответственно, см^{-3} ; T - абсолютная температура, К; $k = 8,63 \cdot 10^{-5}$ эВ/К - постоянная Больцмана; E_g - ширина запрещенной зоны (для кремния при $T = 300$ К $E_g = 1,11$ эВ).

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

Для легированного полупроводника при фиксированной температуре произведение концентрации электронов на концентрацию дырок также постоянно и не зависит от степени легирования [1]. 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 - концентрации равновесных носителей (электронов и дырок) собственной проводимости, см^{-3} ; N_n и N_p - концентрации 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 $p = n$)

$$N_n - N_p = n_n - p_p, \quad (3')$$

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

и величину удельной проводимости. Расчет объемного удельного сопротивления диффузионных и имплантированных областей, а также их удельного поверхностного сопротивления приведен в [2].

При приложении к p - n -переходу обратного напряжения с каждой его стороны возникает обедненный слой. Его суммарная толщина для ступенчатого перехода

$$x_0 = [2 \varepsilon \varepsilon_0 U_{\Sigma} (N_p + N_n) / (q N_p N_n)]^{1/2}; \quad (4)$$

для плавного перехода

$$x_0 = [12 \varepsilon \varepsilon_0 U_{\Sigma} / (q \alpha)]^{1/3}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) x_0 - суммарная толщина обедненного слоя, см; ε - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника (для кремния при $T = 300$ К $\varepsilon = 11,7$); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см - диэлектрическая проницаемость вакуума; $U_{\Sigma} = U_{см} + U_t$ - полное напряжение на переходе, В; $U_{см}$ - напряжение обратного смещения, В; U_t - контактная разность потенциалов (равновесный потенциальный барьер), В, определяемая по формуле

$$U_t = k T \ln (N_p N_n / n_i^2) / q. \quad (6)$$

Здесь $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана; N_p и N_n - эффективные концентрации примесей на соответствующих сторонах перехода, см $^{-3}$; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона.

Для кремния при температуре 300 К:

$$U_t = 0,026 \ln (N_p N_n / 1,9 \cdot 10^{20}). \quad (6')$$

Для плавного перехода ($N_p = N_n = N_{пер}$):

$$U_t = 0,026 \ln (N_{пер}^2 / 1,9 \cdot 10^{20}). \quad (6'')$$

Градиент эффективной концентрации примеси α в рассматриваемой области определяется как алгебраическая разность между градиентом концентрации введенной в область примеси и градиентом эффективной концентрации примеси в исходной области.

Градиент концентрации введенной примеси при двухстадийной диффузии (гауссово распределение):

$$\alpha = \frac{\partial N}{\partial x} \Big|_{x=x_n} = -Q x_n \exp(-x_n^2 / 4 D_p t_p) / (2 D_p t_p \sqrt{\pi D_p t_p}). \quad (7)$$

При одностадийной диффузии (закон дополнения функции ошибок):

$$\alpha = -N_0 \exp(-x_n^2 / 4Dt) / \sqrt{\pi Dt}. \quad (8)$$

Формула (7) справедлива для донной (плоской) части перехода. Для боковой (радиусной) части перехода на поверхности следует использовать формулу (8) с подстановкой вместо N_0 значения $0,5 N_{03}$, где N_{03} - поверхностная концентрация примеси на этапе загонки (т.е. перед разгонкой примеси).

При ионной имплантации (гауссово распределение):

$$\alpha = -Q(x_n - \lambda_{cp}) \exp[-(x_n - \lambda_{cp})^2 / 2\sigma^2] / (6^3 \sqrt{2\pi}). \quad (9)$$

В формулах (7), (8) и (9) использованы обозначения, принятые в лекционном курсе, а также в [3]: α - градиент эффективной концентрации примеси, см^{-4} ; x_n - глубина залегания перехода, см ; N_0 - поверхностная концентрация примеси, см^{-3} ; Q - доза легирования, см^{-2} ; D - коэффициент диффузии, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; t - время диффузии, с ; λ_{cp} - средняя длина пробега ионов, см ; σ - среднее квадратическое отклонение пробегов, см .

Обратносмещенный переход обладает барьерной емкостью.

Для ступенчатого перехода

$$C_0 = [q \epsilon \epsilon_0 N_p N_n / 2 U_\Sigma (N_p + N_n)]^{1/2}, \quad (10)$$

для плавного перехода

$$C_0 = (\epsilon \epsilon_0)^{2/3} (q \alpha / 12 U_\Sigma)^{1/3}, \quad (11)$$

где C_0 - удельная емкость перехода на единицу площади, $\Phi/\text{см}^2$. Рост обратного напряжения на переходе, как следует из формул (4) и (5), обуславливает рост напряженности электрического поля. При $U_\Sigma = U_{пр}$ напряженность поля достигает значения $E_{\max} = 3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ при котором наступает лавинный пробой.

Для ступенчатого перехода

$$U_{пр} = 2 \epsilon \epsilon_0 E_{\max}^2 (N_p + N_n) / (q N_p N_n), \quad (12)$$

для плавного перехода

$$U_{пр} = (12 \epsilon \epsilon_0 E_{\max}^3 / q \alpha)^{1/2}, \quad (13)$$

где $U_{пр}$ - пробивное напряжение, В .

В формулы (5), (11) и (13) входят абсолютные значения величины α . Следует иметь в виду, что формулы (12) и (13) справедливы

только для плоских переходов (однородное электрическое поле). Плоские ступенчатые переходы имеют место на границе эпитаксиального слоя и подложки, а также на боковых поверхностях имплантированных областей. Плоские плавные переходы образуются в донной части диффузионных и имплантированных областей. Что касается боковых поверхностей диффузионных областей (плавные переходы), то формула (13) дает завышенные значения $U_{пр}$, так как не учитывает увеличение напряженности поля, которая возрастает с увеличением кривизны поверхности перехода. Значения $U_{пр}$, рассчитанные по этим формулам, должны превышать обратные напряжения не менее чем в 3 - 4 раза.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Проектирование структуры следует начинать с задания толщин областей транзистора.

Толщину области эмиттера $x_э$ (рис. 1) выбирают в пределах 0,6...2 мкм, а толщину базовой области $x_б$ - 1...2,8 мкм. Толщина активной базы $w = x_б - x_э$ должна находиться в пределах 0,6...0,8 мкм для диффузионных структур и 0,4...0,6 мкм для имплантированных. Толщину эпитаксиального коллектора $x_к$ выбирают в пределах 2,5...6 мкм, скрытого слоя $x_{сc}$ - в пределах 2,5...3,5 мкм.

Выпускаемые промышленностью исходные кремниевые пластины диаметром 75, 100 и 125 мм имеют номинальную толщину соответственно 380, 450 и 600 мкм.

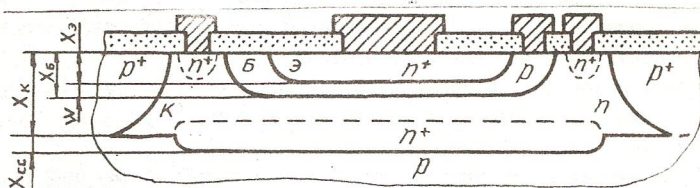


Рис. 1. Структура биполярного интегрального транзистора с изоляцией p-n-переходом

Толщина изолирующего слоя оксида кремния составляет 0,3...0,6 мкм, а алюминиевой разводки - 0,6...1 мкм ($R_{сл} = 0,06...0,1 \text{ Ом}$)

Кроме толщины к параметрам структуры относят тип проводимости отдельных областей и концентрацию примеси. Для диффузионных областей указывают поверхностную концентрацию N_0 , а для имплантированных - N_0 и N_{max} .

Концентрация примеси в диффузионной эмиттерной области должна быть максимально возможной и соответствовать на поверхности пределу

растворимости при температуре диффузии (для фосфора $8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, для бора $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Такую возможность обеспечивает одностадийный процесс диффузии из постоянного источника. Ионная имплантация не имеет ограничений по растворимости, однако значения N_{max} следует выбирать не выше указанных для диффузии, что обеспечивает полную активацию примеси при отжиге и высокую подвижность основных носителей.

Поверхностную концентрацию в базовой области выбирают в пределах $5 \cdot 10^{17} \dots 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что обеспечивает компромисс между требованиями получения омического контакта (отсутствие потенциального барьера Шотки) и высокого коэффициента инжекции.

Концентрация примеси в эпитаксиальном коллекторе определяется требованиями высокой электрической прочности и низкой барьерной емкости коллекторного перехода и находится в пределах $10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Скрытый слой при указанной выше толщине должен иметь удельное поверхностное сопротивление $30 \dots 45 \text{ Ом}$.

Переход "подложка - эпитаксиальный слой" должен обладать высокими изолирующими свойствами, поэтому необходимо, чтобы концентрация примеси в подложке составляла $10^{14} \dots 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Следующий этап проектирования структуры транзистора включает в себя расчет технологических режимов формирования базовой и эмиттерной областей. Методика расчета режимов излагается в лекционном курсе, а также в [3]. В результате расчета для эмиттерной диффузионной области становятся известными коэффициент диффузии D и время процесса t , для диффузионной базовой области - D_P и t_P (стадия разгонки примеси), D_3 , t_3 и N_{03} (стадия загонки примеси). Для имплантированных областей в процессе расчета определяются средняя длина пробега ионов $\lambda_{\text{ср}}$ и среднее квадратическое отклонение пробегов σ , а также доза легирования (для каждой ступени, если процесс ступенчатый).

Проектирование структуры завершается оценкой напряжений пробоя переходов по формулам (I2) и (I3). В результате расчета может возникнуть необходимость коррекции концентраций примеси и других параметров структуры, принятых ранее.

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.

Приведенные ниже расчетные формулы получены с учетом следующих условий:

1. Рассматривается наиболее неблагоприятное сочетание погрешностей (расчет на наихудший 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 основных носителей.

Вследствие эффекта оттеснения тока к краям эмиттерной области [4] нагрузочная способность транзистора определяется не площадью эмиттера, а его периметром. Справедлива эмпирическая формула

$$\Pi_{\min} = 6 I_{\text{э max}}, \quad (I4)$$

где Π_{\min} - минимальный периметр эмиттерной области, мкм; $I_{\text{э max}}$ - максимальный эмиттерный ток, мА.

Поскольку контактное окно для эмиттера является наименьшим топологическим элементом, задают ширину окна $l_{\text{эк1}} \geq a_{\min}$, где a_{\min} - минимальный топологический размер (конструкторская норма).

Ширина металлического контакта $l_{\text{эл1}}$ над контактным окном (рис. 2а) определяется из выражения

$$l_{\text{эл1}} \geq l_{\text{эк1}} + 2 \Delta_{\text{п}} + 2 \Delta_{\text{с}}, \quad (I5)$$

где $\Delta_{\text{п}}$ - погрешность (предельное отклонение) размера топологического элемента на подложке; $\Delta_{\text{с}}$ - погрешность (предельное отклонение) совмещения двух топологических слоев, формируемых на смежных этапах литографии.

Ширина эмиттерной области (рис. 2б) находится из выражения

$$l_{\text{эл}} \geq l_{\text{эл1}} + 2 \Delta_{\text{п}} + 4 \Delta_{\text{с}}. \quad (I6)$$

В этой области 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 $l_{\text{эл2}}$ определяется из условия $2l_{\text{эл1}} + 2l_{\text{эл2}} \geq \Pi_{\min}$, причем $l_{\text{эл2}} \geq l_{\text{эл1}}$. Соответственно рассчитывается длина контактного окна $l_{\text{эк2}} \geq l_{\text{эк1}}$.

Топологический расчет базовой области сводится к определению двух характерных размеров: расстояния $d_{\text{бэл1}}$ между переходами в месте расположения базового контакта (рис. 2в) и расстояния $d_{\text{бэл2}}$

на тех участках, где контакт отсутствует (рис. 2г):

$$d_{БЭ1} \geq l_{БП} + 2\Delta_n + 6\Delta_c + \alpha_{\min}, \quad (17)$$

$$d_{БЭ2} \geq \Delta_n + \Delta_c + L_{нБ}, \quad (18)$$

где $l_{БП}$ - ширина металлического контакта над контактными окнами /аналогично формуле (15) $l_{БП} \geq l_{БК} + 2\Delta_n + 2\Delta_c$; $L_{нБ}$ - диффузионная длина неосновных носителей (электронов) в базе ($L_{нБ} \approx 4$ мкм)

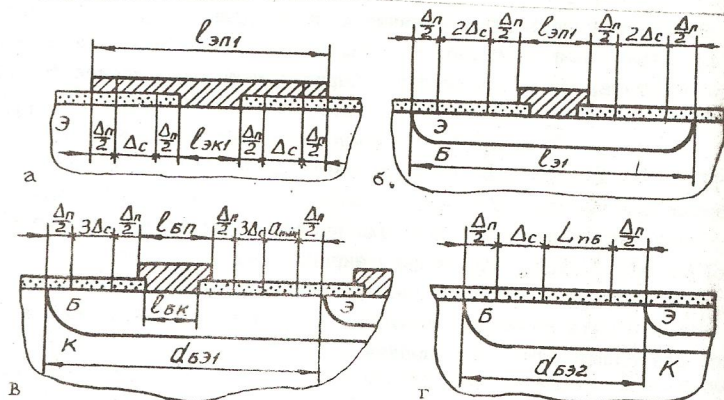


Рис. 2. Схемы к топологическому расчету биполярного транзистора

Соответствующий размер базовой области в общем случае находят по формуле

$$l_{Б} = l_{Э} + d_{БЭ1} + d_{БЭ2}. \quad (19)$$

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

$$d_{КБ} \geq l_{КП} + 2\Delta_n + 8\Delta_c + \alpha_{\min}. \quad (20)$$

Для уменьшения сопротивления коллектора n^+ -область под коллекторным контактом выполняется в виде замкнутого канала, а металлический контакт должен занимать возможно большую длину канала. Поэтому $d_{КБ1} = d_{КБ2} = d_{КБ}$ и $l_{К} = l_{Б} + 2d_{КБ}$.

Структура многосмиттерного транзистора (в схемах ТТЛ) содер-

жит одну коллекторную область, одну базовую и соответствующее число эмиттерных областей (рис. 3).

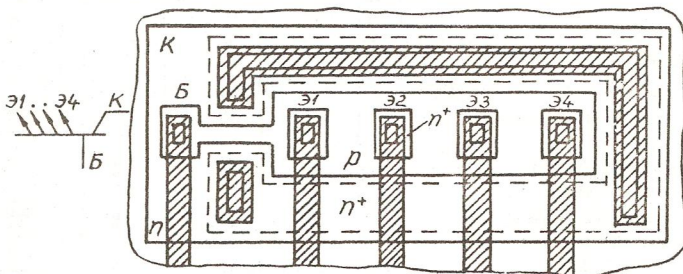


Рис. 3. Схема и топология многоэмиттерного транзистора

Для исключения взаимодействия смежных эмиттеров (паразитные горизонтальные $n^+ - p - n^+$ -транзисторы) расстояние между ними следует выбирать не менее $(2...3) L_{nБ}$. Если транзистор легирован золотом, то диффузионная длина электронов в базе составляет 2...3 мкм и практически достаточно расстояния 10 мкм. Для уменьшения инверсионного коэффициента передачи тока сопротивление пассивной базы повышают за счет увеличения расстояния от базового контакта до активной области базы. Сопротивление "перешейка" должно быть не менее 300 Ом.

В качестве диодов полупроводниковых ИМС могут быть использованы транзисторные структуры в диодном включении. Возможные схемы диодного включения транзисторов показаны на рис. 4: 1 - с закороченным переходом "база - коллектор" ($U_{кБ} = 0$); 2 - с закороченным переходом "эмиттер - база" ($U_{эБ} = 0$); 3 - с закороченными эмиттером и коллектором ($U_{кэ} = 0$); 4 - с "оторванным" коллектором ($I_{к} = 0$); 5 - с "оторванным" эмиттером ($I_{э} = 0$). В табл. I приведены ориентировочные параметры диодов для различных вариантов.

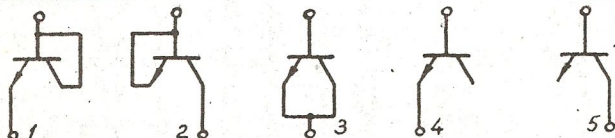


Рис. 4. Возможные варианты диодного включения транзисторов

Параметр	Вариант включения				
	I	2	3	4	5
Напряжение пробоя, В	7...8	40...50	7...8	7...8	40...50
Обратный ток, нА	0,5...1	15...30	20...40	0,5...1	15...30
Емкость "анод - катод", пФ	0,5	0,7	1,2	0,5	0,7
Емкость "диод - заземленная подложка", пФ	3	3	3	1,2	3
Время восстановления обратного тока, нс	10	50	100	50	75

Чаще других используют варианты I и 4.

Для повышения скорости переключения транзисторов, работающих в режиме насыщения, нередко используются диоды Шоттки, включаемые между коллектором и базой (рис. 5). Барьер Шоттки формируют обычно на γ -кремнии при концентрации донорной примеси не выше 10^{17} см $^{-3}$.

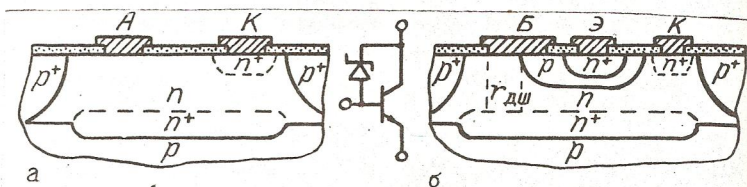


Рис. 5. Структура диода Шоттки (а) и транзистора с шунтирующим диодом Шоттки (б)

Вольт-амперная характеристика диода Шоттки имеет вид

$$I = I_0 [\exp(U/\varphi_t) - 1], \quad (2)$$

где $I_0 = SA_R T^2 \exp(-\varphi_b/\varphi_t)$; $\varphi_t = kT/q$ - температурный потенциал; φ_b - высота барьера контакта "металл - полупроводник"; S - площадь контакта, см 2 ; A_R - постоянная Ричардсона (для кремния n-типа - равна $112 \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^2)$); 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 $\varphi_{\text{Б}}$ (в вольтах) для некоторых металлов контакта с кремнием π -типа: Ti - 0,5; Ni - 0,68; Ag - 0,76; Al, Cu - 0,77; Pd - 0,78; Au - 0,84, Pt - 0,86.

Площадь поверхности металлического контакта должна быть оптимальной и обеспечивать одновременно малую емкость и малое последовательное сопротивление участка коллектора под контактом ($r_{\text{ш}}$ на рис. 5).

4. ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Нормальный коэффициент передачи тока α (в схеме с общей базой) определяется по формуле

$$\alpha \approx \gamma \alpha, \quad (22)$$

где γ - коэффициент инжекции; α - коэффициент переноса носителей в базе.

Коэффициент инжекции (для дрейфового транзистора) равен

$$\gamma = 1 / (1 + \omega D_{\text{Э}} N_{\text{Б}} / 2 L_{\text{Э}} D_{\text{Б}} N_{\text{Э}} \eta), \quad (23)$$

где ω - толщина активной базы, мкм; $L_{\text{Э}}$ - диффузионная длина дырок в эмиттере, мкм; $D_{\text{Э}}$ и $D_{\text{Б}}$ - коэффициенты диффузии неосновных носителей в эмиттере и активной базе соответственно, $\text{см}^2/\text{с}$ ($D = 0,026\mu$); $N_{\text{Э}}$ и $N_{\text{Б}}$ - средняя концентрация примеси в эмиттере и активной базе соответственно, см^{-3} ; $\eta = 0,51\eta (N_{\text{БЭ}} / N_{\text{БК}})$ - коэффициент неоднородности активной базы; $N_{\text{БЭ}}$ и $N_{\text{БК}}$ - концентрация примеси на верхней и нижней границах активной базы соответственно, см^{-3} .

Коэффициент переноса носителей в базе

$$\alpha = 1 - \omega^2 / 2 L_{\text{Б}}^2 (\eta + 1), \quad (24)$$

где $L_{\text{Б}}$ - диффузионная длина электронов в базе, мкм.

Граничная частота по коэффициенту передачи

$$f_{\alpha} = \omega_{\alpha} / 2\pi, \quad (25)$$

где круговая частота ω_{α} определяется из выражения

$$1/\omega_{\alpha} = 1/\omega_{\text{Э}} + 1/\omega_{\text{Б}} + 1/\omega_{\text{К}}, \quad (26)$$

т.е. задержка сигнала транзистором складывается из времени задержки сигнала эмиттером ($1/\omega_{\text{Э}}$), времени переноса носителей в базе ($1/\omega_{\text{Б}}$) и времени задержки сигнала коллектором ($1/\omega_{\text{К}}$). Отдель-

ные слагаемые выражения (26) определяются по формулам

$$1/\omega_3 = r_3 C_3, \quad (27)$$

где $r_3 = kT / (q I_3)$ - сопротивление эмиттера, Ом; $C_3 = \omega_3 C_{03}$ - емкость эмиттерного перехода, Ф; I_3 - ток эмиттера, А; S_3 - площадь перехода "эмиттер - база", см²; C_{03} - удельная емкость перехода "эмиттер - база", Ф/см²;

$$1/\omega_6 = \omega^2 / 2D_6 (\eta + 1), \quad (28)$$

где $D_6 = kT \mu_n / q$ - коэффициент диффузии электронов в базе, см²/с (при $T = 300$ К $D_6 = 0,026 \mu_n$);

$$1/\omega_k = r_k C_k, \quad (29)$$

где r_k - сопротивление тела коллектора коллекторному току, Ом; $C_k = S_k C_{ок}$ - емкость перехода "база - коллектор", Ф.

При расчете r_k коллекторную область разбивают на участки простой конфигурации, для которых подсчитывают сопротивления (рис. 6):

для конфигурации (а) $r = \rho l / (\alpha d), \quad (30a)$

для конфигурации (б) $r = \rho l / [d(\alpha_2 - \alpha_1) \ln(\alpha_2 / \alpha_1)], \quad (30б)$

для конфигурации (в) $r = \rho / [3\alpha(l/d + d/l)], \quad (30в)$

для конфигурации (г) $r = \rho / [6\alpha(l/2d + 2d/l)]. \quad (30г)$

Далее находят полное сопротивление r_k , учитывая направления токов. Пример разбивки коллекторной области на участки (1...5) показан на рис. 6д.

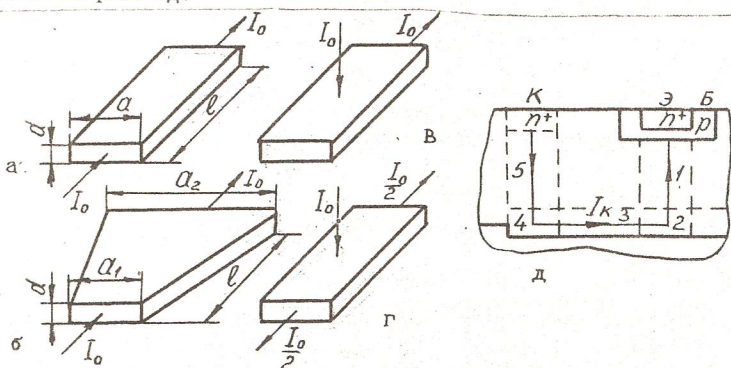


Рис. 6. Элементы тела коллектора (а - г) и схема (д) к расчету сопротивления тела коллектора

5. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

В схемах на дополняющих МДП-транзисторах (КМДП-ИМС) необходима взаимная изоляция n - и p -канальных транзисторов. По технологическим соображениям целесообразно транзисторы с n -каналом объединять в изолирующих p -областях ("карманах"), используя в качестве общей подложки КМДП-ИМС кремний n -типа (рис. 7).

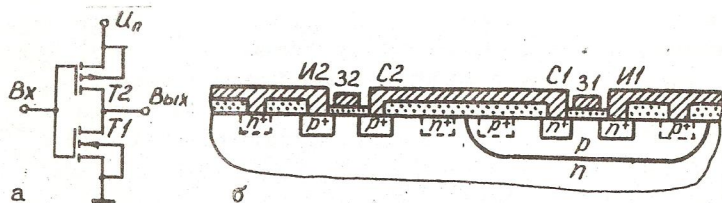


Рис. 7. Схема (а) и структура (б) инвертора на дополняющих МДП-транзисторах

Глубину областей истоков и стоков выбирают в пределах 1,5...2,5 мкм, а изолирующей p -области - 4...6 мкм. Каналоограничительные и приконтактные области должны быть технологически совместимы с областями истоков и стоков.

Концентрация примеси в областях истоков и стоков должна быть максимально возможной, обеспечивая поверхностное сопротивление n^+ -областей не выше 15 Ом и p^+ -областей не выше 50 Ом. Поверхностная концентрация примеси в p -карманах должна быть порядка 10^{16} см^{-3} и уточняться при расчете порогового напряжения n -канальных транзисторов. Концентрация примеси в подложке должна быть порядка 10^{15} см^{-3} и уточняться при расчете порогового напряжения p -канальных транзисторов.

Толщину подэпиторного диэлектрика (порядка 0,08...0,12 мкм) рассчитывают из условия электрической прочности. Пробивная напряженность поля двуокиси кремния, выращенной в сухом кислороде, $E_{пр} = 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Напряжение пробоя должно в 2...3 раза превышать напряжение питания.

Толщина защитного (изолирующего) окисла составляет 0,6...0,8 мкм и ограничена технологическими соображениями.

Важнейшими параметрами МДП-транзистора является пороговое напряжение U_0 и удельная крутизна b передаточной характеристики.

Пороговое напряжение оценивают по формуле

$$U_0 = \varphi_{\text{МП}} - Q_{\text{OS}} / C_0 \pm 2 \varphi_F \pm \sqrt{2q \epsilon_n N_0 \varphi_F} / C_0. \quad (31)$$

где $\varphi_{\text{МП}}$ - разность работ выхода электрона из материала затвора и из кремния, В (табл. 2); для кремниевого затвора $\varphi_{\text{МП}} = 0$, В; Q_{OS} - плотность заряда поверхностных состояний, зависящая от кристаллографической плоскости подложки: для (111), (110), (100) соответственно $8 \cdot 10^{-8}$, $3,2 \cdot 10^{-8}$, $1,44 \cdot 10^{-8}$ Кл/см²; φ_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⁻³; ϵ_n - относительная диэлектрическая проницаемость (для кремния $\epsilon_n = 11,7$); $C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_d / d_d$ - удельная емкость системы "затвор - канал"; ϵ_d и d_d - относительная диэлектрическая проницаемость и толщина (в см) подзатворного диэлектрика. В случае двухслойного диэлектрика $\epsilon_d = \epsilon_{d1} \epsilon_{d2} d_d / (\epsilon_{d2} d_{d2} + \epsilon_{d1} d_{d1})$ и $d_d = d_{d1} + d_{d2}$. При $T = 300$ К значения ϵ_d для различных диэлектриков следующие:

SiO₂ - 3,9; SiO - 5...6; Si₃N₄ - 7,5; Al₂O₃ - 8...9.

В формуле (31) знаки "+" третьего и четвертого слагаемых относятся к n -канальным транзисторам, а знаки "-" - к p -канальным. В формуле не учитываются активные примеси, которые могут содержаться в подзатворном диэлектрике.

Таблица 2

N_0 , см ⁻³	Значения $\varphi_{\text{МП}}$, В	
	Система Al-SiO ₂ - n -Si	Система Al-SiO ₂ - p -Si
10 ¹⁴	-0,36	-0,82
10 ¹⁵	-0,30	-0,88
10 ¹⁶	-0,24	-0,94
10 ¹⁷	-0,18	-1,0

По формуле (31) оценивают также пороговое напряжение, при котором образуются паразитные каналы под металлической разводкой и защитным окислом. Если оно меньше напряжения питания, то необходимо в структуру ИМС ввести каналоограничительные области p^+ и n^+ -типа (рис. 76). Последние в некоторых случаях могут быть использованы в качестве шин питания и земли.

Удельная крутизна МДП-транзистора определяется формулой

$$b = \mu C_0 Z / L, \quad (32)$$

где β - удельная крутизна МДП-транзистора, A/B^2 ; μ - подвижность носителей в поверхностном слое, $\text{см}^2/(B \cdot \text{с})$; 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 . При увеличении C_0 и Z повышается крутизна и ухудшается быстродействие транзистора.

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

$$L_{\min} = \sqrt{2 \varepsilon \varepsilon_0 U_n / (q N)}, \quad (33)$$

где U_n - напряжение питания, В; N - концентрация примеси в подложке на уровне дна истока (стока), см^{-3} .

Реальная длина канала зависит от технологических возможностей и ограничений. Из рис. 8а следует, что достижимый минимум длины зависит от минимальной длины перемычки между крошками окон под диффузию стока и истока (принимается равной a_{\min} - топологической норме) и боковой диффузии y_b под маскирующий окисел, которая составляет $(0,75 \dots 0,85) x_n$. Таким образом,

$$L_{\min} = a_{\min} - 2y_b = a_{\min} - (1,5 \dots 1,7) x_n. \quad (34)$$

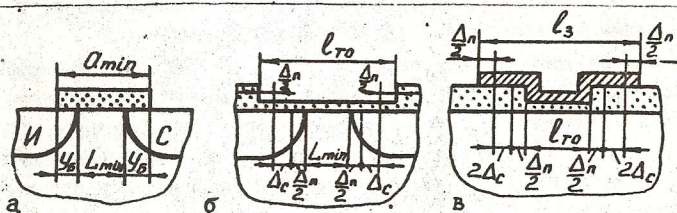


Рис. 8. Схемы к топологическому расчёту области затвора МДП-транзистора

В случае ионной имплантации $L_{\min} = a_{\min}$. Из двух значений L_{\min} , рассчитанных по формулам (33) и (34), выбирают наибольшее.

Длина тонкого окисла l_{to} должна гарантировать перекрытие канала по всей его длине (рис. 8б). Длина тонкого окисла равна

$$L_{\text{го}} = L_{\text{min}} + 2\Delta_n + 2\Delta_c. \quad (35)$$

В свою очередь, длина затвора l_3 должна гарантировать покрытие тонкого окисла по всей его длине (рис. 8в):

$$l_3 = L_{\text{го}} + 2\Delta_n + 4\Delta_c. \quad (36)$$

Ширину канала Z определяют из (32). Ширину тонкого окисла затвора рассчитывают по формулам (35) и (36) с заменой L_{min} на

Минимальная длина истоковой (стоковой) области может быть рассчитана по формуле $l_n = l_n + \alpha_{\text{min}} + 3\Delta_n + 5\Delta_c$. Студенту рекомендуется самостоятельно составить расчетную схему и получить на основе приведенной формулы. При определении минимальных размеров p -каналов нужно соблюдать те же принципы, что и в случае базовой и коллекторной областей биполярного транзистора.

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

$$t_{\text{ф}} \approx 3U_n C_3 / [b_2 (U_n - |U_{o2}|)^2]; \quad t_c \approx 3U_n C_3 / [b_1 (U_n - U_{o1})^2]. \quad (37)$$

где C_3 - емкость системы "затвор - канал".

В схемах с однотипными МДП-транзисторами (рис. 9) для повышения помехоустойчивости и быстродействия необходимо обеспечение условия

$$K = L_2 Z_1 / L_1 Z_2 \geq 10, \quad (38)$$

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 (38), значения L_1 и Z_2 выбирают минимально возможными с учетом технологических ограничений, а значения L_2 и Z_1 - также с учетом опасности смыкания промежутка "исток - сток". Ширина канала Z_1 может быть найдена исходя из заданной крутизны b_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

$$L_2 = L_1 \sqrt{K}; \quad Z_1 = Z_2 \sqrt{K}. \quad (39)$$

Для увеличения плотности компоновки сток активного и исток нагрузочного транзисторов могут быть совмещены (см. рис. 9б,в).

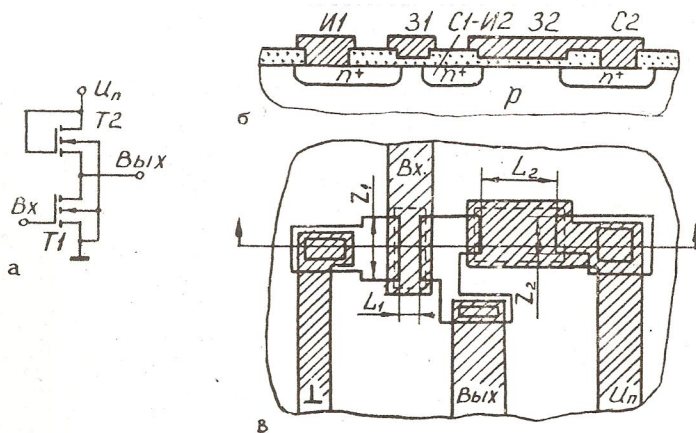


Рис. 9. Схема (а), структура (б) и топология (в) инвертора на n -канальных МДП-транзисторах

Быстродействие ключа с однотипными транзисторами можно оценить длительностью фронта и среза выходного сигнала по формулам

$$t_{\Phi} = 9,2 U_n C_3 / [b_2 (U_n - U_{02})^2]; \quad t_c = 3 U_n C_3 / [b_1 (U_3 - U_{01})^2], \quad (40)$$

где U_3 - отпирающее напряжение на затворе активного транзистора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие д. вузов. - М.: Сов.радио, 1980.-424 с.
2. Парфенов О.Д. Расчет и конструирование интегральных резисторов: Методические указания по курсовому проектированию по курсу "Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств". - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994. - 28 с.
3. Парфенов О.Д. Технология микросхем: Учеб.пособие для вузов по спец. "Конструирование и производство ЭВА".-М.: Высш.шк., 1986. - 320 с.
4. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1989. - 400 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
I. Основные соотношения и константы, используемые в расчетах	
2. Проектирование физической структуры биполярного транзистора	
3. Топологический расчет транзистора	
4. Оценка основных параметров биполярного транзистора	
5. Особенности структурно-топологического проектирования МДП-транзисторов	
Список литературы	