

Министерство образования Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной  
аппаратуры (КУДР)

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой КУДР, профессор  
\_\_\_\_\_ Н.С. Несмелов  
\_\_\_\_\_ 2010 г.

Интегральные устройства радиоэлектроники

**ЭЛЕМЕНТЫ КРЕМНИЕВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ИС**

Руководство к лабораторной работе для студентов  
специальности 210201

Рецензент  
Доцент кафедры КУДР  
\_\_\_\_\_ М.М. Славникова  
\_\_\_\_\_ 2010 г.

Разработчик  
Доцент кафедры КУДР  
\_\_\_\_\_ М.Н. Романовский  
\_\_\_\_\_ 2010 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	4
2 Активные элементы ИС.....	5
3 Определение режимов диффузии.....	7
4 Диффузионные резисторы.....	9
5 Диффузионные конденсаторы.....	11
6 Расчет пробивного напряжения переходов.....	13
7 Объект исследования.....	14
8 Задание.....	15
9 Контрольные вопросы.....	16
10 Рекомендуемая литература.....	16

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Существуют аналоговые (линейные) и множество разновидностей логических (цифровых) биполярных ИС: ДТЛ - диодно-транзисторная логика; ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика; ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика; ТТЛШ – транзисторно-транзисторная логика с диодами Шотки; И<sup>2</sup>Л – интегральная инжекционная логика и др. Каждый тип ИС характеризуется своей элементной базой и занимает место, обусловленное его характеристиками.

Основным элементом кремниевых биполярных ИС является биполярный транзистор, благодаря которому и получили название ИС этого типа. Остальные элементы ИС - диоды, резисторы, конденсаторы и др. - обычно изготавливают на основе полупроводниковых слоев транзисторной структуры.

Конструкция кристалла и технология изготовления ИС в значительной степени определяются способом изоляции элементов. Используются два основных способа изоляции: 1) диэлектрическим слоем и 2) обратно смещенным p-n - переходом.

Изоляция элементов диэлектрическим слоем осуществляется с помощью различных технологических методов. В качестве диэлектрика чаще всего используется SiO<sub>2</sub>, хотя могут применяться и др. диэлектрические материалы, совместимые с технологией кремниевых ИС (например, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Весьма перспективными являются изопланарная технология и технология свержсамосовмещения с использованием слоев поликристаллического кремния.

Классический вариант изоляции элементов ИС обратным смещенным p-n - переходом предполагает проведение разделительной диффузии. В таких ИС большая часть площади кристалла занята изолирующими диффузионными областями. Площадь изолирующих областей дополнительно возрастает за счет допусков на совмещение фотошаблонов, а также потому, что вводимые примеси диффундируют не только вглубь полупроводника, но и под края маски. Значения допусков увеличиваются и из-за того, что эпитаксиальные слои, применяемые в традиционной технологии, имеют большую толщину (5 - 10 мкм), что усугубляет боковую диффузию.

С появлением возможности наращивания тонких эпитаксиальных слоев (толщиной 1 - 2 мкм) были разработаны более простые методы изоляции элементов, позволяющие экономить значительную часть площади кристаллов, в частности коллекторная изолирующая диффузия, базовая изолирующая диффузия и др.

К настоящему времени возможности изоляции элементов ИС методом разделительной диффузии уже исчерпаны из-за больших паразитных емкостей, значительных токов утечки, возникновения структур паразитных транзисторов, низкой радиационной стойкости. Однако такие ИС весьма удобны для изучения ввиду больших размеров элементов.

Целью настоящей работы является изучение элементов кремниевых биполярных ИС на примере структур, изготовленных по классической эпитаксиально-планарной технологии.

## 2 АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИС

На рис. 2.1 показаны топология и структура малоомощного эпитаксиально-планарного транзистора n-p-n - типа с изоляцией разделительной диффузией. Минимальный размер эмиттерной, базовой и коллекторной областей определяется разрешающей способностью микролитографии. При минимальном размере окна  $d = 0,35$  мкм (проектная норма) и толщине эпитаксиального слоя  $d_э = 2,5$  мкм площадь транзистора с изолирующей областью  $S_{Тр1} = (13 \cdot d + 2 \cdot d_э) \cdot (7 \cdot d + 2 \cdot d_э) = 71,15$  мкм<sup>2</sup>. При этом площадь собственно транзистора  $S_{Тр2} = 13 \cdot d \cdot 7 \cdot d = 11,15$  мкм<sup>2</sup>.

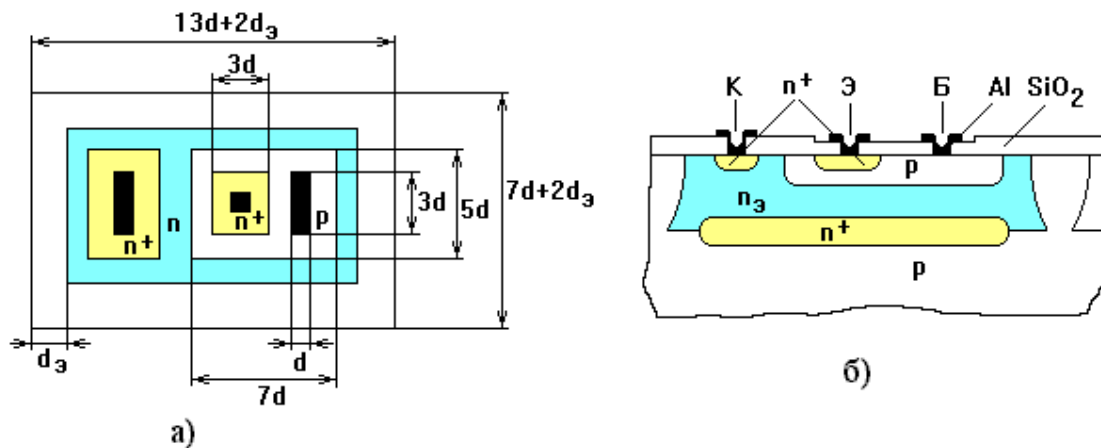


Рисунок 2.1 – Топология (а) и структура (б) интегрального транзистора:  
К – коллектор, Э – эмиттер, Б - база

Типичное распределение примеси в транзисторной структуре приведено на рис. 2.2. Результирующий концентрационный профиль скрытого n<sup>+</sup>-слоя (кривая 1) определяется режимом локального легирования p-подложки донорной примесью, а также диффузионными процессами на этапах эпитаксиального наращивания n-слоя и всех последующих высокотемпературных обработок. Поэтому для создания скрытого n<sup>+</sup>-слоя предпочтительнее использовать медленно диффундирующие примеси (например, мышьяк или сурьму вместо фосфора): в этом случае глубина проникновения примесей из скрытого n<sup>+</sup>-слоя в эпитаксиальный n-слой будет меньше.

Диффузию в базовую область обычно проводят в две стадии. В качестве акцепторной примеси используют бор - единственный акцептор с высокой предельной растворимостью в кремнии. Эмиттерную область формируют, как правило, в одну стадию с использованием фосфора - единственного быстро диффундирующего донора.

Вторая стадия формирования базовой области транзистора - разгонка бора - начинается в окисляющей среде. Слой SiO<sub>2</sub>, образующийся на поверхности подложки, используется в качестве маски при создании эмиттера диффузией фосфора. При диффузии фосфора продолжается разгонка бора.

Таким образом, разгонка бора осуществляется фактически в два этапа, отличающиеся условиями проведения процесса.

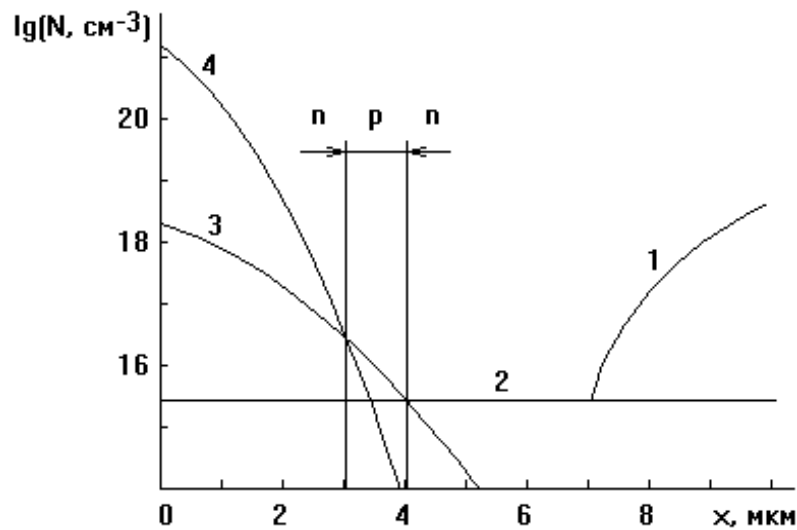


Рисунок 2.2 - Распределение примеси в транзисторной структуре:  
1 – скрытый  $n^+$ -слой; 2 – эпитаксиальный  $n$ -слой; 3 – базовая область  $p$ -типа; 4 – эмиттерная область  $n$ -типа

Параметры и рабочие характеристики транзистора рассчитываются машинными методами. Расчет предполагает разработку электрической и физико-топологической моделей транзистора, оптимизацию рабочих характеристик, оценку влияния изменений окружающей среды на характеристики.

Диоды ИС изготавливаются одновременно с транзисторами. Структуры рис. 2.3, а могут обеспечить наибольшее быстродействие, их предпочтительнее использовать в логических ИС; структуры рис. 2.3, б также используют в логических ИС, но в качестве накопительных диодов; структуры рис. 2.3, г - е, имеющие наибольшее значение напряжения пробоя, - в качестве диодов общего назначения.

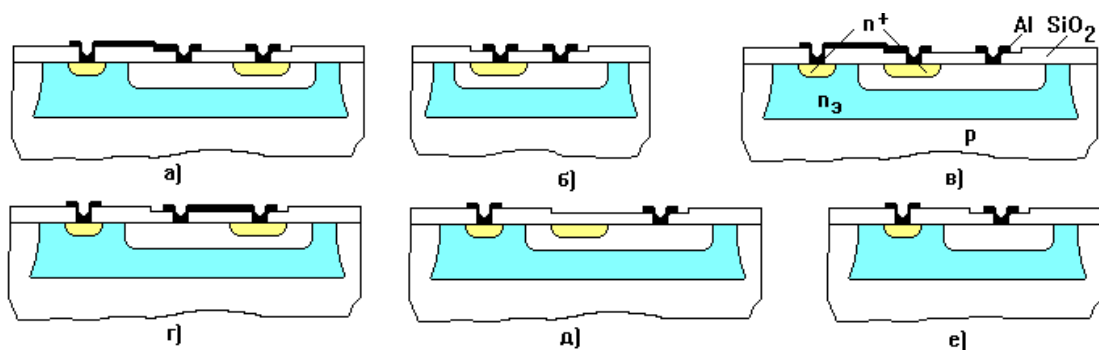


Рисунок 2.3 - Структуры диодов

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДИФФУЗИИ

Расчет технологических режимов процесса диффузии для создания транзистора n-p-n-типа обычно проводят в следующем порядке:

1) вычисляют произведение коэффициента диффузии на время  $Dt_2$ , определяющее режим разгонки акцепторной примеси;  $Dt_2 = Dt_{20x} + Dt_{2д}$ , где  $Dt_{20x}$  и  $Dt_{2д}$  соответственно характеризуют разгонку акцепторов в окислительной среде и в процессе одностадийной диффузии донорной примеси для создания эмиттера;

2) находят количество акцепторной примеси  $Q$ , необходимое для формирования базовой области транзистора, и произведение  $Dt_1$ , определяющее процесс загонки акцепторной примеси;

3) определяют произведения  $Dt_д$  и  $Dt_{2д}$ , характеризующие, соответственно, процессы одностадийной диффузии донорной и сопутствующую разгонку акцепторной примесей;

4) вычисляют  $Dt_{20x}$  для разгонки акцепторов в окислительной среде и выбирают конкретные значения температур и длительностей диффузионных процессов;

Окончательное распределение акцепторной примеси в базовой области транзистора соответствует функции Гаусса. Поверхностная концентрация акцепторной примеси (при  $x = 0$ )

$$N_{s2} = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt_2}}.$$

На границе база – коллектор

$$N_{s2} \exp\left(-\frac{x_K^2}{4Dt_2}\right) = N_0,$$

где  $x_K$  – глубина коллекторного перехода,  $N_0$  – концентрация доноров в эпитаксиальном n-слое. Отсюда

$$Dt_2 = \frac{x_K^2}{4 \ln(N_{s2}/N_0)};$$

$$Q = N_{s2} \sqrt{\pi Dt_2}.$$

В процессе загонки количество атомов примеси в слое (на единицу поверхности) определяется соотношением

$$Q = \int_0^{t_1} J(t) dt,$$

где  $t_1$  – время загонки. Плотность потока примеси

$$J(t) = -D \frac{dN}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{DN_{s1}}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2 \Big|_{x=0} = \frac{N_{s1} \sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}}.$$

С учетом этого,

$$Dt_1 = \frac{\pi Q^2}{4N_{S1}^2},$$

где  $N_{S1}$  - поверхностная концентрация акцепторной примеси в процессе загонки.

Произведение  $Dt_d$ , характеризующее процесс одностадийной диффузии донорной примеси для создания эмиттера, вычисляется из условия равенства концентраций донорной и акцепторной примеси на границе эмиттер – база:

$$N_0 + N_{SD} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x_3}{2\sqrt{Dt_d}} \right) = N_{S2} \exp \left( - \frac{x_3^2}{4Dt_2} \right),$$

где  $N_{SD}$  - поверхностная концентрация донорной примеси в эмиттерной области,  $x_3$  - глубина залегания эмиттерного перехода. Сопутствующая разгонка акцепторной примеси определяется произведением  $Dt_{2d}$ , равным  $Dt_d$ . Этап разгонки акцепторов в окислительной среде характеризуется  $Dt_{2ox} = Dt_2 - Dt_{2d}$ .

Конкретные значения температуры и длительности процессов диффузии определяются из найденных произведений  $Dt$  с учетом необходимости точного контроля времени и максимальной температуры диффузионной установки. Влияние температуры на коэффициенты диффузии примесей описывается соотношением:

$$D = D_0 \exp \left( - \frac{W}{kT} \right),$$

где  $D_0$  – константа диффузии (частотный множитель);  $W$  - энергия активации диффузионного процесса, т. е. энергия, необходимая для элементарного скачка атома примеси в кристалле. Свойства некоторых элементов как легирующих примесей кремния приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Свойства некоторых элементов как легирующих примесей кремния

Элемент	Тип примеси	$W$ , эВ	$D$ , см <sup>2</sup> /с при 1200 °С	Предельная растворимость, см <sup>-3</sup> при 1200 °С
B	p	3,66	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{20}$
Al	p	3,77	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{19}$
P	n	3,66	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$10^{21}$
As	n	3,54	$2,7 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{21}$
Sb	n	3,92	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{19}$

Предположим, что требуемое распределение примесей в структуре соответствует рис. 2.2 и характеризуется следующими параметрами:  $x_3 = 2$  мкм;  $x_K = 3$  мкм;  $N_{S1} = 8 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>;  $N_{S2} = 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>;  $N_{SD} = 8 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>;  $N_0 = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Тогда:  $Dt_2 = 4,2 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>;  $Q = 2,3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>;  $Dt_1 = 6,4 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>;  $Dt_d = 1,5 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>  $\approx Dt_{2d}$ ;  $Dt_{2ox} = 2,7 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>. Для загонки бора при  $t = 30$  мин  $T = 950$  °С, для

разгонки бора в окислительной среде при  $t = 60$  мин  $T = 1200$  °С, для диффузии фосфора при  $t = 60$  мин  $T = 1080$  °С.

Рассмотренные уравнения применимы только для оценочных расчетов, т. к. не учитывают всех технологических факторов и особенностей конкретной реализации процесса диффузии. Повысить точность определения режимов, обеспечивающих требуемые концентрационные профили распределения примесей, позволяют эмпирические диаграммы, полученные в условиях конкретного производства.

#### 4 ДИФФУЗИОННЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Резисторы биполярных ИС обычно изготавливают на основе отдельных полупроводниковых слоев транзисторной структуры - эмиттерного, базового, коллекторного, скрытого - или из поликристаллического кремния. Удельное поверхностное сопротивление  $R_s$  диффузионных слоев зависит от параметров диффузионного процесса и может изменяться в следующих пределах: базового - от 100 до 300 Ом/□; базового, ограниченного эмиттерным, - от 5 до 20 кОм/□; скрытого - от 5 до 15 Ом/□; эмиттерного - от 2 до 5 Ом/□.

Нормальная работа диффузионных резисторов (ДР) обеспечивается закрытым состоянием переходов, ограничивающих резистивные слои. Наибольшее распространение получили ДР на основе базового р-слоя (см. рис. 4.1). Для нормальной работы такого резистора на коллекторную область необходимо подать запирающее напряжение  $U_3$ , превышающее напряжение на контактах резистора.

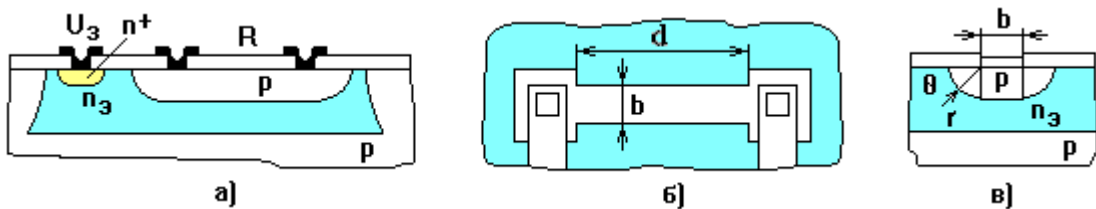


Рисунок 4.1 - Структура (а), топология (б) и поперечное сечение канала (в) диффузионного резистора на основе базового р-слоя

Удельная поверхностная проводимость базового р-слоя

$$G_s = q \int_0^{x_k} \mu_p(N_A) N_A(x) dx,$$

где  $q$  – заряд электрона;  $x_k$  – толщина слоя;  $\mu_p(N_A)$  – зависимость подвижности дырок от концентрации акцепторной примеси;  $N_A(x)$  – зависимость последней от координаты. В диапазоне концентраций  $3 \cdot 10^{15} \leq N_A \leq 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>

$$\ln \mu_p \approx \ln K_p + m \ln N_A,$$

т. е.

$$\mu_p \approx K_p N_A^m,$$



где  $\ln K_p = 15,00$  и  $m = -0,245$ . Подставив выражение  $\mu_p$  и концентрационный профиль  $N_A(x)$  в выражение для  $G_S$ , получим

$$G_S = qK_p N_{S2}^{m+1} \int_0^{x_K} \exp[-(m+1)(x/x_K)^2] dx.$$

Для интегрирования последнего выражения удобно заменить верхний предел  $x_K$  на бесконечность. Как показывают расчеты, такая замена дает ошибку, не превышающую  $1,5 \div 2$  %. Осуществив указанную замену и произведя интегрирование, получим

$$G_S = (qK_p N_{S2}^{m+1} x_K / 2) \sqrt{\pi / (m+1)}.$$

Соответствующее сопротивление слоя

$$R_S = [2 / (qK_p N_{S2}^{m+1} x_K)] \sqrt{(m+1) / \pi}.$$

Проводимость канала ДР на основе базового p-слоя (см. рис. 4.1, в)

$$G = G_{cp} + 2G_6,$$

где  $G_{cp}$  – проводимость средней части (длиной  $d$  и шириной  $b$ );  $G_6$  – проводимость боковых частей (ограниченных четвертью окружности с радиусом  $r = x_K$ ).

Выражения для  $G_6$  имеет вид

$$G_6 = \frac{q}{d} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^{x_K} \mu_p(N) N(r) r dr,$$

где  $\theta$  и  $r$  – координаты точек боковых частей диффузионной области. Произведя интегрирование этого выражения при  $x_K = \infty$ , получим

$$G_6 = q\pi K_p N_{S2}^{m+1} x_K^2 / [4d(m+1)].$$

Сопротивление средней части резистора без учета влияния боковых частей

$$R_{cp} = R_S d / b.$$

Боковые части можно учесть введя эффективную ширину ДР  $b_{эфф} = b + 2\Delta b_6$ . При этом

$$R = R_S d / b_{эфф} = R_S d / (b + 2\Delta b_6).$$

Подставив в последнюю формулу выражения  $G_S$  и  $G_6$ , получим

$$\Delta b_6 = (x_K / 2) \sqrt{\pi(m+1)} = 1,02x_K.$$

ДР с сопротивлением  $500 \div 1000$  Ом имеют прямолинейную конфигурацию, а с сопротивлением более 1 кОм – конфигурацию с изломами (рис. 4.2, а); при этом могут использоваться контакты, показанные на рис. 4.2, а, б. При большом сопротивлении ДР применяется зигзагообразная структура с числом изломов  $n \gg 1$ . ДР с сопротивлением  $50 \div 500$  Ом обычно имеет прямолинейную конфигурацию с контактами, показанными на рис. 4.2, в.

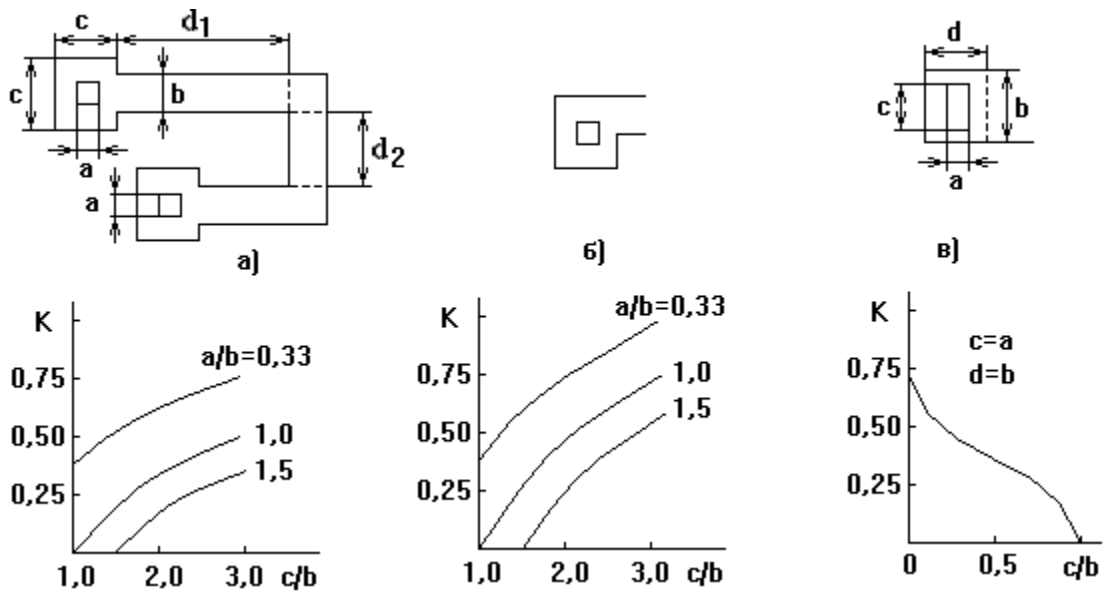


Рис. 4.2. Топология ДР зигзагообразной формы (а), несимметричной (б) и симметричной (в) контактных площадок и соответствующие зависимости коэффициента  $K$  от размеров этих площадок

В общем случае сопротивление резистора

$$R = R_s \left( \sum_{i=1}^{n+1} d_i / b_{\text{эфф}} + 0,55n + K_1 + K_2 \right).$$

где  $n$  – число изломов;  $0,55$  – эквивалентное число квадратов, определяющее сопротивление области излома – квадрата со стороной  $b$ ;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты, зависящие от формы и размеров контактных площадок - первой и второй.

## 5 ДИФФУЗИОННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Удельная барьерная емкость р-п перехода

$$C_0(U) = C_0(0)(1 - U/\Delta\phi_0)^{-1/n},$$

где  $U$  - напряжение на переходе;  $C_0(0)$  – удельная барьерная емкость перехода при  $U = 0$ ;  $\Delta\phi_0$  – контактная разность потенциалов;  $n$  – постоянная величина.

Для ступенчатого перехода  $n = 2$ ,

$$C_0(0) = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 N_A N_D}{2\Delta\phi_0(N_A + N_D)}},$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $N_A$ ,  $N_D$  – концентрации акцепторов и доноров в р и п областях.

В случае плавного р-п перехода с линейным распределением концентрации примесей в слое пространственного заряда  $n = 3$ ,

$$C_0(0) = \sqrt[3]{\frac{q\epsilon^2\epsilon_0^2 a}{12\Delta\phi_0}},$$

где  $a$  – градиент концентрации примесей (в  $\text{см}^{-4}$ ) в плоскости технологической границы перехода.

Для реальных переходов  $2 < n < 3$ ; значения  $n$  и  $C_0(0)$  при известном распределении примесей можно найти из решения уравнения Пуассона численными методами. Величина  $\Delta\phi_0$  определяется выражением

$$\Delta\phi_0 = \phi_T \ln(N_{\text{АГр}} N_{\text{ДГр}} / n_i^2),$$

где  $N_{\text{АГр}}$ ,  $N_{\text{ДГр}}$  – концентрации акцепторов и доноров на границах слоя пространственного заряда с нейтральным объемом в  $p$  и  $n$  областях при напряжении  $U = 0$ ;  $\phi_T = kT/q$  – температурный потенциал;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура, К;  $q$  – заряд электрона;  $n_i$  – концентрация собственных носителей заряда.

Из формулы для  $C_0(U)$  следует, что при  $U = \Delta\phi_0$  барьерная емкость обращается в бесконечность. На практике, конечно же, этого не происходит, поэтому при оценке  $C_0(\Delta\phi_0)$  либо используются завышенные значения  $\Delta\phi_0$  в формуле для  $C_0(U)$ , либо применяется полуэмпирическая формула

$$C_0(U) = \frac{C_0(0)}{[(1 - U/\Delta\phi_0)^2 + b]^{1/2n}} \left\{ 1 + \frac{b}{(n-1)[(1 - U/\Delta\phi_0)^2 + b]} \right\},$$

где  $b \ll 1$  – подстроечный параметр. Из анализа последней формулы следует, что при  $U = \Delta\phi_0$  барьерная емкость достигает максимума:

$$C_0(\Delta\phi_0) = nC_0(0) / [(n-1)b^{1/2n}].$$

При  $U > \Delta\phi_0$  влиянием барьерной емкости можно пренебречь, поскольку определяющую роль начинает играть диффузионная емкость.

Для планарного эмиттерного перехода характерно существенное превышение удельной емкости боковой поверхности  $C_{\text{эоб}}$  над удельной емкостью донной части  $C_{\text{эод}}$ : обычно  $C_{\text{эоб}} = (2 \div 3)C_{\text{эод}}$ ;  $C_{\text{эод}} = 250 \div 900$  пФ/мм<sup>2</sup> (при напряжении на переходе  $U = 0$ ). Для коллекторного перехода  $C_{\text{коб}} \approx C_{\text{код}} = 100 \div 400$  пФ/мм<sup>2</sup>. Донная часть изолирующего перехода образована в эпитаксиальном слое, боковая получена при проведении изолирующей диффузии. Для донной части изолирующего перехода удельная емкость равна  $90 \div 100$  пФ/мм<sup>2</sup>, для боковой –  $90 \div 320$  пФ/мм<sup>2</sup>.

На рис. 5.1 показана структура конденсатора на основе коллекторного и эмиттерного  $p$ - $n$  переходов, включенных параллельно, (а) и его эквивалентная схема (б):  $L_1$ ,  $L_2$  – длины окон под базовую и разделительную диффузию;  $C_{\text{э}}$ ,  $C_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{п}}$  – емкость эмиттерного, коллекторного и паразитного изолирующего переходов;  $VD_{\text{э}}$ ,  $VD_{\text{к}}$ ,  $VD_{\text{п}}$  – соответствующие диоды;  $R_{\text{кк}}$  – результирующее последовательное сопротивление коллекторной области.

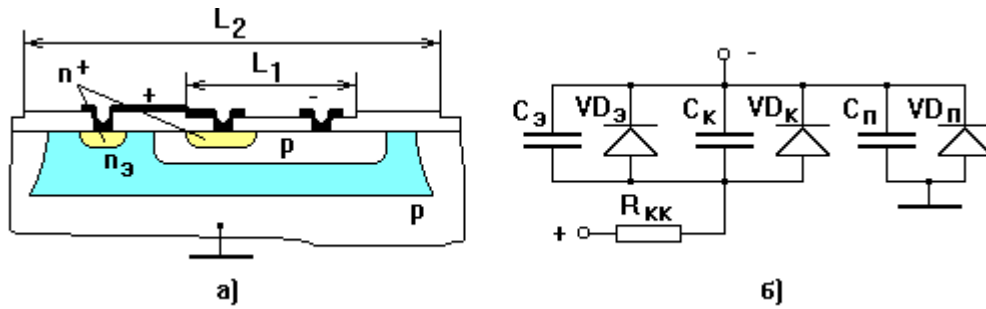


Рисунок 5.1 - Структура конденсатора на основе коллекторного и эмиттерного p-n переходов, включенных параллельно, (а) и его эквивалентная схема (б)

Роль паразитной емкости оценивается отношением  $C/C_{\Pi}$ , которое должно быть как можно больше. Обычно  $C/C_{\Pi} \leq 7 \div 10$ . Для получения максимального отношения  $C/C_{\Pi}$  необходимо обеспечивать максимальное обратное смещение изолирующего p-n перехода.

При заданной удельной емкости емкость перехода однозначно определяется его площадью. В большинстве случаев в качестве диффузионного конденсатора используется коллекторный переход, имеющий максимальное напряжение пробоя. Площадь прямоугольного конденсатора с длиной и шириной окна под базовую диффузию  $L_1$  и  $L'_1$  и глубиной залегания перехода  $x_k$  определяется как

$$A_K = A_{KD} + A_{KB} = L_1 L'_1 + \pi x_k (L_1 + L'_1) + 2\pi x_k^2,$$

где  $A_{KD}$  и  $A_{KB}$  – площади донной и боковой поверхности коллекторного перехода.

Полная площадь прямоугольного изолирующего перехода

$$A_{Из} = A_{Изд} + A_{Изб} = L_2 L'_2 + \pi d_3 (L_2 + L'_2) - 8d_3^2,$$

где  $A_{Изд}$  и  $A_{Изб}$  – площади донной и боковой поверхности;  $L_2$  и  $L'_2$  - стороны окна под изолирующую диффузию;  $d_3$  - толщина эпитаксиального слоя (глубина залегания изолирующего перехода).

При стороне окна больше 400 мкм ошибка от замены полной площади перехода площадью основания не превышает 5 %.

## 6 РАСЧЕТ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕХОДОВ

Пробой коллекторного перехода транзистора определяется лавинным умножением, которое происходит при напряженности электрического поля  $E_{\max} = 3 \cdot 10^5$  В/см. Численное решение уравнения Пуассона позволяет определить напряжение пробоя  $U_{\text{проб}}$  при известном распределении примесей. Искривления перехода на его границах вызывают увеличение в этих местах напряженности поля по сравнению с плоской частью. Поэтому пробой планарных переходов происходит по периферии, вызывая некоторое уменьшение  $U_{\text{проб}}$  по сравнению со значением, полученным для плоской части.

Периферию перехода обычно представляют четвертью окружности с радиусом  $r$ , равным глубине залегания перехода. Влияние периферийных частей уменьшается при увеличении концентрации примеси в исходном материале. Кроме того,  $U_{\text{проб}}$  плавного перехода будет меньше, чем ступенчатого при  $r = \infty$ . Типичные значения напряжения пробоя эмиттерного, коллекторного и изолирующего переходов составляют  $6 \div 9$ ,  $10 \div 90$  и  $15 \div 100$  В соответственно.

Для оценок пробивного напряжения  $U_{\text{проб}}$  плавного p-n – перехода в кремнии используется соотношение

$$U_{\text{проб}} = 4,57 \cdot 10^8 \cdot a^{-1/3},$$

где  $a$  – градиент концентрации примеси в p-n – переходе в  $\text{см}^{-4}$ .

Для резких ступенчатых p<sup>+</sup>-n – переходов

$$U_{\text{проб}} = 86 \cdot \rho_n^{0,64},$$

для переходов p-n<sup>+</sup>

$$U_{\text{проб}} = 23 \cdot \rho_p^{0,75},$$

где  $\rho_n$  и  $\rho_p$  – удельное сопротивление n- и p-областей в Ом·см.

## 7 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является ИС К122УД1А (аналоговый операционный усилитель). На рис. 7.1 представлена схема электрическая принципиальная ИС, на рис. 7.2 – микрофотография кристалла.

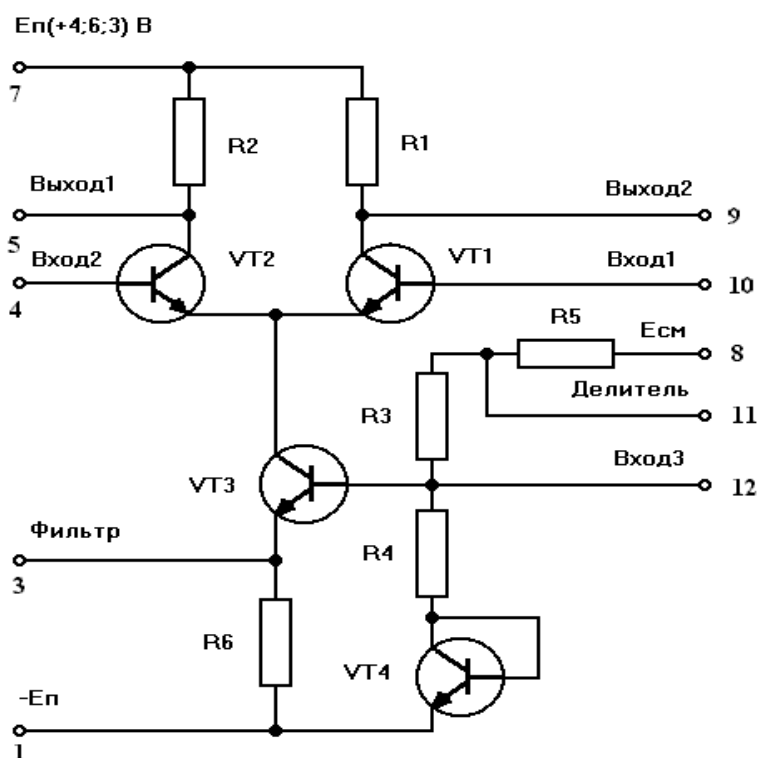


Рисунок 7.1 – Схема электрическая принципиальная ИС К122УД1А

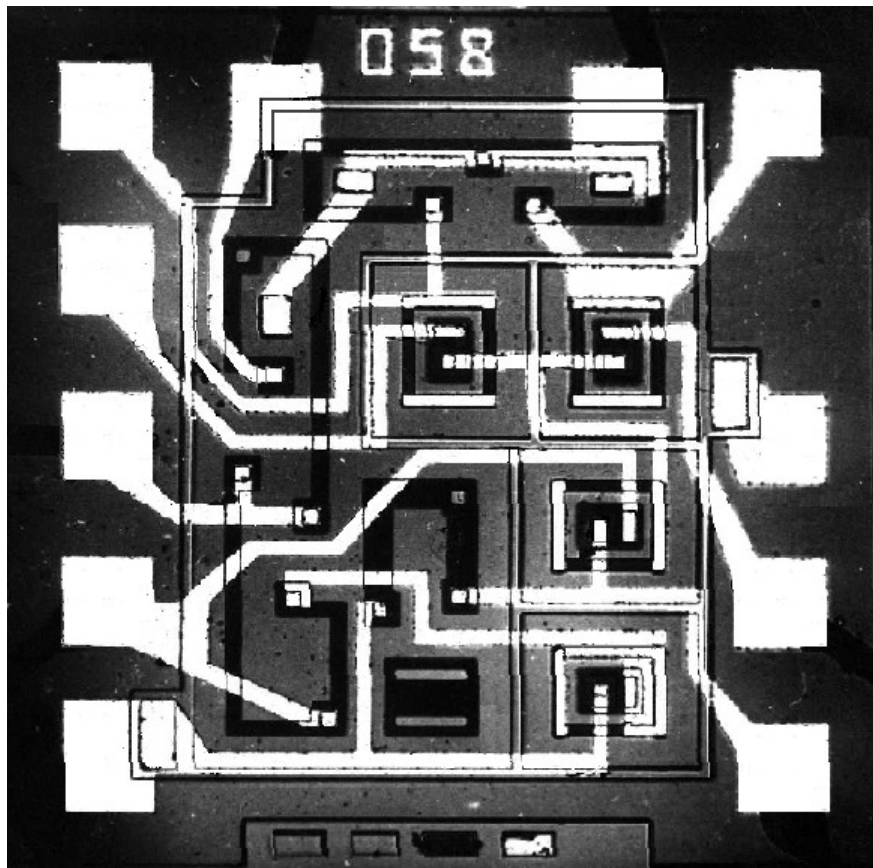


Рисунок 7.2 – Микрофотография ИС К122УД1А

## 8 ЗАДАНИЕ

8.1 По микрофотографии и образцу изучить конструкцию ИС К122УД1А и назначение каждого элемента. Определить какие элементы ИС изготавливаются одновременно.

8.2 Составить топологический чертеж резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  (см. рис. 7.1 и 7.2). Измерить топологические размеры и сопротивление резисторов. Определить  $R_s$ .<sup>1</sup>

8.3 Рассчитать среднюю величину объемного сопротивления диффузионного слоя базы и определить поверхностную концентрацию примеси. Глубина залегания коллекторного перехода задается преподавателем.

8.4 Рассчитать и построить диффузионный профиль базового слоя, определить режим диффузии. Концентрацию примеси в эпитаксиальном n-слое принять  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В качестве акцепторной примеси использован бор.

8.5 Рассчитать и построить диффузионный профиль эмиттерного слоя, определить режим диффузии. Ширину базы транзистора принять равной 0,8 мкм. В качестве донорной примеси использован фосфор.

8.6 Рассчитать пробивные напряжения и удельные емкости p-n – переходов. Распределение эффективной концентрации примеси в p-n – переходах считать линейным.

<sup>1</sup> Расчеты целесообразно проводить в системе MathCad.

8.7 Составить топологический чертеж транзистора. Рассчитать зарядовые емкости эмиттера, коллектора и оценить емкость изолирующего перехода.

8.8 Составить схему технологического процесса изготовления ИС с указанием оборудования и режимов.

## 9 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

9.1 Что такое степень интеграции ИС?

9.2 Назовите способы изоляции элементов ИС.

9.3 Для чего в ИС точка схемы, имеющая самый большой отрицательный потенциал, соединяется с подложкой р-типа, а точка, имеющая самый большой положительный потенциал, соединяется с эпитаксиальным слоем n-типа?

9.4 В чем суть эпитаксиально–планарной технологии ИС.

9.5 Что такое «базовый кристалл»?

9.6 Почему в некоторых ИС имеются не задействованные элементы?

9.7 Что такое двухстадийная диффузия?

9.8 Что такое «загонка» и «разгонка»?

9.9 В каком случае диффузионный профиль соответствует закону дополнения функции ошибок?

9.10 В каком случае диффузионный профиль соответствует распределению Гаусса?

9.11 Для чего нужен скрытый  $n^+$ -слой?

9.12 Назовите структуры диодов в ИС.

9.13 Назовите структуры резисторов ИС и дайте их краткую характеристику.

9.14 Какие паразитные связи имеет диффузионный резистор?

9.15 Назовите структуры конденсаторов в ИС и дайте их краткую характеристику.

9.16 Что происходит при пробое коллекторного перехода транзистора?

## 10 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

10.1 Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. - М.: Радио и связь, 1992. - 320 с.

10.2 Романовский М.Н. Интегральные устройства радиоэлектроники. Часть 1. Основные структуры полупроводниковых интегральных схем. Учебное пособие для вузов. - Томск: изд-во ТУСУР, 2007. - 123 с.

10.3 Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. - М.: Радио и связь, 1987. - 464 с.