

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

**А.А. Жигальский**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ  
БАЗЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И  
МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

Учебно-методическое пособие  
по практическим занятиям и самостоятельной работе студентов

**Томск  
2025**

УДК 621.382.049.77.002(075.8)

ББК 32.844я73

Ж68

**Рецензент:**

**Троян Павел Ефимович,**

доктор технических наук, профессор кафедры физическая  
электроника ФГАОУ ВО «Томский государственный  
университет систем управления и радиоэлектроники»

**Жигальский, Александр Анатольевич**

Ж68 Проектирование электронной компонентной базы  
микроэлектроники и микросистемной техники: Учебно-  
методическое по практическим занятиям и самостоятельной  
работе студентов / А.А. Жигальский. - Томск: Томск. гос. ун-т  
систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 40 с.

Пособие содержит методические указания и примеры решения  
типовых задач по темам курса «Проектирование электронной  
компонентной базы микроэлектроники и микросистемной техники»,  
варианты контрольных работ и индивидуальных заданий. Пособие  
является руководством для проведения практических занятий и  
самостоятельной работы студентов по дисциплине «Проектирование  
электронной компонентной базы микроэлектроники и микросистемной  
техники» и предназначено для студентов, обучающихся по  
образовательным программам подготовки бакалавров, магистров и  
дипломированных специалистов всех форм обучения.

Предназначено для студентов высших учебных заведений  
технических специальностей.

**УДК 621.382.049.77.002(075.8)**

**ББК 32.844я73**

Одобрено на заседании кафедры физической  
электроники протокол №162 от 07.11.2024 года

© Жигальский А.А., 2025

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРИМЕРЫ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ КУРСА .....	4
1.1 Методические указания .....	4
1.2 Примеры решения задач .....	5
2 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ .....	25
3 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА .....	30
4 ЛИТЕРАТУРА .....	40

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методическое пособие предназначено для самостоятельной работы по дисциплине «Проектирование электронной компонентной базы микроэлектроники и микросистемной техники». Пособие содержит примеры решения типовых задач по темам курса и варианты контрольной работы №1.

## **1 ПРИМЕРЫ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ КУРСА**

### **1.1 Методические указания**

В данном разделе приведены примеры решения задач по нескольким основным темам курса: «расчет конструкций элементов тонкопленочных ГИС», «обеспечение тепловых режимов работы ИМС», «интегральные резисторы», «интегральные микросхемы на МДП-транзисторах». Для более успешного освоения материала при рассмотрении примеров решения задач необходимо обращаться к соответствующим разделам учебного пособия, т. к. некоторые параметры материалов и физические величины, используемые в примерах, объясняются и анализируются в изложении теоретического материала.

Перед решением задачи, включенной в контрольную работу или экзаменационный билет, необходимо определить какому разделу изучаемой дисциплины она соответствует. Далее следует внимательно проанализировать задачу и установить известные и неизвестные величины, единицы измерения величин и формулы, которые необходимо применить для решения задачи. После получения ответа рекомендуется проанализировать его с точки зрения соответствия полученного числа искомой физической величине, чтобы избежать заведомо ошибочных ответов.

Контрольная работа №1 содержит задачи по разделам изучаемого курса: «конструктивный расчет тонкопленочных резисторов», «тонкопленочные конденсаторы», «обеспечение тепловых режимов работы ИМС». Контрольная работа №1 состоит из трех задач, сформулированных в общем виде.

Численные значения параметров для каждого варианта приведены в таблицах 2.1 – 2.4.

Контрольная работа №2 содержит задания из разделов конструирования элементов и топологии полупроводниковых ИМС и выполнена в виде тестовых задач.

## 1.2 Примеры решения задач

### Пример 1

Рассчитать тонкопленочный резистор:  $R=1$  кОм,  $P=35$  мВт,  $\gamma_R=17\%$ ,  $T_{max}=60$  °С. При изготовлении используется метод фотолитографии. Шаг координатной сетки 1 мм, масштаб 20:1.

Резистивная пленка – хром с параметрами:  $\rho_s=500$  Ом/□,  $P_0=1$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\alpha_R=0,6 \cdot 10^{-4}$  1/°С.

### Решение.

Определим конструкцию резистора по значению коэффициента формы:

$$K_\phi = \frac{R}{\rho_s} = \frac{1000}{500} = 2.$$

Поскольку  $1 \leq K_\phi \leq 10$ , будем проектировать резистор прямоугольной формы (рис.1) и расчет начинать с определения ширины.

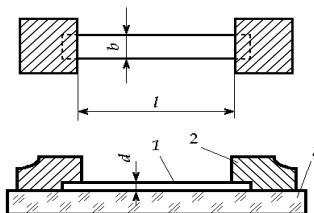


Рис. 1 - Тонкопленочный резистор:

1 - резистивная пленка; 2 - контактная пленка проводящего материала; 3 - подложка.

Ширину резистора выбирают из условия:

$$b \geq \max \{b_p, b_{точн}, b_{техн}\}$$

где  $b_p$  – минимальная ширина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$b_p = \sqrt{\frac{\rho_s \cdot P}{R \cdot P_0}} = \sqrt{\frac{500 \cdot 35 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 1}} = 1,32 \cdot 10^{-1} \text{ м} = 1320 \text{ мкм},$$

где  $b_{\text{точн}}$  – минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K\phi}}{\gamma_{\kappa\phi}}$$

где  $\Delta b$ ,  $\Delta l$  – точность воспроизведения геометрии резисторов ( $\Delta b = \Delta l = 10$  мкм для метода фотолитографии);

$$\gamma_{\kappa\phi} = \gamma_R - (\gamma_{\rho_s} + \gamma_t + \gamma_{R_{\text{СТ}}} + \gamma_{\rho_k}),$$

В нашем случае

$$\gamma_t = \alpha_R \cdot (T_{\text{max}} - 20) = 0,6 \cdot 10^{-4} \cdot 40 = 0,0024.$$

Поскольку значения погрешностей воспроизведения удельного поверхностного сопротивления  $\gamma_{\rho_s}$ , старения пленки  $\gamma_{R_{\text{СТ}}}$  и переходных сопротивлений контактов  $\gamma_{R_k}$  точно не заданы, возьмем следующие абсолютные значения этих погрешностей:

$$\gamma_{\rho_s} = 0,04, \quad \gamma_{R_{\text{СТ}}} = 0,03, \quad \gamma_{\rho_k} = 0,02.$$

Тогда

$$\gamma_{\kappa\phi} = 0,17 - (0,04 + 0,0024 + 0,03 + 0,02) = 0,0776;$$

$$b_{\text{точн}} = \frac{10^{-5} + \frac{10^{-5}}{2}}{0,0776} = 1,93 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 193 \text{ мкм},$$

где  $b_{\text{техн}}$  – минимальная ширина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования конфигурации (для метода фотолитографии  $b_{\text{техн}} = 100$  мкм).

Таким образом, ширина резистора составит:

$$b \geq \max\{1320, 193, 100\} = 1320 \text{ мкм} = 1,32 \text{ мм}.$$

С учетом шага координатной сетки округлим это значение до величины 1,35 мм.

Так как коэффициент формы равен  $K_\phi = \frac{l}{b}$ , то отсюда найдём длину тонкоплёночного резистора:

$$l = K_\phi \cdot b = 2 \cdot 1,35 \text{ мм} = 2,7 \text{ мм}.$$

Определяем полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок:

$$l_{\text{полн}} = l + 2 \cdot e,$$

где  $e = 0,2 \text{ мм}$  (минимально допустимое расстояние между краем плёночного резистора и краем его контактной площадки),

$$l_{\text{полн}} = 2,7 + 2 \cdot 0,2 = 3,1 \text{ мм}.$$

Тогда площадь, занимаемая резистором на подложке, составит:

$$S = l_{\text{полн}} \cdot b = 3,1 \cdot 1,35 = 4,185 \text{ мм}^2.$$

Ответ: в результате расчёта получили следующую геометрию тонкоплёночного резистора:

$$b = 1,35 \text{ мм}, l = 3,1 \text{ мм}, S = 4,185 \text{ мм}^2.$$

### *Пример 2*

Рассчитать тонкопленочный конденсатор:  $C = 4000 \text{ пФ}$ ;  $\gamma_C = 20\%$ ;  $U_{\text{раб}} = 25 \text{ В}$ ;  $T_{\text{max}} = 75 \text{ °C}$ ;  $f = 0,1 \text{ МГц}$ . При изготовлении используется метод фотолитографии. Шаг координатной сетки  $1 \text{ мм}$ , масштаб  $20:1$ .

В качестве диэлектрика выбираем  $Ta_2O_5$  со следующими параметрами:  $\epsilon = 23$ ;  $\alpha_C = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/°C}$ ;  $E_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ ;  $\text{tg}\delta_o = 0,02$ . В качестве обкладок выбираем алюминий со следующими параметрами  $\rho_s = 0,2 \text{ Ом/□}$ .

### *Решение.*

Поскольку конденсатор имеет значительную емкость, выбираем тип, изображенный на рис.2.

Определим толщину диэлектрика исходя из условия минимальной толщины диэлектрика:

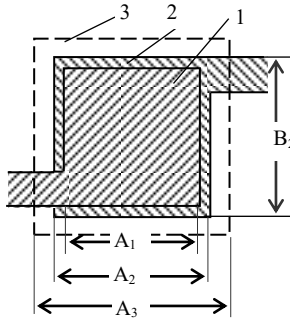


Рис.2 - Конструкция тонкопленочного конденсатора:  
1- верхняя обкладка; 2- нижняя обкладка; 3 – диэлектрик.

$$d \geq \frac{U_{\text{раб}} K_3}{E_{\text{пр}}}.$$

Пусть коэффициент запаса  $K_3=3$ , тогда

$$d = \frac{U_{\text{раб}} K_3}{E_{\text{пр}}} = \frac{25 \cdot 3}{2 \cdot 10^6} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ см} \approx 0,38 \text{ мкм}.$$

Далее рассчитаем максимально допустимую относительную погрешность воспроизведения площади конденсатора:

$$\gamma_{S_{\text{доп}}} = \gamma_C - \gamma_{C_0} - \gamma_{C_t} - \gamma_{C_{\text{ст}}},$$

где  $\gamma_{C_0}$  - погрешность воспроизведения удельной емкости;  $\gamma_{C_t}$  - температурная погрешность емкости;  $\gamma_{C_{\text{ст}}}$  - погрешность, обусловленная старением конденсатора.

В нашем случае примем

$$\gamma_{C_0} = 0,06;$$

$$\gamma_t = \alpha_C \cdot \Delta T = 4 \cdot 10^{-4} \cdot (75 - 20) = 0,022;$$

$$\gamma_{C_{\text{ст}}} = 0,03.$$

Тогда

$$\gamma_{S_{\text{доп}}} = \gamma_C - \gamma_{C_0} - \gamma_t - \gamma_{C_{\text{ст}}} = 0,2 - 0,06 - 0,022 - 0,03 = 0,088.$$

Оценим удельную ёмкость материала диэлектрика по формулам:



$$C_0^I = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d} = \frac{23 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{0,38 \cdot 10^{-6}} = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}^2.$$

$$C_0^{II} = C \cdot \left( \frac{\gamma_{S_{\text{доп}}}}{\Delta S} \right)^2 \cdot \frac{K_{\Phi}}{(1 + K_{\Phi})^2} =$$

$$= 4000 \cdot 10^{-12} \cdot \left( \frac{0,08}{10 \cdot 10^{-6}} \right)^2 \cdot \frac{1}{4} = 7,7 \cdot 10^{-2} \text{ Ф/м}^2,$$

где  $\Delta S$ -абсолютная погрешность воспроизведения размеров конденсатора,  $\Delta S = 0,001 \text{ см}$ ;  $K_{\Phi} = A/B$  - коэффициент формы.

Окончательное значение удельной ёмкости выбирается из условия:

$$C_0 = \min \{ C_0^I; C_0^{II} \}$$

Таким образом, значение удельной ёмкости составит  $C_0 = 540 \text{ мкФ/м}^2$ .

Из соотношения  $S_B = \frac{C}{C_0}$  определим активную площадь

верхней обкладки конденсатора:

$$S_B = \frac{C}{C_0} = \frac{4000 \cdot 10^{-12}}{540 \cdot 10^{-6}} = 7,84 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2.$$

Геометрические размеры конденсатора рассчитаем по следующим формулам:

1) верхней обкладки

$$A_1 = B_1 = \sqrt{S_B} = \sqrt{7,4 \cdot 10^{-2}} = 0,272 \text{ см} = 2,72 \text{ мм}.$$

2) нижней обкладки

$$A_2 = A_1 + \eta,$$

$$B_2 = B_1 + \eta,$$

где  $\eta$ - погрешность установки и совмещения масок.

Примем за величину  $\eta$  значение  $0,1 - 0,2 \text{ мм}$ .

Тогда

$$A_2 = A_1 + \eta = 2,72 + 0,2 = 2,92 \text{ мм};$$

$$B_2 = B_1 + \eta = 2,72 + 0,2 = 2,92 \text{ мм}.$$

3) диэлектрика

$$A_3 = A_2 + \eta = 2,92 + 0,2 = 3,12 \text{ мм};$$

$$B_3 = B_2 + \eta = 2,92 + 0,2 = 3,12 \text{ мм}.$$

Добротность рассчитанного конденсатора:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_{\Sigma}},$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\Sigma} = \operatorname{tg} \delta_d + \operatorname{tg} \delta_{об},$$

$$\operatorname{tg} \delta_{об} = 2\pi \cdot f \cdot R_{об} \cdot C,$$

$$R_{об} = \frac{2}{3} \cdot \rho_s \cdot K_{\phi} = \frac{0,2 \cdot 2}{3} = 0,133 \text{ Ом},$$

$$\operatorname{tg} \delta_{об} = 2 \cdot 3,141 \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,133 \cdot 4000 \cdot 10^{-12} = 0,00033,$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\Sigma} = 0,02 + 0,00033 = 0,02033,$$

$$Q = \frac{1}{0,02033} \approx 49.$$

Определяем мощность потерь в диэлектрике на высокой частоте:

$$P = 2\pi \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta_d \cdot C \cdot U_P^2 =$$

$$= 2\pi \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,020 \cdot 4000 \cdot 10^{-12} \cdot 25^2 = 31 \text{ мВт}.$$

Ответ: в результате расчёта получили следующую геометрию тонкоплёночного конденсатора:

$$A_1 = B_1 = 2,72 \text{ мм},$$

$$A_2 = B_2 = 2,92 \text{ мм},$$

$$A_3 = B_3 = 3,12 \text{ мм}.$$

### Пример 3

Рассчитать катушку индуктивности, если известно, что  $L=0,12 \text{ мкГн}$ ,  $f=70 \text{ МГц}$ ,  $Q=100$ ,  $D_{\text{нар}}=4 \text{ мм}$ . Материал для катушки - алюминий с параметрами:  $\rho_{Al}=2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

*Решение:*

Общий вид проектируемой катушки индуктивности изображён на рисунке 3.

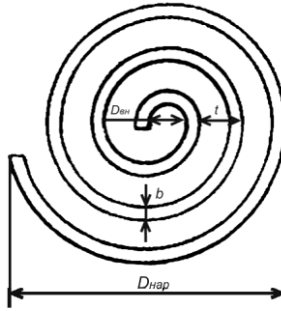


Рис.3 – Конструкция тонкопленочной катушки индуктивности

Определим толщину проводящей плёнки по следующей формуле:

$$h = (2 \div 4) \cdot k_1 \cdot \sqrt{\lambda},$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от материала плёнки;

$\lambda$  – длина волны, см;

$h$  – толщина проводящей плёнки, мкм.

Найдём длину электромагнитной волны исходя из соотношения:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,

$f$  – частота электромагнитных волн, Гц.

$$\text{Отсюда } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{70 \cdot 10^6} \approx 4,29 \text{ м.}$$

Так как для алюминия  $k_1 = 0,51$ , то толщина проводящей плёнки:

$$h = 3 \cdot k_1 \cdot \sqrt{\lambda} = 3 \cdot 0,51 \cdot \sqrt{429} \approx 32 \text{ мкм.}$$

Типичное значение внутреннего диаметра катушки составляет  $D_{\text{вн}} = 0,5$  мм.

Тогда коэффициент  $k$ , необходимый для расчета катушки определяется:

$$k = 0,05 \cdot \left( \frac{D_{\text{нар}}}{D_{\text{вн}}} - 3 \right) = 0,05 \cdot \left( \frac{4}{0,5} - 3 \right) = 0,25.$$

Найдём шаг спирали катушки индуктивности по следующей формуле:

$$t = k \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{вн}}^3}{L}} = 0,25 \cdot \sqrt{\frac{(0,5)^3}{0,12}} \approx 0,25 \text{ мм.}$$

Определим число витков катушки индуктивности по формуле:

$$N = \frac{D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}}{2 \cdot t} = \frac{4 - 0,5}{2 \cdot 0,25} = 7.$$

Найдём ширину проводящей плёнки катушки индуктивности по следующей формуле ( $h$ ,  $D_{\text{вн}}$ ,  $D_{\text{нар}}$  в мм):

$$b_0 = \frac{\rho \cdot t \cdot \left( \left( \frac{D_{\text{нар}}}{D_{\text{вн}}} \right)^2 - 1 \right) \cdot Q}{16 \cdot f \cdot D_{\text{вн}} \cdot k^2 \cdot h} =$$

$$= \frac{2,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,25 \cdot \left( \left( \frac{4}{0,5} \right)^2 - 1 \right) \cdot 100}{16 \cdot 70 \cdot 0,5 \cdot (0,25)^2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}} \approx 0,04 \text{ мм,}$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала пленки, Ом·мм;  $f$  - рабочая частота, МГц.

С учетом скин-эффекта ширина проводящей пленки уточняется по формуле

$$b = (1,5 \div 2) \cdot b_0 = 2 \cdot 0,04 = 0,08 \text{ мм.}$$

В расчетах также необходимо учитывать разрешающую способность выбранного технологического метода получения катушки индуктивности.

Ответ: в результате расчёта получили следующие параметры тонкоплёночной катушки индуктивности:

$$h = 32 \text{ мкм}; t = 0,25 \text{ мм}; b = 80 \text{ мкм}; N = 7.$$

*Пример 4*

Провести ориентировочный расчет теплового режима ГИМС. Исходные данные: подложка – ситалл СТ-33-1 толщиной  $h_{\text{под}} = 1,6$  мм,  $\lambda_{\text{под}} = 1,5$  Вт/(°С·м). Соединение подложки и основания металlostеклянного корпуса осуществляется клеем толщиной  $h_{\text{кл}} = 0,1$  мм,  $\lambda_{\text{кл}} = 0,3$  Вт/(°С·м). Размер контакта  $15 \times 7$  мм. Мощность выделяемая микросхемой 120 мВт, максимальная температура окружающей среды  $T_{\text{max}} = 75$  °С. Параметры тепловыделяющих элементов занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Элемент	Исходные данные			Расчетные данные			
	$l$ , мм	$b$ , мм	$P_{\text{Э}} \cdot 10^{-3}$ , Вт	$r$	$q$	$\gamma(r, q)$	$R_{\text{Т.ЭФФ}}$
$R_1$	1	0,3	18	0,09	0,31	0,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$
$R_2$	1,7	0,5	35	0,15	0,53	0,22	$3,1 \cdot 10^{-4}$
$R_3$	2,4	1,0	60	0,31	0,75	0,4	$5,6 \cdot 10^{-4}$
КТ319А	1,3	1,3	15	0,41	0,41	0,36	$5,1 \cdot 10^{-4}$

*Решение:*

Рассчитаем параметры  $r$  и  $q$  для каждого тепловыделяющего элемента по формулам:

$$r = \frac{b}{2 \cdot h}, \quad q = \frac{l}{2 \cdot h},$$

$$h = h_{\text{под}} + h_{\text{кл}} = 1,6 + 0,1 = 1,7 \text{ мм.}$$

По значениям рассчитанных параметров найдём значения функции  $\gamma(r, q)$  (рис.4), полученные данные подставляем в таблицу 2.

Рассчитаем тепловое сопротивление системы “подложка – корпус”  $R_T$  по следующей формуле:

$$R_T = \frac{h_{\text{под}}}{\lambda_{\text{под}}} + \frac{h_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{1,5} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 1,4 \cdot 10^{-3} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

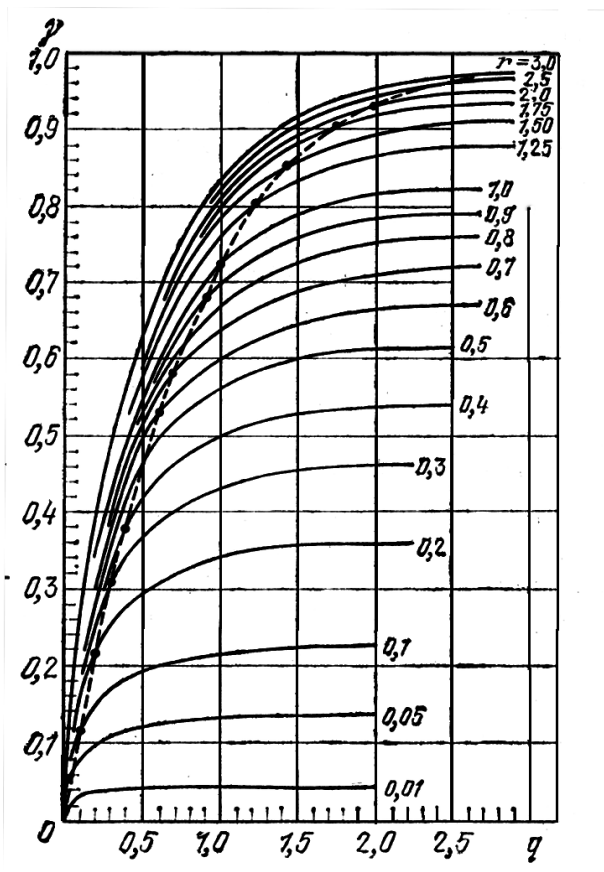


Рис. 4.4 – Значение  $\gamma$ -функции для  $q \leq 3,0$ ,  $r \leq 3,0$

Рассчитаем значения эффективного теплового сопротивления  $R_{T_{\text{эфф}}}$  для каждого элемента по формуле:

$$R_{T_{\text{эфф}}} = R_T \cdot \gamma(r, q),$$

Расчетные данные подставляем в табл.1

Для резисторов максимально допустимая температура  $T_{\text{доп. max}} = 120^\circ \text{C}$ .

Рассчитаем температуру резисторов по следующей формуле:

$$T_R = P_R \cdot \frac{R_{T_{\text{эфф}}}}{S_R} + P_0 \cdot \frac{R_T}{S_0} + T_{\text{окр. ср}},$$

где  $P_R$  - мощность выделяемая резистором;  $R_{T_{эфф}}$  - эффективное тепловое сопротивление;  $S_R$  - площадь резистора ( $S_R = l \cdot b$ );  $P_0$  - суммарная мощность, выделяемая микросхемой;  $R_T$  - тепловое сопротивление системы “подложка – корпус”;  $S_0$  - площадь контакта;  $T_{окр.ср}$  - температура окружающей среды.

Тогда

$$\begin{aligned}
 T_{R1} &= P_{R1} \cdot \frac{R_{T_{эфф1}}}{S_{R1}} + P_0 \cdot \frac{R_T}{S_0} + T_{окр.ср} = \\
 &= 18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{(1,0,3) \cdot 10^{-6}} + 120 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{(15 \cdot 7) \cdot 10^{-6}} + 75 = 85 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 T_{R2} &= P_{R2} \cdot \frac{R_{T_{эфф2}}}{S_{R2}} + P_0 \cdot \frac{R_T}{S_0} + T_{окр.ср} = 35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3,1 \cdot 10^{-4}}{(1,7 \cdot 0,5) \cdot 10^{-6}} + \\
 &+ 120 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{(15 \cdot 7) \cdot 10^{-6}} + 75 = 89,36 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 T_{R3} &= P_{R3} \cdot \frac{R_{T_{эфф3}}}{S_{R3}} + P_0 \cdot \frac{R_T}{S_0} + T_{окр.ср} = 60 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{5,6 \cdot 10^{-4}}{(2,4 \cdot 1,0) \cdot 10^{-6}} + \\
 &+ 120 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{(15 \cdot 7) \cdot 10^{-6}} + 75 = 90,6 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Рассчитаем температуру транзистора по следующей формуле:

$$T_{Э,VT} = P_{VT} \cdot \left( R_{T_{вн}} + \frac{R_{T_{эфф}}}{S_{VT}} \right) + P_0 \cdot \frac{R_T}{S_0} + T_{окр.ср},$$

где  $P_{VT}$  - мощность выделяемая транзистором;  $S_{VT}$  - площадь транзистора ( $S_{VT} = l \cdot b$ );  $R_{T_{вн}}$  – внутреннее тепловое сопротивление транзистора.

Тогда

$$\begin{aligned}
 T_{Э,VT} &= 15 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 650 + \frac{5,1 \cdot 10^{-4}}{(1,3 \cdot 1,3) \cdot 10^{-6}} \right) + \\
 &+ 120 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{(15 \cdot 7) \cdot 10^{-6}} + 75 \approx 91 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

Так как максимально допустимая температура транзистора КТ319А составляет  $T_{\text{доп. max}}(\text{КТ319А}) = 85^\circ\text{C}$ , поэтому для данной ГИМС транзистор КТ319А не подойдет, поэтому выбираем другой, подходящий по параметрам, например, КТ332А с заливкой герметиком с одной стороны, у которого  $T_{\text{доп. max}} = 125^\circ\text{C}$  и  $R_{\text{ТВН}} = 220^\circ\text{C/Вт}$ .

По аналогии рассчитаем для КТ332А параметры  $r$ ,  $q$ ,  $\gamma(r, q)$ ,  $R_{\text{Т.эфф}}$ .

Расчетные данные подставляем в табл.3.

Таблица 3

$l$ , мм	$b$ , мм	$P_{\text{Э}} \cdot 10^{-3}$ , Вт	$r$	$q$	$\gamma(r, q)$	$R_{\text{Т.эфф}}$
1,2	1,2	15	0,35	0,35	0,35	$4,9 \cdot 10^{-4}$

Рассчитаем температуру транзистора КТ332А по формуле (4):

$$T_{\text{Э,VT}} = 15 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 220 + \frac{4,9 \cdot 10^{-4}}{(1,2 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6}} \right) + 120 \cdot 10^{-3} \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{(15 \cdot 7) \cdot 10^{-6}} + 75 \approx 85^\circ\text{C}$$

Ответ:

$$T_{\text{Э, R1}} = 85^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{Э, R2}} = 89,36^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{Э, R3}} = 90,6^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{Э, VT}} = 85^\circ\text{C}.$$

### Пример 5

Рассчитать полупроводниковый резистор на основе базовой диффузии:  $R = 800 \text{ Ом}$ ;  $\gamma_R = 18\%$ ;  $P = 10 \text{ мВт}$ ;  $T_{\text{max}} = 70^\circ\text{C}$ ,  $\rho_s = 200 \text{ Ом}/\square$ ;  $P_0 = 2 \text{ Вт}/\text{мм}^2$ ;  $\alpha_R = 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ , контакты – алюминий с подслоем титана, масштаб 200:1, шаг координатной сетки 1 мм.



*Решение.*

Общий вид проектируемого полупроводникового резистора изображён на рисунке 5.

Уравнение для сопротивления резистора может быть записано как

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s K_\phi,$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы или число квадратов резистора.

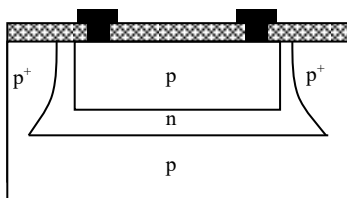


Рис.5 - Структура интегрального резистора на основе базовой диффузии

Из уравнения (1) найдем коэффициент формы по формуле:

$$K_\phi = \frac{R}{\rho_s} = \frac{800}{200} = 4.$$

Так как резистор имеет  $K_\phi > 1$ , то расчёт геометрических размеров начинают с определения ширины. Ширину резистора выбирают из условия:

$$b \geq \max \{ b_p, b_{\text{точн}}, b_{\text{техн}} \},$$

где  $b_p$  – минимальная ширина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{K_\phi \cdot P_0}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 2}} = 3,53 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

$b_{\text{точн}}$  – минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K_{\Phi}}}{\gamma_{\kappa\Phi}},$$

где  $\Delta b$ ,  $\Delta l$  – точность воспроизведения геометрии резисторов ( $\Delta b = \Delta l = 0.1$  мкм);

$$\gamma_{\kappa\Phi} = \gamma_R - \gamma_{\rho_S} - \gamma_t - 2R_{\kappa}/R,$$

где  $\gamma_{\kappa\Phi}$  – погрешность коэффициента формы;  $\gamma_R$  – полная относительная погрешность изготовления резистора;  $\gamma_{\rho_S}$  – погрешность воспроизведения величины  $\rho_S$  резистивной пленки (для типовых технологических процессов  $\gamma_{\rho_S} = 0,05 - 0,1$ );  $\gamma_t$  – температурная погрешность;  $2R_{\kappa}/R$  – погрешность переходных сопротивлений контактов.

В нашем случае возьмем

$$\gamma_t = \alpha_R \cdot (T_{\text{max}} - 20) = 10^{-3} \cdot (70 - 20) = 0,05;$$

$$\gamma_{\rho_S} = 0,07;$$

$$2R_{\kappa}/R = \gamma_{\rho_K} = 0,03.$$

Тогда

$$\gamma_{\kappa\Phi} = \gamma_R - (\gamma_{\rho_{\text{кв}}} + \gamma_t + \gamma_{\rho_R}) = 0,18 - (0,07 + 0,05 + 0,03) = 0,03.$$

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{k_{\Phi}}}{\gamma_{\kappa\Phi}} = \frac{0,1 + \frac{0,1}{4}}{0,03} = 4,17 \text{ мкм},$$

$b_{\text{техн}}$  – минимальная ширина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования конфигурации ( $b_{\text{техн}} = 3$  мкм).

Таким образом, расчетная ширина резистора составит:

$$b_{\text{расч}} = \max\{b_p, b_{\text{точн}}, b_{\text{техн}}\} = \max\{35,3, 4,17, 3\} = 35,3 \text{ мкм}.$$

Найдём промежуточную ширину резистора по следующей формуле:

$$b_{\text{пром}} = b_{\text{расч}} - 2 \cdot (\Delta_{\text{тр}} + \eta),$$

где  $\Delta_{\text{тр}} = 0,5 - 0,8$  мкм,  $\eta = 60\%$  (при базовой диффузии) и  $80\%$  (при эмиттерной диффузии) от глубины диффузии.

Пусть толщина базового слоя составляет 2,5 мкм, тогда при  $\Delta_{\text{тр}} = 0,5$  мкм получим

$$b_{\text{пром}} = 35,3 - 2 \cdot (0,5 + 0,6 \cdot 2,5) = 31,3 \text{ мкм.}$$

Так как шаг координатной сетки равен 1 мм и масштаб составляет 200:1, то следует округлить значение топологической ширины резистора до ближайшего целого значения, кратного 5 мкм. Таким образом,  $b_{\text{топ}} = 35$  мкм.

Следовательно ширина резистора  $b$  в кристалле после процесса диффузии

$$b_{\text{кр}} = 35 + 2 \cdot (0,5 + 0,6 \cdot 2,5) = 39 \text{ мкм.}$$

Определяем площадь контактных площадок по следующей формуле:

$$S_{\text{к}} = \frac{R_{\text{ом}}}{R_{\text{к.доп}}},$$

где  $R_{\text{ом}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ;

$$R_{\text{к.доп}} = \frac{\Delta R}{2} \cdot \alpha, \quad \Delta R = R \cdot \gamma_R = 800 \cdot 0,18 = 144 \text{ Ом,}$$

$$\alpha = 0,05 \div 0,1.$$

$$\text{Тогда } R_{\text{к.доп}} = \frac{\Delta R}{2} \cdot \alpha = \frac{144}{2} \cdot 0,1 = 7,2 \text{ Ом,}$$

$$S_{\text{к}} = \frac{R_{\text{ом}}}{R_{\text{к.доп}}} = \frac{7 \cdot 10^{-5}}{7,2} = 9,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$$

Рассчитаем размеры контактной площадки по формуле:

$$L_1 = \sqrt{S_{\text{к}}} = \sqrt{10^{-5}} \approx 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ см} \approx 30 \text{ мкм.}$$

$$L_2 = L_1 \cdot 1,5 = 45 \text{ мкм.}$$

Сопротивление резистора рассчитывается по следующей формуле:

$$R = \rho_s \cdot (K_{\phi} + 2 \cdot K + 0,55 \cdot N_{\text{изг}}),$$

где  $K$  – коэффициент формы, учитывающий конфигурацию контактной площадки.

$$K = f(b, L_1, L_2)$$

Форму контактных областей резистора показана на рис. 6.

При  $b_{\text{кр}} = 39$  мкм,  $L_1 = 30$  мкм и  $L_2 = 45$  мкм,  $K = 0,25$ .

Так как коэффициент формы равен  $K_\phi = \frac{l}{b}$ , то из формулы (5) можно выразить и рассчитать промежуточную длину резистора без изгибов:

$$l_{\text{расч}} = b_{\text{кр}} \cdot \left( \frac{R}{\rho_S} - 2 \cdot K \right) = 39 \cdot \left( \frac{800}{200} - 2 \cdot 0,25 \right) \approx 136,5 \text{ мкм.}$$

Найдём расчетную длину резистора по следующей формуле:

$$l_{\text{пром}} = l_{\text{расч}} + 2 \cdot (\Delta_{\text{тр}} + \eta);$$

$$l_{\text{пром}} = 136,5 + 2 \cdot (0,5 + 0,6 \cdot 2,5) = 140,5 \text{ мкм.}$$

Так как шаг координатной сетки равен 1 мм и масштаб составляет 200:1, то следует округлить значение расчетной длины резистора до ближайшего целого значения, кратного 5 мкм. Таким образом,  $l_{\text{топ}} = 140 \text{ мкм.}$

Ответ:  $b_{\text{топ}} = 35 \text{ мкм}$  и  $l_{\text{топ}} = 140 \text{ мкм.}$

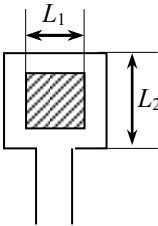


Рис. 6 - Форма контактной области диффузионного резистора

### Пример 7

Рассчитать параметры р-канальных МДП-транзисторов в схеме инвертора (рис.6) при следующих данных:  $U_{\text{пит}} = -12 \text{ В}$ ;  $U_{\text{вых}}(0) = -0,6 \text{ В}$ ;  $U_{\text{вых}}(1) = -12 \text{ В}$ ;  $U_0 = -2 \text{ В}$ ;  $N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{\text{пов}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $C_H = 2,0 \text{ пФ}$ ;  $t_{\text{выкл}} = 0,5 \text{ мкс}$ ;  $\mu_p = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

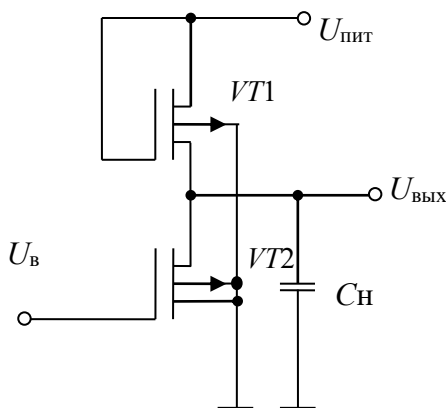


Рис.6 - Схема МДП – инвертора на р-канальных транзисторах

*Решение.*

1. Определим удельную емкость затвора  $C_{30}$ , используя следующую формулу:

$$U_0 = -(|\varphi_{МП}| + \frac{Q_{SS}}{C_{30}} + \frac{Q_{П}}{C_{30}} + 2 \cdot \varphi_{\Phi}),$$

где  $\varphi_{МП}$  - потенциал, зависящий от разности работ выхода материала полупроводника и затвора (определяется графически);  $Q_{SS}$  - заряд, обусловленный поверхностными состояниями границы полупроводник – подзатворный диэлектрик.

$$Q_{SS} = q \cdot N_{пов},$$

где  $Q_{П}$  - пространственный заряд в полупроводнике

$$Q_{П} = \sqrt{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_0 \cdot q \cdot \varphi_{\Phi}},$$

где  $\varphi_{\Phi}$  - потенциал, определяемый положением уровня Ферми относительно середины запрещённой зоны в полупроводнике;  $n_i$  – концентрация носителей в собственном полупроводнике.

$$\varphi_{\Phi} = \varphi_T \cdot \ln \left( \frac{N_0}{n_i} \right).$$

Таким образом

$$Q_{SS} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{11} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2,$$

Так как

$$n_i(Si) = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3},$$

тогда

$$\varphi_{\Phi} = 0,026 \cdot \ln \left( \frac{10^{16}}{2 \cdot 10^{10}} \right) \approx 0,34 \text{ В},$$

тогда

$$Q_{\Pi} = \sqrt{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{16} \cdot 0,34 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}.$$

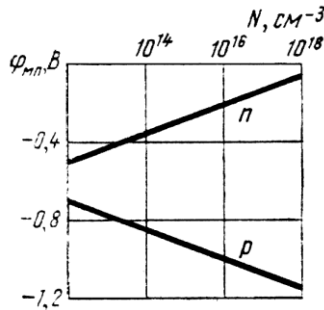


Рис.7 – Зависимость разности потенциалов  $\varphi_{МП}$  для системы  $Al - Si$  от концентрации примеси в кремнии

Из рисунка 7 находим для  $N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$   $|\varphi_{МП}| = 0,2 \text{ В}$ .

Выразим и рассчитаем значение  $C_{30}$  из формулы:

$$C_{30} = \frac{Q_{SS} + Q_{\Pi}}{-U_0 - |\varphi_{МП}| - 2 \cdot \varphi_{\Phi}} = \frac{3,2 \cdot 10^{-8} + 3,4 \cdot 10^{-8}}{2 - 0,25 - 2 \cdot 0,34} \approx 5,9 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

2. Рассчитаем толщину диэлектрика по формуле:

$$h_d = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_d}{C_{30}},$$

где  $\varepsilon_d$  - диэлектрическая проницаемость затворного диэлектрика.

$$\text{Так как } \varepsilon_d = 4, \text{ тогда } h_d = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4}{5,9 \cdot 10^{-8}} \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ см}$$

3. Рассчитаем геометрические размеры каналов ключевого и нагрузочного транзисторов.

Аналитическое выражение стоковой характеристики транзистора имеет вид:

$I_C = K \cdot [2 \cdot U_C \cdot (U_3 - U_0) - U_C^2]$ , при  $U_C \leq U_3 - U_0$  - крутой участок

$I_C = K \cdot [(U_3 - U_0)^2]$ , при  $U_C > U_3 - U_0$  - пологий участок,

где  $K = \frac{\mu \cdot C_{30} \cdot \omega_K}{2 \cdot l_K}$  - удельная крутизна транзистора.

Так как в данной схеме инвертора ключевой транзистор работает в крутой области характеристик, а нагрузочный - в пологий и транзисторы в схеме соединены последовательно, то можно записать:

$$I_{СК} = I_{СН},$$

$$K_K \cdot [2 \cdot U_C \cdot (U_3 - U_0) - U_C^2] = K_H \cdot [(U_3 - U_0)^2].$$

Примем для ключевого транзистора  $U_3 = U_{ВХ} (1)$ ,  $U_C = U_{ВЫХ} (0)$ , а для нагрузочного  $U_3 = U_{ПИТ} - U_{ВЫХ} (0)$ .

Откуда

$$\frac{K_K}{K_H} = \frac{(U_{ПИТ} - U_{ВЫХ} (0) - U_0)^2}{2 \cdot (U_{ВХ} (1) - U_0) \cdot U_{ВЫХ} (0) - (U_{ВЫХ} (0))^2} =$$

$$= \frac{(12 - 0,6 - 2)^2}{2 \cdot (7 - 2) \cdot 0,6 - (0,6)^2} \approx 15,7.$$

Удельную крутизну нагрузочного транзистора найдём из условия быстрогодействия:

$$K_H = \frac{2 \cdot C \cdot h_d}{\mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_d \cdot t_{\text{выкл}} \cdot (U_{\text{пит}} - U_0 - U_{\text{вых}}(1))}.$$

$$\text{Откуда } K_H = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{250 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot (10 - 2 - 7)} \approx 0,18.$$

Так как

$$\frac{K_K}{K_H} = 15,7; K_H = 0,18 \Rightarrow K_K = 15,7 \cdot 0,18 \approx 2,8.$$

Пусть  $\omega_H = l_K = 5$  мкм, тогда

$$\omega_K = K_K \cdot l_K = 2,8 \cdot 5 = 14 \text{ мкм},$$

$$l_H = \omega_H / K_H = 5 / 0,18 = 27,8 \text{ мкм}$$

Ответ:  $h_d = 0,06$  мкм.

$$\omega_H = 5 \text{ мкм}, l_H = 27,8 \text{ мкм},$$

$$\omega_K = 14 \text{ мкм}, l_K = 5 \text{ мкм}.$$



## 2 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Рассчитать тонкопленочный резистор сопротивлением  $R$ , мощностью  $P$ . Сделать чертеж. При изготовлении используется метод фотолитографии. Шаг координатной сетки 1 мм, масштаб 20:1. Параметры резистора и материала резистивной пленки приведены в таблице 2.1.

2. Рассчитать тонкопленочный конденсатор емкостью  $C$ ; рабочим напряжением  $U_p$ . Сделать чертеж. При изготовлении используется метод фотолитографии. Шаг координатной сетки 1 мм, масштаб 20:1.

Параметры конденсатора и материала диэлектрической пленки приведены в таблице 2.2.

3. Провести ориентировочный расчет теплового режима фрагмента ГИМС, включающего 3 пленочных резистора и 1 навесной транзистор. Подложка толщиной  $d_{\text{под}}$  и теплопроводностью  $\lambda_{\text{под}}$  крепится на основание корпуса клеем толщиной  $d_{\text{кл}}$  и теплопроводностью  $\lambda_{\text{кл}}$ . Размер контакта -  $S_{\text{конт}}$ . Мощность выделяемая микросхемой  $P_0$ , максимальная температура окружающей среды  $T_{\text{max}}$ . Максимально допустимые температуры работы пленочных элементов и навесных компонентов  $T_{\text{доп.max}}(R)$  и  $T_{\text{доп.max}}(VT)$  соответственно. Сделать вывод о возможности нормальной работы ГИМС. Данные для расчета приведены в таблицах 2.3-2.4.

Таблица 2.1 — **Варианты заданий к задаче №1**

№ вар.	$R$ , Ом	$P$ , мВт	$\gamma_R$ , %	$T_{\max}$ , °C	$\rho_S$ , Ом/□	$P_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\alpha_R \cdot 10^{-4}$ , 1/°C.
1	850	30	18	70	600	2	1
2	1200	20	20	75	700	3	2
3	3000	25	17	70	400	4	2
4	1500	25	18	75	1000	3	2
5	2200	20	20	65	200	3	1
6	1100	30	21	65	500	3	1
7	2700	35	20	70	500	2	1
8	1350	30	19	65	200	2	2
9	1000	25	18	70	300	3	2
10	2400	35	20	75	450	2	1
11	5000	20	17	70	400	3	2
12	8000	20	17	75	600	3	1

Значения погрешностей воспроизведения удельного поверхностного сопротивления  $\gamma_{ps}$ , старения пленки  $\gamma_{Rct}$  и переходных сопротивлений контактов  $\gamma_{Rk}$  взять из примера 1.

Таблица 2.2 — Варианты заданий к задаче №2

№ вар.	$C$ , пФ	$U_p$ , В	$\gamma_C$ , %	$T_{\max}$ , °С	$f$ , кГц	$\varepsilon$	$E_{\text{ПР}} \cdot 10^6$ , В/см	$\alpha_C \cdot 10^{-4}$ , 1/°С	$\text{tg} \delta \cdot 10^{-4}$	$\rho_s$ , Ом/□
1	1000	15	20	70	100	6	2	1	2	0,2
2	1500	20	19	75	80	6	2	2	2	0,2
3	2200	12	18	70	80	7	3	1	2	0,2
4	2400	14	20	75	90	22	2	3	3	0,2
5	900	18	20	65	70	4	3	1	2	0,2
6	800	15	18	65	100	4	3	1	2	0,2
7	2100	17	19	70	80	20	2	3	2	0,2
8	1700	20	19	65	90	7	3	2	2	0,2
9	2000	13	18	70	80	20	2	3	3	0,2
10	1300	15	18	75	100	7	2	2	2	0,2
11	700	17	20	70	100	4	3	1	2	0,2
12	1800	18	20	75	70	6	3	1	2	0,2

Значения погрешностей воспроизведения удельной емкости  $\gamma_{\tilde{N}_0}$ , старения конденсатора  $\gamma_{\tilde{N}\tilde{\rho}}$  взять из примера 2.

Таблица 2.3 — **Варианты заданий к задаче №3** (параметры тепловыделяющих элементов)

№ вар.	$R_1$			$R_2$			$R_3$			$VT$			
	$l$ , мм	$b$ , мм	$P$ , мВт	$l$ , мм	$b$ , мм	$P$ , мВт	$l$ , мм	$b$ , мм	$P$ , мВт	$l$ , мм	$b$ , мм	$R_{ТЭН}$ , °C/Вт	$P$ , мВт
1	1	0,6	20	1,6	0,8	25	1	0,5	35	0,86	0,86	630	15
2	1,2	0,6	22	1,6	0,6	28	1,4	0,6	45	0,66	0,66	860	15
3	1,3	0,7	25	1,5	0,8	28	1,2	0,7	45	1,2	1,2	220	15
4	1,4	0,8	20	2	0,9	30	1,4	0,7	40	1,2	1,2	240	15
5	1,1	0,6	23	2	0,8	32	1,1	0,6	44	0,86	0,86	630	15
6	1,5	0,8	26	2,2	0,9	32	1,6	0,5	42	0,66	0,66	860	15
7	1,2	0,7	26	1,8	0,7	28	1,2	0,6	38	1,2	1,2	220	15
8	2	1	21	1,8	1	31	2,1	0,8	38	1,2	1,2	240	15
9	1,8	1	22	1,4	0,7	30	1,8	0,8	40	0,86	0,86	630	15
10	1,6	1	22	1,6	1	27	1,8	1	42	0,66	0,66	860	15
11	1,5	0,8	25	1,6	0,8	27	1,5	0,5	36	1,2	1,2	220	15
12	2,2	1	25	2	1,1	30	2,2	1	36	1,2	1,2	240	15

Таблица 2.4 — **Варианты заданий к задаче №3** (параметры тепловой системы)

№ вар.	$d_{под},$ мм	$\lambda_{под},$ Вт/(°С·м)	$d_{кл},$ мм	$\lambda_{кл},$ Вт/(°С·м)	$S_{конт},$ мм <sup>2</sup>	$P_0,$ Вт	$T_{max},$ °С	$T_{доп.max}(R),$ °С	$T_{доп.max}(VT),$ °С
1	0,6	1	0,1	0,3	8×15	0,22	60	120	85
2	1	1,5	0,15	0,5	8×10	0,20	65	120	85
3	1,6	1,7	0,2	0,3	8×15	0,25	70	120	120
4	0,6	1	0,1	0,5	8×10	0,22	75	120	120
5	1	1,5	0,15	0,3	8×15	0,20	60	120	85
6	1,6	1,7	0,2	0,5	8×10	0,25	60	120	85
7	0,6	1	0,1	0,3	8×15	0,22	70	120	120
8	1	1,5	0,15	0,5	8×10	0,21	70	120	120
9	1,6	1,7	0,2	0,3	8×15	0,25	60	120	85
10	0,6	1	0,1	0,5	8×10	0,22	60	120	85
11	1	1,5	0,15	0,3	8×15	0,21	75	120	120
12	1,6	1,7	0,2	0,5	8×10	0,25	75	120	120

### 3 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Банк заданий для контрольной работы содержит 60 вопросов по 5 разделам. Распределение вопросов согласно таблице. Студенту предлагается один вопрос из раздела (всего 5 вопросов).

Раздел 1 – Расчет интегрального резистора полупроводниковой ИМС.

Раздел 2 – ИМС на МДП – транзисторах.

Раздел 3 – Расчет биполярного транзистора.

Раздел 4 – Правила проектирования топологии полупроводниковых ИМС.

Раздел 5 – Методы изоляции элементов полупроводниковых ИМС и общие вопросы проектирования интегральных диодов и транзисторов.

Разделы					
Номера вопросов	1	2	3	4	5
	1	13	25	37	49
	2	14	26	38	50
	3	15	27	39	51
	4	16	28	40	52
	5	17	29	41	53
	6	18	30	42	54
	7	19	31	43	55
	8	20	32	44	56
	9	21	33	45	57
	10	22	34	46	58
	11	23	35	47	59

	12	24	36	48	60
--	----	----	----	----	----

1. Какую мощность будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R=800$  Ом и шириной  $b=50$  мкм, спроектированный на основе базовой диффузии с  $\rho_S = 200$  Ом/□ и  $P_0=2$  Вт/мм<sup>2</sup>?
2. Сколько изгибов на угол  $90^\circ$  будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R = 3300$  Ом и шириной  $d = 20$  мкм, если после корректировки его длина  $l$  составляет 168 мкм? Поверхностное сопротивление слоя  $\rho_S = 300$  Ом/□, коэффициент формы контактной области резистора  $K=0,2$ .
3. Интегральный резистор сопротивлением  $R = 1000$  Ом имеет коэффициент формы  $K_\Phi = 5$ . На основе какой диффузии целесообразно его спроектировать?
4. Какую мощность будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R=1000$  Ом и шириной  $b=40$  мкм, спроектированный на основе базовой диффузии с  $\rho_S = 300$  Ом/□ и  $P_0=3$  Вт/мм<sup>2</sup>?
5. Сколько изгибов на угол  $90^\circ$  будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R = 2400$  Ом и шириной  $d = 25$  мкм, если после корректировки его длина  $l$  составляет 265 мкм? Поверхностное сопротивление слоя  $\rho_S = 200$  Ом/□, коэффициент формы контактной области резистора  $K=0,15$ .
6. Интегральный резистор сопротивлением  $R = 1300$  Ом имеет коэффициент формы  $K_\Phi = 6$ . На основе какой диффузии целесообразно его спроектировать?
7. Какую мощность будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R=1500$  Ом и шириной  $b=20$  мкм, спроектированный на основе базовой диффузии с  $\rho_S = 180$  Ом/□ и  $P_0=3$  Вт/мм<sup>2</sup>?

8. Сколько изгибов на угол  $90^\circ$  будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R = 2500$  Ом и шириной  $d = 20$  мкм, если после корректировки его длина  $l$  составляет 174 мкм? Поверхностное сопротивление слоя  $\rho_s = 250$  Ом/□, коэффициент формы контактной области резистора  $K=0,1$ .
9. Интегральный резистор сопротивлением  $R = 30$  Ом имеет коэффициент формы  $K_\phi = 8$ . На основе какой диффузии целесообразно его спроектировать?
10. Какую мощность будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R=2500$  Ом и шириной  $b=25$  мкм, спроектированный на основе базовой диффузии с  $\rho_s = 250$  Ом/□ и  $P_0=4$  Вт/мм<sup>2</sup>?
11. Сколько изгибов на угол  $90^\circ$  будет иметь интегральный резистор сопротивлением  $R = 3000$  Ом и шириной  $d = 25$  мкм, если после корректировки его длина  $l$  составляет 315 мкм? Поверхностное сопротивление слоя  $\rho_s = 200$  Ом/□, коэффициент формы контактной области резистора  $K=0,1$ .
12. Интегральный резистор сопротивлением  $R = 9000$  Ом имеет коэффициент формы  $K_\phi = 8$ . На основе какой диффузии целесообразно его спроектировать?
13. Чему равно пороговое напряжение  $p$ -канального МДП – транзистора, если  $N_{\text{пов}} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $Q_{ss}=Q_{\text{п}}$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = \phi_\phi=0,3$  В;  $C_{30}=4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
14. Какова длина канала МДП-транзистора, если его удельная крутизна  $K = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^2$ ;  $\varepsilon_d = 4$ ; толщина подзатворного диэлектрика  $h_d = 0,1$  мкм; ширина канала  $\omega = 10$  мкм; подвижность носителей  $\mu = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ?
15. Чему равно пороговое напряжение  $n$ -канального МДП – транзистора, если  $2Q_{ss}=Q_{\text{п}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = 0,9$  В;  $\phi_\phi=0,4$  В;  $C_{30}=2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .



16. Чему равно пороговое напряжение  $p$ -канального МДП – транзистора, если  $N_{\text{пов}} = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $Q_{SS} = Q_{\text{П}}$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = \phi_{\text{Ф}} = 0,2 \text{ В}$ ;  $C_{30} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
17. Какова длина канала МДП-транзистора, если его удельная крутизна  $K = 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^2$ ;  $\epsilon_{\text{д}} = 4$ ; толщина подзатворного диэлектрика  $h_{\text{д}} = 0,1 \text{ мкм}$ ; ширина канала  $\omega = 8 \text{ мкм}$ ; подвижность носителей  $\mu = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ?
18. Чему равно пороговое напряжение  $n$ -канального МДП – транзистора, если  $2,5Q_{SS} = Q_{\text{П}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = 1 \text{ В}$ ;  $\phi_{\text{Ф}} = 0,4 \text{ В}$ ;  $C_{30} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
19. Чему равно пороговое напряжение  $p$ -канального МДП – транзистора, если  $N_{\text{пов}} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $Q_{SS} = 2Q_{\text{П}}$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = \phi_{\text{Ф}} = 0,3 \text{ В}$ ;  $C_{30} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
20. Какова длина канала МДП-транзистора, если его удельная крутизна  $K = 1,66 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^2$ ;  $\epsilon_{\text{д}} = 4$ ; толщина подзатворного диэлектрика  $h_{\text{д}} = 0,08 \text{ мкм}$ ; ширина канала  $\omega = 5 \text{ мкм}$ ; подвижность носителей  $\mu = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ?
21. Чему равно пороговое напряжение  $n$ -канального МДП – транзистора, если  $3Q_{SS} = Q_{\text{П}} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = 1 \text{ В}$ ;  $\phi_{\text{Ф}} = 0,45 \text{ В}$ ;  $C_{30} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
22. Чему равно пороговое напряжение  $p$ -канального МДП – транзистора, если  $N_{\text{пов}} = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $Q_{SS} = 2Q_{\text{П}}$ ;  $|\phi_{\text{МП}}| = 0,2 \text{ В}$ ;  $\phi_{\text{Ф}} = 0,3 \text{ В}$ ;  $C_{30} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
23. Какова длина канала МДП-транзистора, если его удельная крутизна  $K = 2,66 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^2$ ;  $\epsilon_{\text{д}} = 4$ ; толщина подзатворного диэлектрика  $h_{\text{д}} = 0,08 \text{ мкм}$ ; ширина канала  $\omega = 10 \text{ мкм}$ ; подвижность носителей  $\mu = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ?

24. Чему равно пороговое напряжение  $n$ -канального МДП – транзистора, если  $2Q_{SS}=Q_{П} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;  $|\phi_{МП}| = 0,8 \text{ В}$ ;  $\phi_{Ф}=0,2 \text{ В}$ ;  $C_{30}=3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .
25. По значению концентрации примеси  $N_{ДК}$  в коллекторе  $n$ - $p$ - $n$  транзистора, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии, найти удельное сопротивление эпитаксиального слоя  $\rho_{ЭП}$ , если подвижность носителей  $\mu_n = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $N_{ДК}=10^{17} \text{ см}^{-3}$ ? Ответ округлить до второго знака после запятой.
26. Определить ширину слоя объемного заряда  $\Delta X_{КК}$  на коллекторном переходе, распространяющегося в сторону коллектора в  $n$ - $p$ - $n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если  $\Delta X_{КК}$  составляет 60% от ширины коллектора  $\omega_K$  под коллекторным переходом. Полная толщина коллекторного слоя  $d_K = 5 \text{ мкм}$ , глубина коллекторного перехода  $x_{jk} = 2 \text{ мкм}$ .
27. Определить глубину коллекторного перехода  $x_{jk}$  в  $n$ - $p$ - $n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если глубина эмиттерного перехода  $X_{jэ} = 1,5 \text{ мкм}$ , а ширина активной базы при рабочих напряжениях  $\omega_{Ба} = 0,9 \text{ мкм}$ , что составляет 60 % от ширины технологической базы  $\omega_{Бо}$ .
28. По значению концентрации примеси  $N_{ДК}$  в коллекторе  $n$ - $p$ - $n$  транзистора, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии, найти удельное сопротивление эпитаксиального слоя  $\rho_{ЭП}$ , если подвижность носителей  $\mu_n = 900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $N_{ДК}=5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ? Ответ округлить до второго знака после запятой.
29. Определить ширину слоя объемного заряда  $\Delta X_{КК}$  на коллекторном переходе, распространяющегося в сторону коллектора в  $n$ - $p$ - $n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если  $\Delta X_{КК}$  составляет 70% от

ширины коллектора  $\omega_K$  под коллекторным переходом. Полная толщина коллекторного слоя  $d_K = 6$  мкм, глубина коллекторного перехода  $x_{jk} = 3$  мкм.

30. Определить глубину коллекторного перехода  $x_{jk}$  в  $n-p-n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если глубина эмиттерного перехода  $X_{jэ} = 1,3$  мкм, а ширина активной базы при рабочих напряжениях  $\omega_{Ба} = 0,98$  мкм, что составляет 70 % от ширины технологической базы  $\omega_{Бо}$ .
31. По значению концентрации примеси  $N_{ДК}$  в коллекторе  $n-p-n$  транзистора, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии, найти удельное сопротивление эпитаксиального слоя  $\rho_{эп}$ , если подвижность носителей  $\mu_n = 800$  см<sup>2</sup>/в·с,  $N_{ДК} = 3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>? Ответ округлить до второго знака после запятой.
32. Определить ширину слоя объемного заряда  $\Delta X_{КК}$  на коллекторном переходе, распространяющегося в сторону коллектора в  $n-p-n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если  $\Delta X_{КК}$  составляет 50% от ширины коллектора  $\omega_K$  под коллекторным переходом. Полная толщина коллекторного слоя  $d_K = 7$  мкм, глубина коллекторного перехода  $x_{jk} = 3$  мкм.
33. Определить глубину коллекторного перехода  $x_{jk}$  в  $n-p-n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если глубина эмиттерного перехода  $X_{jэ} = 1,6$  мкм, а ширина активной базы при рабочих напряжениях  $\omega_{Ба} = 0,84$  мкм, что составляет 60 % от ширины технологической базы  $\omega_{Бо}$ .
34. По значению концентрации примеси  $N_{ДК}$  в коллекторе  $n-p-n$  транзистора, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии, найти удельное сопротивление эпитаксиального слоя  $\rho_{эп}$ , если подвижность носителей  $\mu_n =$

$1000 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{с}$ ,  $N_{\text{ДК}}=10^{16} \text{ см}^{-3}$ ? Ответ округлить до второго знака после запятой.

35. Определить ширину слоя объемного заряда  $\Delta X_{\text{КК}}$  на коллекторном переходе, распространяющегося в сторону коллектора в  $n$ - $p$ - $n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если  $\Delta X_{\text{КК}}$  составляет 80% от ширины коллектора  $\omega_{\text{К}}$  под коллекторным переходом. Полная толщина коллекторного слоя  $d_{\text{К}}=5 \text{ мкм}$ , глубина коллекторного перехода  $x_{jk}=2,5 \text{ мкм}$ .
36. Определить глубину коллекторного перехода  $x_{jk}$  в  $n$ - $p$ - $n$  транзисторе, выполненном по планарно-эпитаксиальной технологии, если глубина эмиттерного перехода  $X_{jэ}=1,4 \text{ мкм}$ , а ширина активной базы при рабочих напряжениях  $\omega_{\text{Ба}}=0,9 \text{ мкм}$ , что составляет 75 % от ширины технологической базы  $\omega_{\text{Бо}}$ .
37. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 2  $n$ - $p$ - $n$  транзистора, 2 резистора на основе базовой диффузии, 2 резистора в эпитаксиальном слое. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
38. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 3  $n$ - $p$ - $n$  транзистора, 2 резистора на основе базовой диффузии, 1 резистор в эпитаксиальном слое, 1 диод на переходе коллектор-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
39. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 1  $n$ - $p$ - $n$  транзистор, 3 резистора на основе базовой диффузии, 2

резистора в эпитаксиальном слое. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.

40. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p-n$  переходом. В кристалле требуется разместить 2  $n-p-n$  транзистора с общим коллектором, 2 резистора на основе базовой диффузии, 1 резистор в эпитаксиальном слое. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
41. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p-n$  переходом. В кристалле требуется разместить 2  $n-p-n$  транзистора, 1 резистор на основе базовой диффузии, 1 резистор в эпитаксиальном слое, 2 диода на переходе эмиттер-база с общим анодом. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
42. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p-n$  переходом. В кристалле требуется разместить 3  $n-p-n$  транзистора с общим коллектором, 2 резистора на основе базовой диффузии, 3 резистора в эпитаксиальном слое. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
43. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p-n$  переходом. В кристалле требуется разместить 2  $p-n-p$  транзистора, 3 резистора на основе базовой диффузии, 2 резистора в эпитаксиальном слое, 1 диод на переходе эмиттер-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
44. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратным смещенным  $p-n$  переходом. В кристалле требуется разместить 2  $p-n-p$

транзистора с общим коллектором, 2 резистора на основе базовой диффузии, 1 резистор в эпитаксиальном слое, 1 диод на переходе эмиттер-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.

45. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратнo смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 1  $p$ - $n$ - $p$  транзистор, 4 резистора на основе базовой диффузии, 2 резистора в эпитаксиальном слое, 1 диод на переходе коллектор-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
46. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратнo смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 3  $n$ - $p$ - $n$  транзистора, 3 резистора на основе базовой диффузии, 3 резистора в эпитаксиальном слое, 1 диод на переходе эмиттер-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
47. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратнo смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 1  $n$ - $p$ - $n$  транзистор, 3 резистора на основе базовой диффузии, 3 диода на переходе коллектор-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.
48. ИМС проектируется по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией элементов обратнo смещенным  $p$ - $n$  переходом. В кристалле требуется разместить 1  $n$ - $p$ - $n$  транзистор, 4 резистора на основе базовой диффузии, 3 диода на переходе коллектор-база, 1 диод на переходе эмиттер-база. Какое минимальное количество изолированных областей для этого потребуется.

49. Какой способ изоляции элементов полупроводниковых ИМС предполагает обязательное использование эпитаксиальных структур со скрытыми слоями?
50. Какой способ изоляции элементов полупроводниковых ИМС предполагает одновременное создание эмиттерных и коллекторных областей транзистора?
51. Какой способ изоляции элементов полупроводниковых ИМС предполагает использование тонких эпитаксиальных слоев?
52. Какой способ изоляции элементов полупроводниковых ИМС предполагает использование процесса автолегирования?
53. Какой уровень легирования коллекторной области должен быть для получения малой емкости коллекторного перехода транзистора?
54. Какой уровень легирования коллекторной области должен быть для получения высокого напряжения пробоя коллекторного перехода транзистора?
55. Чем должен характеризоваться эмиттер мощного интегрального биполярного транзистора (по площади и по периметру)?
56. Для получения диода с малыми значениями емкости и времени восстановления обратного сопротивления, какой переход транзисторной структуры необходимо использовать?
57. Для получения диода с большим быстродействием, какой переход транзисторной структуры необходимо использовать?

58. Какому диодному включению транзисторной структуры соответствует наибольшая емкость?
59. Что необходимо учитывать при использовании диффузионных конденсаторов в конструкциях полупроводниковых ИМС?
60. Какие основные отличия между диффузионными и МДП-конденсаторами?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных схем. – М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.
2. Конструирование и технология микросхем / Под ред. Л.А. Коледова. М.: Высшая школа, 1984. – 231 с.
3. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.
4. Матсон Э.А. Конструкции и технология микросхем. – Минск, Высшая школа, 1985. – 207 с.
5. Матсон Э.А., Крыжановский Д.В. Справочное пособие по конструированию микросхем. – Минск, Высшая школа, 1982. – 224 с.
6. Пономарев М.Ф. Конструирование и расчет интегральных схем. – М.: Радио и связь, 1982.
7. Пономарев М.Ф., Коноплев Б.Г. Конструирование и расчет микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1986. – 176 с.
8. Николаев И.М., Филинук Н.А. Интегральные микросхемы и основы их проектирования. – М.: Радио и связь, 1992. – 424 с.
9. Калниболотский Ю.М., Королев Ю.В., Богдан Г.И., Рогоза В.С. Расчет и конструирование микросхем. – Киев: Высшая школа, 1983. – 279 с.
10. Жигальский А.А. Проектирование и конструирование микросхем: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 195 с.