

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Северо-Кавказский филиал ордена Трудового Красного Знамени федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

Методические указания
по выполнению контрольной работы

по дисциплине
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

(направление подготовки 11.03.02)

Ростов-на-Дону
2019

Методические указания
по выполнению контрольной работы

по дисциплине
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

Составитель: А.В. Бородин, доцент

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры ОНП

Протокол от «26» августа 2019 г. №1

Общие замечания к выполнению контрольной работы.

Целью контрольной работы является закрепление теоретического материала по дисциплине «Физические основы электроники».

Выполнение работы требует творческого подхода, а не формальной подстановки заданных величин в приведенные формулы. Поэтому перед тем, как приступить к выполнению работы, следует разобраться в теоретическом материале по конспекту лекций или по рекомендованной литературе. Студентам не потребуются справочники, поскольку все необходимые для расчетов константы приведены в приложении.

Задачи охватывают следующие разделы курса:

- физика полупроводников,
- р-п переход и его свойства,
- принцип полевого управления током в приповерхностных (МДП-структуры) и объемных (с помощью управляющего р-п перехода) каналах.

Каждой задаче предшествует краткое изложение теории, содержащее необходимые для выполнения заданий основные расчетные соотношения.

Выбор варианта.

Номер варианта задач определяется последними 2 цифрами студенческого билета.

Содержание задач.

Задача №1

По заданному при комнатной температуре значению тока $I_0 = 0,1 \cdot 10^{-9}$ А в идеальном несимметричном переходе площадью $S = 0,1$ см².

Определить:

- 1) Материал (Si или Ge), из которого выполнен переход
- 2) Тип и концентрацию неосновных носителей заряда в базе
- 3) Тип и концентрацию примеси, а также тип и концентрацию основных носителей заряда в базе
- 4) Тип и концентрацию основных и неосновных носителей заряда в эмиттере, а также тип и концентрацию примеси, внесенной в область эмиттера
- 5) Контактную разность потенциалов ϕ_k для двух значений температур: t_1 -комнатная, $t_2 = t_1 + \Delta t$ (значения Δt даны в таблице 1).
- 6) L — ширину обедненной области или p-n-перехода эмиттер-база. Сделать вывод о влиянии концентрации примеси на L для симметричного и несимметричного p-n-переходов. Изобразить заданный p-n-переход.
- 7) Записать условие электрической нейтральности для областей эмиттера и базы, а также для всей системы в состоянии равновесия.
- 8) Приложить к заданному p-n-переходу сначала прямое, потом обратное напряжение и на одном графике построить вольт-амперные характеристики (ВАХ) для двух значений температур t_1 и t_2 . Пояснить влияние температуры на прямую и обратную ветви ВАХ.
- 9) Начертить зонные диаграммы в равновесном состоянии, а также при прямом и обратном напряжении.
- 10) Рассчитать вольт-фарадные характеристики для барьерной $C_{бар}$ и $C_{диф}$ емкостей.
- 11) Рассчитать R_0 - сопротивление постоянному току и $r_{диф}$ - сопротивление переменному току на прямой ветви в точке, соответствующей $I_{пр} = 10$ мА, и обратной ветви в

точке, соответствующей $U = 1 \text{ В}$. По результатам расчета сделать вывод о самом важном свойстве p-n-перехода.

12) Начертить малосигнальную электрическую модель p-n-перехода для двух точек (из п.11).

Студентам у которых предпоследняя цифра номера студенческого билета нечетная задан p⁺-n переход, с четной цифрой n⁺-p .

Таблица 1.

	последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_0,$ А	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Δt	30	35	15	40	20	24	25	32	10	16

Задача №2

Задана полупроводниковая структура, в которой управление током в объемном канале осуществляется с помощью поперечного электрического поля.

У студентов с четной последней цифрой номера студенческого билета канал объемный, а с нечетной приповерхностный.

По заданному в таблице 2 значению U^* ($U^*=U_{отс}$, если канал объемный, и $U^* = U_{пор}$, если канал приповерхностный).

- 1) Определить тип канала (р или n).
- 2) Нарисовать заданную структуру, указать полярность питающих напряжений, назвать выводы и пояснить принцип полевого управления током.

- 3) Рассчитать и построить на одном графике стоко-затворные ВАХ в режиме насыщения для двух значений длин канала $L - L_1$, соответствующей заданной в таблице удельной крутизне b_1 и $L = 2L_1$. Сделать вывод о влиянии управляющего действия напряжения затвора на длину канала.
- 4) Рассчитать и построить зависимость крутизны S от напряжения на затворе для двух заданных в п.3 значений L .
- 5) Для трех самостоятельно выбранных значений напряжения на затворе определить напряжение насыщения на стоке и построить семейство стоковых ВАХ, выделив омический участок и участок насыщения (только для одного значения $b=b_1$).

Таблица 2.

	последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U^*, В$	6	1	-6	-1	5	2	-5	-2	-5,5	0,5
	предпоследняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$b_1, мА/м^2$	0,25	0,12	0,1	0,2	0,3	0,28	0,26	0,15	0,23	0,18

Методические указания к выполнению контрольной работы.

Задача № 1

По заданному при комнатной температуре значению тока $I_0 = 0,6 \cdot 10^{-9} А$ в идеальном несимметричном $p^+ - n$ переходе, площадью $S = 0,1 \text{ см}^2$

Определить:

1. Материал, из которого выполнен переход – определим по значению тока I_0 .

Так как ток измеряется в $nА$, то материал кремний.

2. Тип и концентрацию неосновных носителей в базе.

Так как задан $p^+ - n$ переход, то неосновные носители – дырки p .

В формуле для теплового тока I_0 пренебрежем одним слагаемым и получим:

$$I_0 = S \left(q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right) = Sq \frac{D_p}{L_p} p_{n0}$$

где S – площадь перехода.

D_p - коэффициент диффузии неосновных носителей заряда,

p_{n0} - концентрация неосновных носителей заряда,

L_p - диффузионная длина неосновных носителей заряда.

Диффузионная длина и коэффициент диффузии связаны соотношением

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$$

где τ - время жизни дырок и электронов равное 1 мкс.

Согласно соотношению Эйнштейна

$$D_p = \varphi_T \cdot \mu_{p,n}$$

где $\mu_{p,n}$ - подвижность дырок и электронов соответственно. Их значения берем из справочных данных в [1]. $\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$

Тогда концентрация неосновных носителей заряда в базе равна:

$$p_{n0} = \frac{I_0 \cdot L_p}{q \cdot D_p \cdot S} = \frac{I_0 \sqrt{D_p \cdot \tau_p}}{q \cdot D_p \cdot S} = \frac{I_0}{q \cdot S} \sqrt{\frac{\tau_p}{\varphi_T \cdot \mu_p}}$$

$$p_{n0} = \frac{0,6 \cdot 10^{-9}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1} \sqrt{\frac{10^{-6}}{0,026 \cdot 600}} = 9,49 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$$

3. Определим тип и концентрацию примеси, а также тип и концентрацию основных носителей заряда в базе.

В “электронном” п/п n-типа концентрация электронов (основных носителей) равна концентрации атомов донорной примеси, т.е. $n_n = N_{\text{дон}}$, а концентрация неосновных носителей определяется из закона термодинамического равновесия, который для п/п n-типа $n_n p_n = n_i^2$

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\frac{\Delta E_0}{kT}} \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К} - \text{постоянная Больцмана.}$$

$$N_c = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, \quad N_v = 1,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$N_{c,v}$ - эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоны полупроводника соответственно.

ΔE_0 - ширина запрещенной зоны полупроводника, $\Delta E_0 = 1,12 \text{ эВ}$

$$n_i^2 = 2,86 \cdot 10^{38} \exp\left(-\frac{1,12}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 300}\right) = 4,43 \cdot 10^{19} (\text{см}^{-3})^2$$

$$n_n = \frac{n_i^2}{p_n} = \frac{4,43 \cdot 10^{19}}{9,49 \cdot 10^6} = 4,67 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

4. Определим тип и концентрацию основных и неосновных носителей заряда в эмиттере, а также тип и концентрацию примеси, внесенной в область эмиттера.

Примесь акцепторная, тип неосновных носителей – электроны.

При расчете концентрации учтено, что в области эмиттера внесено примеси на несколько порядков больше, чем в область базы.

Концентрация неосновных носителей заряда в эмиттере:

$$I_0 = S \cdot q \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot n_{p0}; \quad n_{p0} = \frac{L_n \cdot I_0}{S \cdot q \cdot D_n} = \frac{\sqrt{D_n \cdot \tau_n} \cdot I_0}{S \cdot q \cdot D_n}; \quad D_n = \varphi_T \cdot \mu_n$$

где μ_n - подвижность электронов, $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\tau_n = 1 \text{ мкс}$,

$$n_{p0} = \frac{\sqrt{\tau_n} \cdot I_0}{S \cdot q \cdot \sqrt{D_n}} = \frac{10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 10^{-9}}{0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{0,026 \cdot 1500}} = 6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$$

В п/п р - типа концентрация основных носителей – дырок практически равна концентрации атомов акцепторной примеси, т.е. $p_p = N_{\text{акц}}$ – найдем из формулы для концентрации свободных носителей заряда $p_p \cdot n_p = n_i^2$

$$p_p = \frac{n_i^2}{n_p} = \frac{4,43 \cdot 10^{19}}{6 \cdot 10^6} = 7,38 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

Так как в области эмиттера примеси должно быть на несколько порядков больше, чем в области базы, примем $N_{\text{дон}} = 4,67 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $N_{\text{акц}} = 7,38 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$,

так как $N_{\text{акц}} \gg N_{\text{дон}}$

5. Найдем контактную разность потенциалов φ_k для двух значений температур $t_1 = 300 \text{ К}$ и $t_2 = t_1 + \Delta t$ $t_2 = 325 \text{ К}$.

Для t_1 :

$$\varphi_k = \varphi_T \ln(N_{акц} \cdot N_{дон} / n_i^2) = 0,026 \cdot \ln(7,38 \cdot 10^{14} \cdot 7 \cdot 10^{12} / 4,43 \cdot 10^{19}) = 0,483 \text{ В}$$

$$\text{Для } t_2 = 325 \text{ К} \quad \varphi_T = \frac{kT}{q} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 325}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,028 \text{ В}$$

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\frac{\Delta E_0}{kT}} = 2,856 \cdot 10^{38} \exp\left(-\frac{1,12}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 325}\right) = 1,24 \cdot 10^{21} (\text{см}^{-3})^2$$

$$N_{акц} = p_p = \frac{n_i^2}{n_p} = \frac{1,24 \cdot 10^{21}}{6 \cdot 10^6} = 2,07 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{дон} = n_n = \frac{n_i^2}{p_n} = \frac{1,24 \cdot 10^{21}}{9,49 \cdot 10^6} = 1,31 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$\text{Примем } N_{акц} = 2,07 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}, \quad N_{дон} = 1,31 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

$$\varphi_k = 0,028 \cdot \ln\left(\frac{2,07 \cdot 10^{14} \cdot 1,31 \cdot 10^{12}}{1,24 \cdot 10^{21}}\right) = 0,344 \text{ В}$$

6. Определим L-ширину обедненной области или p-n – перехода эмиттер-база.

$$L_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{q \cdot N_\delta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,483}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,67 \cdot 10^{12} \cdot 10^6}} = 11,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

На основании равенства по модулю плотности заряда в двух областях перехода можно получить соотношение:

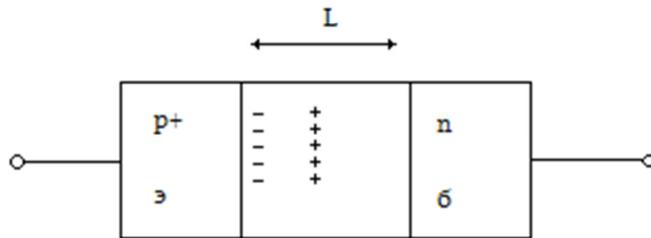
$$\frac{l_n}{l_p} = \frac{N_a}{N_\delta}$$

В несимметричном переходе типа p⁺ - n выполняется неравенство

$N_a \gg N_\delta$, значит, $l_n \gg l_p$ и полная ширина перехода близка к составляющей в высокоомном слое: $l_0 \approx l_n$.

Так как $N_{акц} \gg N_{дон}$, то переход практически расположен в базе

($L = L_3 + L_6 = L_6$) и имеет вид:



7. Записать условие электрической нейтральности для областей эмиттера и базы, а также для всей системы в состоянии равновесия.

Условие электрической нейтральности имеет вид: $\sum q^+ = \sum q^-$

В базе отрицательный суммарный заряд электронов (основных носителей) уравновешен суммарным зарядом неподвижных положительных ионов доноров.

В эмиттере положительный суммарный заряд дырок (основных носителей) уравновешен суммарным зарядом неподвижных отрицательных ионов акцепторов.

Нейтральность нарушается только вблизи границ (в обедненной области), хотя в целом p-n – переход тоже нейтрален, так как $Q_{дон}^+ = Q_{акц}^-$.

8. Приложить к заданному p-n переходу сначала прямое, потом обратное напряжение и на одном графике построить вольтамперные характеристики (ВАХ) для двух значений температур t_1 и t_2 из п.5. Пояснить влияние температур на прямую и обратную ветви ВАХ.

При прямом напряжении на p-n переходе $0 < U < \phi_k$

Обратное напряжение совпадает с ϕ_k , увеличивая потенциальный барьер $U_{обр} < 0$

При $t_1 = 300 \text{ K}$, $I = I_0(e^{U/\phi_T} - 1), \text{A}$ $\phi_T = 0,026 \text{ В}$

$$I = 0,6 \cdot 10^{-9} (e^{U/0,026} - 1)$$

Результаты расчета приведены в табл. 3. и 4.

Таблица 3.

	U _{пр} , В	0,35	0,375	0,4	0,45	0,5
t = t ₁	I _{пр} , мА	0,42	1,10	2,88	19,71	134,89
	C _{диф} , нФ	16,1	42,2	110,5	755,7	5171
	C _{бар} , нФ	0,17	0,19	0,21	0,34	-
t = t ₂	I _{пр} , мА	0,34	0,82	2,00	11,93	71,15

При t₂ = 325 К φ_т = 0,028 В

$$\begin{aligned} \text{Рассчитаем } I_0 &= S \cdot q \cdot \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau}} p_{n0} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau}} n_{p0} \right) = S \left(\sqrt{\frac{kT_2 q \mu_p}{\tau_p}} p_{n0} + \sqrt{\frac{kT_2 q \mu_n}{\tau_n}} n_{p0} \right) = \\ &= 0,1 \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 325 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{10^{-6}}} \left(9,49 \cdot 10^6 \sqrt{600} + 6 \cdot 10^6 \sqrt{1500} \right) = \\ &= 2,7 \cdot 10^{-18} \cdot 10^6 (232 + 232) = 1,25 \cdot 10^{-9} \text{ А} \end{aligned}$$

$$I = 1,25 \cdot 10^{-9} (e^{U/0,028} - 1)$$

Таблица 4.

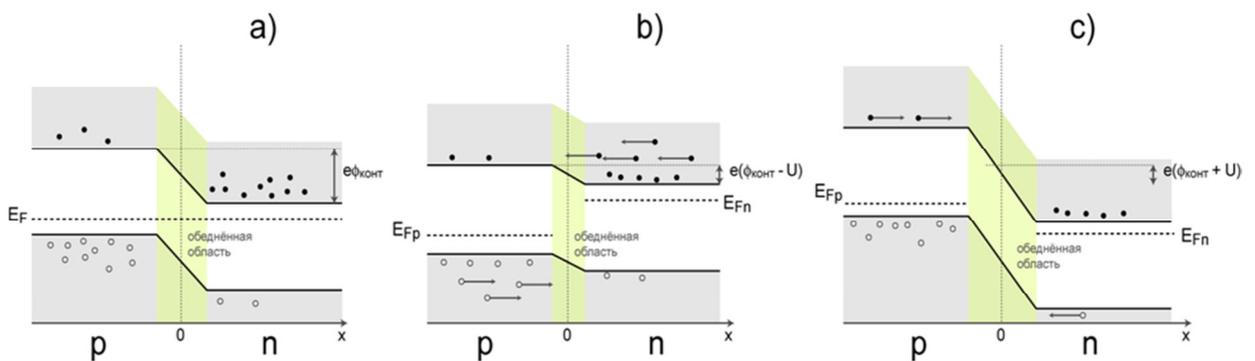
	U _{обр} , В	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-1	-2
t = t ₁	I _{обр} , нА	-0,51	-0,59	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
	C _{бар} , нФ	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,04
t = t ₂	I _{обр} , нА	-1,04	-1,21	-1,25	-1,25	-1,25	-1,25

Ток I_{обр}, определяющий «масштаб» ВАХ, называется тепловым током, поскольку имеет тепловое происхождение и сильно зависит от температуры. Небольшие изменения температуры приводят к резкому изменению теплового тока. Для обратной ветви ВАХ существенное значение имеет термогенерация в области р-п перехода. Область перехода обеднена подвижными носителями, а процесс рекомбинации здесь замедлен. При комнатной температуре для кремниевых приборов ток термогенерации существенно превышает тепловой ток.

9. Изобразим зонные диаграммы в равновесном состоянии, а так же при прямом и обратном напряжении.

Зонные диаграммы p-n перехода.

- a) в равновесном состоянии;
- b) при прямом напряжении;
- c) при обратном напряжении.



10. Рассчитать вольт-фарадные характеристики для барьерной $C_{бар}$ и диффузионной $C_{диф}$ емкостей.

$$C_{диф} = \left(\frac{\tau_{\delta}}{\varphi_T} \right) \cdot I = \frac{0,6 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-6}}{0,026} \left(e^{U/0,026} - 1 \right) = 2,3 \cdot 10^{-14} \left(e^{U/0,026} - 1 \right), \Phi$$

$$C_{бар} = \frac{C_{\delta 0}}{\sqrt{1 - \frac{U}{\varphi_k}}}; \quad C_{\delta 0} = S \sqrt{\frac{q \varepsilon \varepsilon_0 N_{\delta}}{2 \varphi_k}}$$

где $C_{\delta 0}$ - значение барьерной емкости при $U = 0$

$$C_{\delta 0} = 10^{-5} \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 11,8 \cdot 4,67 \cdot 10^{12} \cdot 10^6}{2 \cdot 0,483}} = 8,9 \cdot 10^{-11} \Phi$$

$$C_{бар} = \frac{0,089 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{1 - \frac{U}{0,483}}}$$

Данные при прямом и обратном смещении занесены в табл. 3 и 4.

11. Рассчитать R_0 сопротивление постоянному току и $r_{\text{диф}}$ переменному току на прямой ветви в точке, соответствующей $I_{\text{пр}} = 10$ мА, и обратной ветви в точке, соответствующей $U_{\text{обр}} = 1$ В. По результатам расчета сделать вывод о самом важном свойстве р-п перехода.

R_0 и $r_{\text{диф}}$ на прямой ветви ВАХ в точке, соответствующей $I_{\text{пр}} = 10$ мА и при $U_{\text{обр}} = 1$ В равны

$$r_{\text{диф пр}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{сд}}} \quad r_{\text{диф обр}} = \infty \quad r_{\text{диф пр}} = \frac{0,026}{10 \cdot 10^{-3}} = 2,6 \text{ Ом}$$

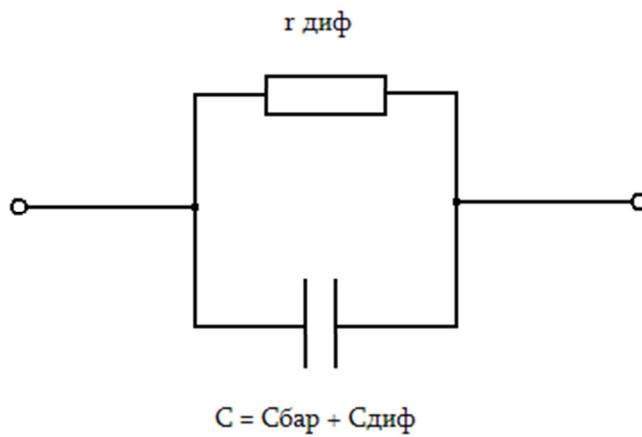
Сопротивление постоянному току определяется в рабочей точке по закону Ома по ВАХ на рис. 1

$$R_0 = \frac{U}{I_0} = \frac{0,42}{0,01} = 42 \text{ Ом} \quad R_{\text{обр}} = \frac{1}{0,6 \cdot 10^{-9}} = 1,7 \cdot 10^9 \text{ Ом}$$

По результатам расчетов сделать вывод о самом важном свойстве р-п перехода: Комбинация двух полупроводниковых слоев с разным типом проводимости обладает выпрямляющими или вентильными свойствами: она гораздо лучше пропускает ток в одном направлении, чем в другом направлении. Выпрямительные свойства такой структуры позволяют использовать ее в качестве полупроводникового диода.

12. Начертить малосигнальную электрическую модель заданного р-п перехода для двух точек из п.11.

Для малых сигналов в заданной рабочей точке нелинейный р-п переход заменяется линейной электрической моделью



Рабочей точке $I_{пр} = 10 \text{ мА}$ при прямом смещении соответствует $U = 0,42 \text{ В}$

$$C = C_{бар} + C_{диф} = 0,24 \text{ нФ} + 250 \text{ нФ} = 250,24 \text{ нФ}$$

При обратном смещении $U = U_{обр}$ $r_{диф} = \infty$,
 поэтому в модели остается только

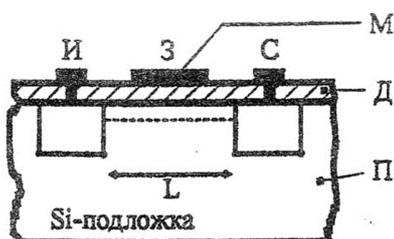
$$C = C_{бар} = 0,05 \text{ нФ}$$

Задача № 2

Задана полупроводниковая структура, в которой управление в канале осуществляется с помощью поперечного электрического поля. Канал - приповерхностный,

$$U_{\text{пор}} = 2 \text{ В}; \quad b_1 = 0,2 \text{ мА/В}^2$$

1. Определить тип канала. Задан n – канал.
2. Изобразить заданную структуру, указать полярность питающих напряжений, назвать выводы и пояснить принцип полевого управления током.



В структурах с приповерхностным каналом металлический (М) затвор изолирован от полупроводникового (П) канала тонким слоем диэлектрика (Д) (МДП – структура). Здесь управление током осуществляется за счет изменения удельного сопротивления канала, вызванного эффектом поля. Канал возникает из-за индукции зарядов (индуцированный канал) при приложении к затвору напряжения больше $U_{\text{пор}}$. Чем больше напряжение на затворе по сравнению с $U_{\text{пор}}$, тем сильнее канал обогащается основными носителями, тем следовательно меньше его ρ и больше ток через канал.

3. Рассчитать и построить стоко-затворные ВАХ в режиме насыщения для двух значений длин канала $L - L_1$, соответствующей заданной в таблице удельной крутизне b_1 и $L_2 = 2L_1$. Сделать вывод о влиянии управляющего действия напряжения затвора на длину канала.

$$I_{c1} = \frac{1}{2} b (U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}})^2 = 0,14 (2 - U_{\text{зи}})^2$$

т.к. $b \propto \frac{Z}{L}$, то

$$I_{c2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} b (U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}})^2 = 0,07 (2 - U_{\text{зи}})^2$$

Результаты расчета сведем в таблицу

Таблица 5.

	$U_{зи}, В$	2	3	4	5	6	7
L ₁	$I_c, мА$	0	0,14	0,56	1,26	2,24	3,5
	$S, мСм$	0	0,28	0,56	0,84	1,12	1,4
L ₂	$I_c, мА$	0	0,07	0,28	0,63	1,12	1,75
	$S, мСм$	0	0,14	0,28	0,42	0,56	0,7

4. Рассчитать и построить зависимость крутизны S от напряжения на затворе для двух заданных в п.3 значений L .

Крутизна характеризует управляющее действие затвора и определяется соотношением

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{cu} = const} ; S_1 = b |U_{пор} - U_{зи}| = 0,28 |2 - U_{зи}| \quad S_2 = \frac{1}{2} b |U_{пор} - U_{зи}| = 0,14 |2 - U_{зи}|$$

Результаты расчета занесены в табл.5.

5. Для трех выбранных значений напряжения на затворе определить напряжение насыщения на стоке и построить семейство стоковых ВАХ, выделив омический участок насыщения (только для одного значения $b = b_1$).

$$U_{cu,нас} = U_{зи} - U_{пор} ; \quad U'_{зи} = 7В \quad U''_{зи} = 5,5В \quad U'''_{зи} = 4,5В$$

$$U'_{cu} = 7 - 2 = 5 В \quad U''_{cu} = 5,5 - 2 = 3,5 В \quad U'''_{cu} = 4,5 - 2 = 2,5 В.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочные данные и физические постоянные.

Заряд электрона $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Свойства Ge & Si при T = 300 К

свойства	Ge	Si
диэлектрическая проницаемость	16	11,8
эффективная плотность состояний в валентной зоне, $N_v, \text{см}^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{18}$	$1,02 \cdot 10^{19}$
эффективная плотность состояний в зоне проводимости, $N_c, \text{см}^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$
ширина запрещенной зоны, эВ	0,66	1,12
подвижность электронов μ_n , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	3900	1500
подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1900	600

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Основы полупроводниковой электроники: учебное пособие М.: Горячая линия - Телеком, 2011.

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=315879>

2. Соколов С.В., Титов Е.В. Электроника: учебное пособие для вузов М.: Горячая

Линия – Телеком, 2013. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=436971>