

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра Электроники и наноэлектроники

Задачи по дисциплине

«Твердотельная электроника»

для студентов, обучающихся по направлению

11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Тема 1: «Полупроводниковые материалы»

- 1.1. Определить тепловые скорости электрона и дырки в кремнии при комнатной температуре и при 200 К (эффективные массы электрона и дырки равны $m_n^* / m_0 = 0,56$ и $m_p^* / m_0 = 0,3$ соответственно).
- 1.2. Во сколько раз подвижность электронов меньше подвижности дырок в предыдущей задаче при условии, что времена свободного пробега одинаковы? Как при этом соотносятся их длины свободного пробега?
- 1.3. Определить величину дрейфовой скорости электрона,двигающегося в полупроводниковом образце от одного контакта к другому, если расстояние между контактами составляет 0,3 мм, величина приложенного к ним напряжения – 10 В. Подвижность электрона принять равной $1200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Во сколько раз эта скорость меньше тепловой скорости, рассчитанной в задаче 1.1 при комнатной температуре? Определите удельную электропроводность и плотность дрейфового тока, если концентрация электронов составляет $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.
- 1.4. Рассчитать, во сколько раз увеличится собственная концентрация носителей заряда в кремнии при увеличении температуры на 100 °С. Считать начальную температуру комнатной. Как при этом изменится проводимость? Считать подвижности электронов и дырок не зависящими от температуры.
- 1.5. Рассчитать, чему равна удельная электропроводность собственного германия при комнатной температуре. Как изменится электропроводность материала, если его охладить до температуры кипения азота (77 К)? Считать подвижности не зависящими от температуры.
- 1.6. Проводятся экспериментальные измерения электрофизических свойств не легированного полупроводникового материала. Для этого образец толщиной d расположили между двумя металлическими контактами сечением S и приложили к ним разность потенциалов 0,5 В. Измерения показали, что при температурах 300 и 500 К величина тока, протекающего между контактами, составляет $5,2 \cdot 10^{-6}$ и $4,2 \cdot 10^{-2}$ А соответственно. Оцените ширину запрещённой зоны. Какой материал этого полупроводника?
- 1.7. Рассчитать, чему равна удельная электропроводность собственного арсенида галлия при комнатной температуре? Как изменится электропроводность материала, если его легировать марганцем Mn (донорная примесь) до концентрации $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$?
- 1.8. Перед технологом стоит задача получить образец электронного германия толщиной 2 мм и сечением 5 мкм^2 с сопротивлением 0,5 МОм. Рассчитайте, какова должна быть концентрация примеси.

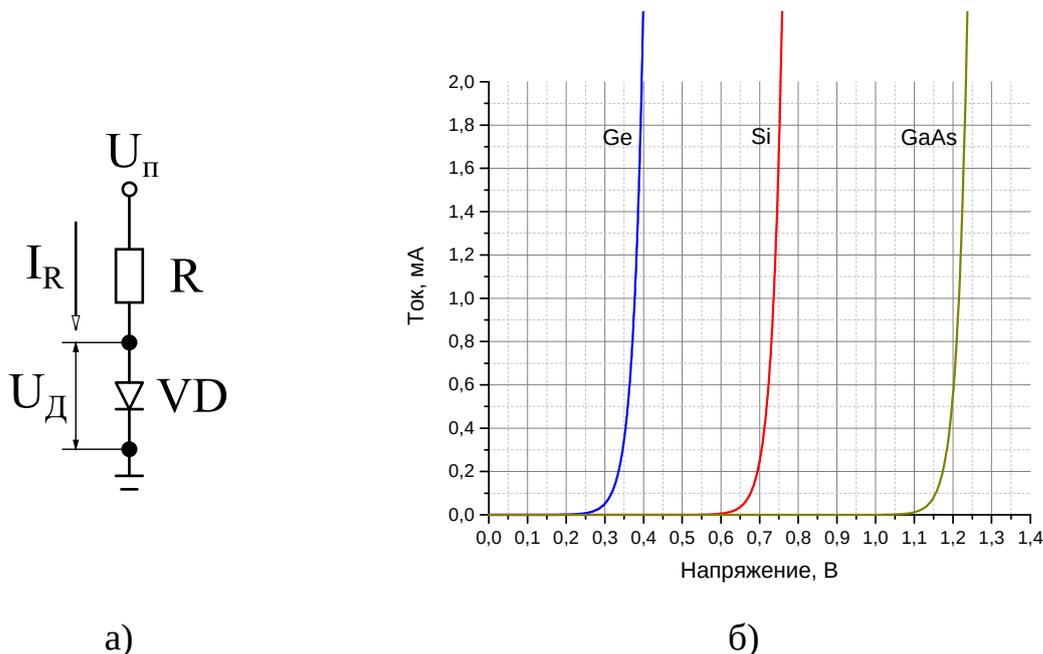
- 1.9. При приложении напряжения 10 В к планарным омическим контактам на полупроводниковом образце величина тока составила 10 мА. Расстояние между контактами 0,5 мм, сечение образца – 150 мкм². Образец представляет собой кремний, легированный бором до концентрации $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Определите дрейфовую скорость, среднее время и длину свободного пробега носителей заряда, если их эффективная масса равна $m^* / m_0 = 0,3$.
- 1.10. В некоторой точке однородного бесконечно большого электронного кремниевого образца при отсутствии внешнего электрического поля световым зондом генерируются основные носители заряда. Считая задачу одномерной, определите диффузионную длину неравновесных носителей заряда, если на расстоянии 2 мм от зонда их концентрация равна $1 \cdot 10^{14}$ см⁻³, а на расстоянии 4,3 мм – $1 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Чему равно время жизни? Чему равна концентрация неравновесных носителей заряда в месте воздействия световым пучком? Определите величину плотности диффузионного тока в том же месте. Размерами пучка пренебречь. Равновесная концентрация равна $1 \cdot 10^{11}$ см⁻³, подвижность основных носителей заряда принять равной 1500 см²/(В·с).
- 1.11. Рабочий диапазон германиевого полупроводникового прибора составляет от -30 до +50 °С. Определите, в каком состоянии находится примесь в этом интервале, если германий легирован сурьмой Sb до концентрации $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (уровень сурьмы $E_d = E_c - 0,01$ эВ). Рассчитать то же, но для кремния (уровень сурьмы в кремнии $E_d = E_c - 0,043$ эВ). Аналогично рассчитать для арсенида галлия, легированного магнием Mg (уровень магния $E_a = E_v + 0,029$ эВ).
- 1.12. Кремний легировали сурьмой Sb до концентрации $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Во сколько раз возрастёт концентрация неосновных носителей заряда при нагреве материала на 50 °С от комнатной температуры? Во сколько раз при этом возрастёт проводимость? Температурной зависимостью подвижности пренебречь.
- 1.13.

Тема 2: «Полупроводниковые диоды»

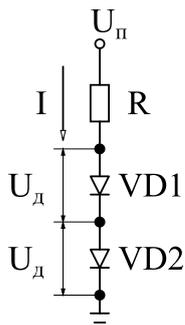
- 2.1. Концентрация легирующей примеси в базе кремниевого n^+p -перехода составляет $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а в эмиттере – $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Чему равна контактная разность потенциалов? Какова ширина области пространственного заряда (ОПЗ) при отсутствии смещения? Какова ширина ОПЗ в n - и p -областях? Чему равна максимальная напряжённость электрического поля в pn -переходе?
- 2.2. Рассчитать те же величины, что и в предыдущей задаче, но для арсенид-галлиевого pn -перехода при концентрациях доноров и акцепторов равных $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре в отсутствии смещения. Каковы величины плотностей тока насыщения и генерационно-рекомбинационного тока? Во сколько раз генерационно-рекомбинационная составляющая больше тока насыщения? Времена жизни электронов и дырок равны 0,5 и 10 нс соответственно.
- 2.3. Даны два диода. Концентрации легирующих примесей в p - и n -областях второго диода в 10 раз больше, чем у первого. При прочих равных условиях определите отношение токов насыщения обоих приборов.
- 2.4. Для задачи 2.1 рассчитайте дырочную и электронную составляющие плотности тока насыщения. Во сколько раз они различаются? Какова полная величина плотности тока насыщения? Времена жизни неосновных носителей заряда в эмиттере и базе диода одинаковы и равны 10 нс. Определите, как и в задаче 2.2, величину генерационно-рекомбинационной составляющей плотности тока, а также отношение плотностей тока генерации-рекомбинации и насыщения (эффективное время жизни носителей заряда принять равным 20 нс).
- 2.5. Для задач 2.1 и 2.4 определите, на сколько уменьшится величина контактной разности потенциалов при увеличении температуры диода на $100 \text{ }^\circ\text{C}$? Во сколько раз при этом возрастёт полный ток насыщения? Считать подвижности носителей заряда не зависящими от температуры. Начальная температура – комнатная.
- 2.6. Как и на сколько изменится контактная разность потенциалов в pn -переходе, если концентрацию легирующей примеси в одной из квазинейтральных областей увеличить в 100 раз? Температуру pn -перехода считать комнатной.
- 2.7. Концентрация легирующей примеси в базе несимметричного кремниевого диода со структурой n^+p составляет $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Сечение перехода равно 5 мм^2 , длина базовой области – 150 мкм. Рассчитайте сопротивление квазинейтральной области при комнатной температуре. Чему равен ток насыщения диода? Времена жизни неосновных носителей заряда принять равными 10 нс.

2.8. Пользуясь теоретической зависимостью вольтамперной характеристики для идеального pn -перехода, рассчитайте при комнатной температуре статическое и дифференциальное сопротивление диода при напряжениях 0,2 и 0,4 В, если его ток насыщения равен 10 нА. Чему равны эти величины при напряжениях минус 2 и минус 4 В?

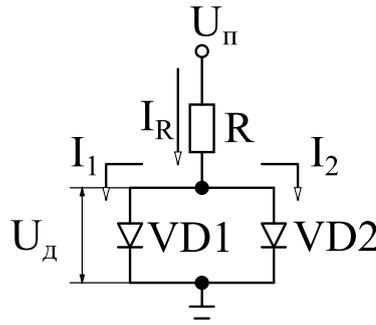
2.9. Графически определите ток через резистор R , сопротивление которого равно 1 кОм, и напряжения на диоде VD (в случае различных материалов диодов: Ge, Si, GaAs) и резисторе, если напряжение питания U_{Π} составляет +2 В. Вольт-амперная характеристика диода дана справа. Определите статическое и дифференциальное сопротивления диода.



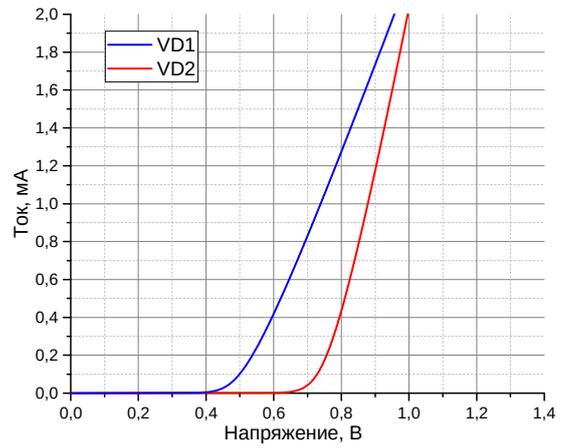
2.10. Графически определите ток через резистор R , сопротивление которого равно 5 кОм, и для случая (а) – напряжения на каждом диоде $VD1$ и $VD2$, а для случая (б) – напряжение на диодах и ток через каждый диод, если напряжение питания U_{Π} составляет +10 В. Вольт-амперные характеристики диодов даны справа. Определите статическое и дифференциальное сопротивления диодов, а также сопротивления баз и контактные разности потенциалов обоих диодов.



а)

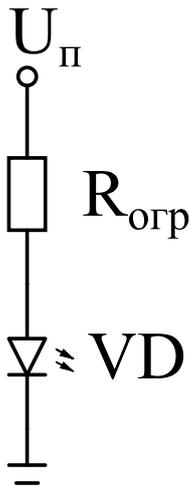


б)

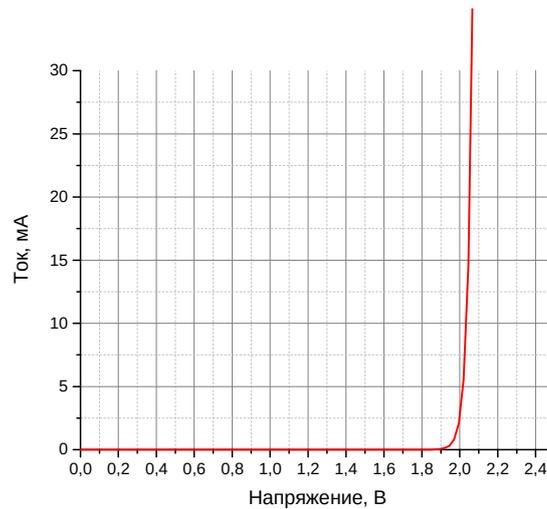


в)

2.11. Известно, что зелёный светодиод на основе GaP ($E_g = 2,26$ эВ), легированный азотом GaP:N, светит при токе 20 мА. Оцените, в каких пределах может варьироваться сопротивление ограничительного резистора $R_{огр}$, если предельная мощность светодиода составляет 100 мВт? Напряжение питания $U_{п}$ составляет +3,3 В. Вольт-амперная характеристика светодиода дана справа.



а)



б)

2.12. Определите напряжение лавинного пробоя германиевого диода на основе p^+n -перехода при концентрации примеси в слаболегированной квазинейтральной области $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Чему при тех же условиях равно напряжение пробоя в кремниевом и арсенид-галлиевом диодах?

2.13. Концентрация легирующей примеси в германиевом pn -переходе равна $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в каждой из квазинейтральных областей. Определите удельную барьерную ёмкость при отсутствии смещения. Чему равна полная ёмкость, если сечение pn -перехода составляет 5 мм^2 ? Определите сопротивление диода, если обе квазинейтральной области имеют толщину 100 мкм. Какова постоян-

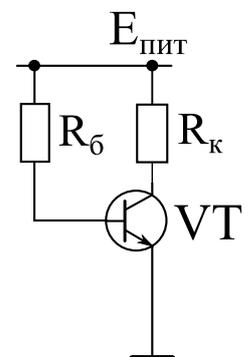
ная времени перезарядки RC -цепочки, образованной барьерной ёмкостью и сопротивлением базы диода?

- 2.14. При напряжении смещения минус 10 В ёмкость pn -перехода на основе GaAs составляет 3,03 нФ, а при напряжении минус 20 В – 2,2 нФ. Площадь pn -перехода равна 10 мм^2 . Какова величина контактной разности потенциалов? Определите уровень легирования n -области, если p -область легирована до концентрации $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Тема 3: «Биполярные транзисторы»

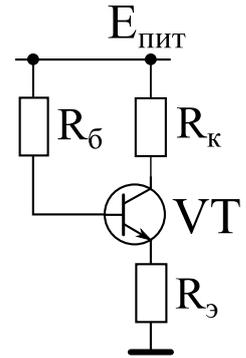
- 3.1. В эмиттере кремниевого *pnp*-транзистора дырочная составляющая тока в 100 раз больше электронной. Определите коэффициент инжекции из эмиттера в базу. Чему будет равен этот коэффициент, если отношение этих же токов равно 10?
- 3.2. В биполярном кремниевом *pnp*-транзисторе легирование эмиттера и базы составляет $1 \cdot 10^{18}$ и $1 \cdot 10^{16}$ см^{-3} соответственно. При условии, что времена жизни неосновных носителей заряда равны 10 нс, определите коэффициент инжекции. Ширину базы принять равной 3 мкм. Чему он будет равен, если легирования эмиттера и базы будет равным $1 \cdot 10^{16}$ см^{-3} ? и если они будут равны $1 \cdot 10^{18}$ см^{-3} ? В каком из трёх случаев эффективность инжекции эмиттером носителей заряда в базу выше?
- 3.3. Биполярный *pnp*-транзистор имеет ширину базы равную 3 мкм. Рассчитайте коэффициент переноса, если диффузионная длина неосновных носителей заряда в базе равна 0,3, 2 и 5 мкм. В каком случае эффективность переноса носителей заряда выше? Чему равны коэффициенты передачи тока базы и эмиттера, если коэффициент инжекции равен 0,995?
- 3.4. Определите коэффициент передачи тока эмиттера в кремниевом *pnp*-транзисторе, если коэффициент инжекции равен 0,995. Диффузионная длина неосновных носителей заряда в базе равна 2 мкм, технологическая толщина базы составляет 0,5 мкм. Чему равны коэффициенты передачи тока базы и эмиттера при нулевых смещениях на эмиттерном и коллекторном переходах? Как изменятся эти коэффициенты (абсолютное их изменение), если напряжение смещения на эмиттерном переходе равно плюс 0,7 В, а на коллекторном переходе меняется от минус 5 до минус 15 В? Степени легирования эмиттера – $1 \cdot 10^{18}$ см^{-3} , базы – $1 \cdot 10^{16}$ см^{-3} , коллектора – $1 \cdot 10^{14}$ см^{-3} .

- 3.5. Определите потенциал коллектора и токи через резисторы в коллекторной и базовой цепях. Напряжение питания принять равным +15 В, номиналы резисторов R_b и R_k – 12 кОм и 200 Ом соответственно. Коэффициент передачи тока эмиттера кремниевого транзистора VT равен 0,98. Транзистор работает в активном нормальном режиме.

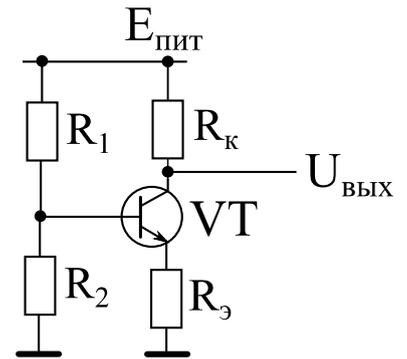


- 3.6. Рассчитайте для предыдущей схемы номиналы сопротивлений, обеспечивающие на коллекторе транзистора потенциал +7 В и ток коллектора 12 мА при напряжении питания +10 В.

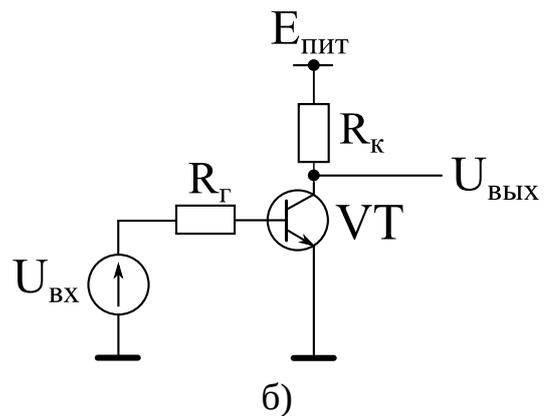
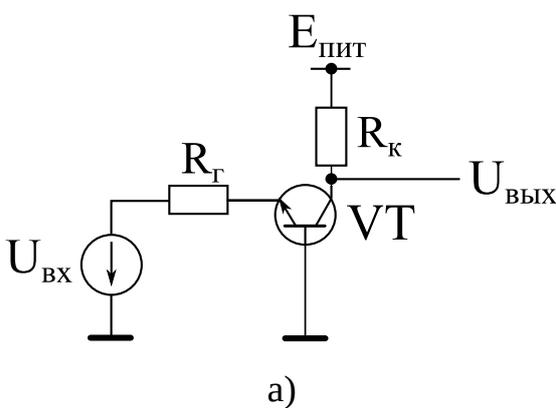
3.7. Рассчитайте номиналы резисторов, обеспечивающих такую же рабочую точку, как и в предыдущей задаче, при условии, что резисторы в цепях эмиттера и коллектора равны. Чему равны потенциалы эмиттера и базы?



3.8. Определите напряжение на выходе $U_{\text{вых}}$ кремниевого транзистора, коэффициент передачи тока базы которого равен 100. Сопротивления в цепи базы R_1 и R_2 равны 5 кОм каждое, в цепи коллектора $R_к$ равно 2 кОм, $R_э$ в цепи эмиттера – 3 кОм. Напряжение питания $E_{\text{пит}}$ составляет +5 В. Чему равны потенциалы эмиттера и базы? Транзистор работает в активном нормальном режиме.

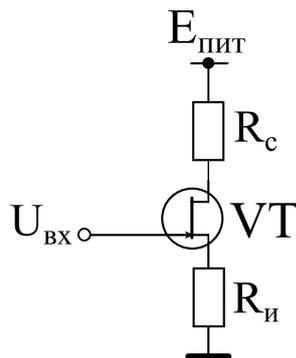


3.9. Резистор в цепи коллектора имеет сопротивление 5 кОм, коэффициент передачи тока базы кремниевого транзистора VT равен 50. Ограничительный резистор $R_г$ какого номинала необходимо поставить во входную цепь в случаях (а) и (б), чтобы при напряжении источника на входе +1 В обеспечить на выходе +4 В при напряжении питания +5 В? Какие при этом будут протекать токи в цепи коллектора и во входной цепи?



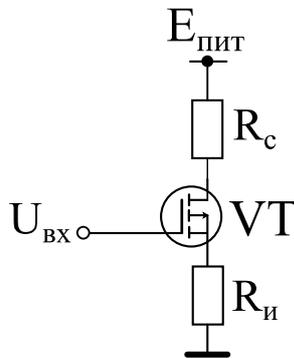
Тема 4: «Полевые транзисторы»

- 4.1. Степени легирования канала и подзатворной области в кремниевом ПТУП составляют $1 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Расстояние между подзатворными областями составляет 1,2 мкм, длина канала равна 20 мкм, а площадь поперечного сечения канала – 12 мкм². Определите сопротивление полностью открытого канала, величину напряжения отсечки. Рассчитайте, чему равна максимальная крутизна такого транзистора? Подвижность основных носителей заряда в канале принять равной $1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.
- 4.2. Для схемы с полевым транзистором, нарисованной ниже, определите тип проводимости канала, знак входного напряжения и напряжения питания, а также рассчитайте величину выходного тока, если $|U_{\text{вх}}| = 0,5 \text{ В}$, $|E_{\text{пит}}| = 3 \text{ В}$ при сопротивлениях в цепях стока и истока равными 5 кОм каждое. Определите потенциалы стока и истока, а также величину напряжения между стоком и истоком транзистора VT. Чему будут равны эти же величины, если напряжение на входе будет $|U_{\text{вх}}| = 1,8 \text{ В}$? В качестве параметров транзистора VT использовать результаты предыдущей задачи.



- 4.3. Рассчитайте величину поверхностного потенциала в кремниевом МДП-транзисторе с индуцированным *n*-каналом при комнатной температуре, если концентрация примеси в объёмной части полупроводника составляет $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.
- 4.4. Перед Вами стоит задача получения *n*-канального МДП-транзистора с индуцированным каналом с крутизной равной 3 мА/В при напряжении на затворе +5 В, при этом пороговое напряжение составляет +2 В. Канал транзистора имеет длину в 10 раз меньше его ширины. Какова при этом должна быть толщина диэлектрика, если используется оксид кремния SiO₂? и если используется нитрид кремния Si₃N₄? Диэлектрические проницаемости ϵ_r оксида и нитрида кремния принять равными 4 и 7 соответственно. Подвижность электронов в приповерхностной области принять равной $1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

- 4.5. Как изменится крутизна МДП-транзистора при увеличении длины и ширины канала в 3 раза? при увеличении только длины в 3 раза? при увеличении только ширины в 3 раза?
- 4.6. Для схемы, представленной ниже, определите тип транзистора, знаки напряжения питания и напряжения на входе. Рассчитайте ток стока, потенциал на стоке и истоке кремниевого транзистора VT, если сопротивление в цепи стока равно 5 кОм, а в цепи истока – 10 кОм. Концентрация примеси в объёмной части полупроводника составляет $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина диэлектрика SiO_2 равна 20 нм, расстояние между стоковой и истоковой областями – 0,5 мкм, ширина канала 3 мкм. Считать поверхностный заряд равным $2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$, подвижность носителей заряда в канале $1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Чему равна удельная крутизна транзистора? Напряжения равны $|U_{\text{вх}}| = 1,5 \text{ В}$, $|E_{\text{пит}}| = 3,3 \text{ В}$.



СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

	Ge	Si	GaAs
Ширина запрещённой зоны E_{g0} при 0 К, эВ	0,74	1,17	1,52
Температурный коэффициент ширины запрещённой зоны α , $\cdot 10^{-4}$ эВ/К	-2,4	-3,9	-4,3
Ширина запрещённой зоны E_{g300} при 300 К, эВ	0,66	1,12	1,42
Плотность состояний в зоне проводимости N_c при 300 К, $\cdot 10^{19}$ см ⁻³	1,04	2,8	0,047
Плотность состояний в валентной зоне N_v при 300 К, $\cdot 10^{19}$ см ⁻³	0,6	1,04	0,07
Собственная концентрация n_i при 300 К, см ⁻³	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^6$
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r	16	11,9	13,1
Подвижность электронов μ_n , см ² /(В·с)	3900	1500	8500
Подвижность дырок μ_p , см ² /(В·с)	1900	450	400

Элементарный заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Постоянная Больцмана $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,625 \cdot 10^{-5}$ эВ/К

Масса покоя электрона $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг

Диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см

Химические элементы III группы таблицы Менделеева: В, Al, Ga, In

Химические элементы IV группы таблицы Менделеева: С, Si, Ge

Химические элементы V группы таблицы Менделеева: N, P, As, Sb

ФОРМУЛЫ

Полупроводниковый материал

Средняя тепловая скорость частицы $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{3k_B T}{m^*}}$

Дрейфовая скорость частицы $v_{др} = \mu E$

Подвижность частицы $\mu = \frac{q \langle \tau_{св} \rangle}{m^*}$

Длина свободного пробега $\langle l_{св} \rangle = \langle v_T \rangle \cdot \langle \tau_{св} \rangle$

Коэффициент диффузии $D = \frac{k_B T}{q} \mu$

Диффузионная длина $L = \sqrt{D \cdot \tau}$

Удельная электропроводность $\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q \mu_n n + q \mu_p p$

Плотность тока

$$j_n = q \mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx} = q \mu_n n \frac{d\phi}{dx} + q D_n \frac{dn}{dx};$$

$$j_p = q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx} = q \mu_p p \frac{d\phi}{dx} - q D_p \frac{dp}{dx}.$$

Уравнение непрерывности $\frac{\partial n}{\partial t} = G - R + \frac{1}{q} \operatorname{div} j$

Уравнение электронейтральности $\sum Q = 0 \rightarrow \sum N^+ = \sum N^-$

Ширина запрещённой зоны $E_g(T) = E_g^0 + \alpha \cdot T, \alpha < 0$

Плотность квантовых состояний

$$N_c(T) = N_c^{300} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2};$$

$$N_v(T) = N_v^{300} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}.$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

Собственная концентрация

Равновесные носители заряда $n_{n0} p_{n0} = p_{p0} n_{p0} = n_i^2$

$$n_n p_n = p_p n_p = n_i^2 \exp\left(\frac{F_n^* - F_p^*}{k_B T}\right)$$

Неравновесные носители заряда

Полупроводниковый диод

$$\varphi_{\kappa} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)$$

Контактная разность потенциалов

Ширина области пространственного заряда

$$W_{\text{ОПЗ}} = W_n + W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{q} (\varphi_{\kappa} - U) \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)};$$

$$W_n = W_{\text{ОПЗ}} \cdot \frac{N_a}{N_d + N_a};$$

$$W_p = W_{\text{ОПЗ}} \cdot \frac{N_d}{N_d + N_a}$$

$$j_s = \frac{qD_n}{L_n} n_{p0} + \frac{qD_p}{L_p} p_{n0}$$

Плотность тока насыщения

$$\tau_{\text{эфф}} = \sqrt{\tau_n \tau_p} \ln \frac{\tau_p}{\tau_n}$$

Эффективное время жизни

$$j_{gr}(U) = \frac{qn_i W_{\text{ОПЗ}}(U)}{\tau_{\text{эфф}}}$$

Плотность тока генерации-рекомбинации

$$r_{n,p}(U) = \frac{1}{\sigma_{n,p}} \cdot \frac{d_{n,p} - W_{n,p}(U)}{S_{pn}}$$

Сопротивление квазинейтральной области диода

Сопротивление тела диода $r_d = r_n + r_p \approx r_p$

Вольтамперная характеристика реального диода

$$\begin{cases} I_{pn}(U_{pn}) = I_s \left[\exp \left(\frac{qU_{pn}}{k_B T} \right) - 1 \right] + I_{gr}(U) \left[\exp \left(\frac{qU_{pn}}{2k_B T} \right) - 1 \right], \\ U(U_{pn}) = U_{pn} + I_{pn}(U_{pn}) r_d(U_{pn}). \end{cases}$$

Биполярный транзистор

Коэффициент инжекции дырок

$$Y_p = \frac{I_p}{I} = \frac{I_p}{I_p + I_n} = \left(1 + \frac{N_B}{N_E} \frac{D_E}{D_B} \frac{L_B}{L_E} \cdot \operatorname{th} \left(\frac{W_{Бэфф}}{L_B} \right) \right)^{-1}$$

Коэффициент переноса дырок

$$\kappa = \frac{I_{pk}}{I_{pэ}} = \operatorname{ch}^{-1} \left(\frac{W_{Бэфф}}{L_B} \right)$$

Коэффициент передачи тока эмиттера (нормальный) $\alpha_N = Y_N \cdot \kappa_N$

Коэффициент передачи тока эмиттера (инверсный) $\alpha_I = Y_I \cdot \kappa_I$

Коэффициент передачи тока базы $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$

Входная вольтамперная характеристика в схеме с общей базой

$$I_{Э}(U_{ЭБ}) \Big|_{U_{КБ} = \text{const}} = I_S^{\text{ЭП}} \left[\exp \left(\frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T} \right) - 1 \right] - \alpha_I I_S^{\text{КП}} \left[\exp \left(\frac{U_{КБ}}{\varphi_T} \right) - 1 \right].$$

Выходная вольтамперная характеристика в схеме с общей базой

$$I_{К}(U_{КБ}) \Big|_{I_{Э} = \text{const}} = \alpha_N I_{Э} - I_{К0} \left[\exp \left(\frac{U_{КБ}}{\varphi_T} \right) - 1 \right];$$

$$I_{К0} = (1 - \alpha_N \alpha_I) I_S^{\text{КП}};$$

$$U_{КБ} \gg \varphi_T \rightarrow I_{К} = \alpha_N I_{Э}$$

Входная вольтамперная характеристика в схеме с общим эмиттером

$$I_{Б}(U_{БЭ}) \Big|_{U_{БЭ} = \text{const}} = \left[(1 - \alpha_N) I_S^{\text{ЭП}} + (1 - \alpha_I) I_S^{\text{КП}} \exp \left(\frac{U_{КЭ}}{\varphi_T} \right) \right] \cdot \left[\exp \left(\frac{-U_{БЭ}}{\varphi_T} \right) - 1 \right] + \dots$$

$$+ (1 - \alpha_I) I_S^{\text{КП}} \left[\exp \left(\frac{U_{КЭ}}{\varphi_T} \right) - 1 \right]$$

Выходная вольтамперная характеристика в схеме с общим эмиттером

$$I_K(U_{KЭ}) \Big|_{I_B = \text{const}} = \beta_N I_B - (1 + \beta_N) I_{K0} \left[\exp \left(\frac{U_{KЭ} - U_{БЭ}(I_B, U_{KЭ})}{\varphi_T} \right) - 1 \right];$$

$$I_{K0} = (1 - \alpha_N \alpha_I) I_S^{\text{КП}};$$

$$U_{БЭ}(I_B, U_{KЭ}) = \varphi_T \ln \left[\frac{(1 - \alpha_N) I_S^{\text{ЭП}} + (1 - \alpha_I) I_S^{\text{КП}} \exp \left(\frac{U_{KЭ}}{\varphi_T} \right)}{(1 - \alpha_N) I_S^{\text{ЭП}} + (1 - \alpha_I) I_S^{\text{КП}} + I_B} \right];$$

$$U_{KЭ} \gg \varphi_T \rightarrow I_K = \beta_N I_B.$$

Связь токов в биполярном транзисторе (для нормального усилительного режима)

$$I_{Э} = I_B + I_K;$$

$$I_K = \alpha_N I_{Э};$$

$$I_K = \beta_N I_B;$$

$$I_{Э} = (\beta_N + 1) I_B.$$

Полевой транзистор с управляющим pn -переходом

$$R_0 = \rho \frac{L}{d_0 W}$$

Сопротивление открытого канала

$$U_{отс} = \varphi_k - \frac{qN_{a,d}}{8\epsilon_0\epsilon_r} \cdot d_0^2$$

Напряжение отсечки

$$I_{c_{max}} = \frac{U_{отс} + \varphi_k}{3R_0}$$

Максимальная величина тока стока

$$S(U_{зи}) = \left. \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} \right|_{U_{си}}$$

Крутизна

$$S_{max} = - \frac{2I_{c_{max}}}{U_{отс}}$$

Максимальная крутизна

Передаточная вольтамперная характеристика

$$I_c(U_{зи}) \Big|_{U_{си} = \text{const}} = \begin{cases} I_{c_{max}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи} + \varphi_k}{U_{отс} + \varphi_k} \right)^2, & |U_{зи}| < |U_{отс}| \\ 0, & |U_{зи}| \geq |U_{отс}| \end{cases}$$

Выходная вольтамперная характеристика

$$I_c(U_{си}) \Big|_{U_{зи} = \text{const}} = \begin{cases} \frac{1}{R_0} \left[U_{си} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(\varphi_k + U_{зи} + U_{си})^{3/2} - (\varphi_k + U_{зи})^{3/2}}{(\varphi_k + U_{отс})^{1/2}} \right], & U_{си} + U_{зи} < U_{отс} \\ I_{c_{max}} \cdot \left[1 - 3 \cdot \frac{U_{зи} + \varphi_k}{U_{отс} + \varphi_k} + 2 \cdot \left(\frac{U_{зи} + \varphi_k}{U_{отс} + \varphi_k} \right)^{3/2} \right], & U_{си} + U_{зи} \geq U_{отс} \end{cases}$$

Полевой транзистор на основе МДП-структуры с индуцированным каналом

Объёмный потенциал $\varphi_B = \varphi_T \ln \frac{N_{a,d}}{n_i}$

Поверхностный потенциал $\varphi_S = 2\varphi_B$

Удельная ёмкость затвора $C_3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{t_d}$

Поверхностный заряд в ОПЗ $Q_{\text{ОПЗ}} = qN_{a,d}W_{\text{ОПЗ}}$

Пороговое напряжение $U_{\text{пор}} = \varphi_S + \frac{Q_S + Q_{\text{ОПЗ}}}{C_3}$

Крутизна $S(U_{\text{зи}}) = \left. \frac{\partial I_c}{\partial U_{\text{зи}}} \right|_{U_{\text{си}}}$

Удельная крутизна $b = \mu_s C_3 \frac{W}{L}$

Передаточная вольтамперная характеристика

$$I_c(U_{\text{зи}}) \Big|_{U_{\text{си}} = \text{const}} = \begin{cases} 0, & |U_{\text{зи}}| < |U_{\text{пор}}| \\ \frac{1}{2} b (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})^2, & |U_{\text{зи}}| \geq |U_{\text{пор}}| \end{cases}$$

Выходная вольтамперная характеристика

$$I_c(U_{\text{си}}) \Big|_{U_{\text{зи}} = \text{const}} = \begin{cases} b \cdot \left[(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right], & |U_{\text{си}}| < |U_{\text{зи}}| - |U_{\text{пор}}| \\ \frac{1}{2} b \cdot (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})^2, & |U_{\text{си}}| \geq |U_{\text{зи}}| - |U_{\text{пор}}| \end{cases}$$