

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Петрозаводский государственный университет»

В. А. Гуртов, О. Н. Ивашенков

**Сборник задач по микроопто-
электронике**

Петрозаводск 2005

Оглавление

1. Статистика электронов и дырок в полупроводниках	3
2. Диффузия и дрейф. Генерация и рекомбинация	4
3. Барьеры Шоттки и <i>p-n</i> переходы. Диоды	5
4. Биполярные транзисторы.....	6
5. МДП-структуры.....	7
6. Полевые транзисторы.....	8
7. Оптоэлектроника.....	9
8. Интегральные микросхемы.....	10
СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ	14
Физические параметры важнейших полупроводников	14
Работа выхода из металлов (эВ).....	14
Свойства диэлектриков.....	14
ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ.....	15
1. Статистика электронов и дырок в полупроводниках	15
2. Диффузия и дрейф. Генерация и рекомбинация	18
3. Барьеры Шоттки и <i>p-n</i> переходы. Диоды	20
4. Биполярные транзисторы.....	23
5. МДП-структуры	24
6. Полевые транзисторы.....	29
7. Оптоэлектроника.....	30
8. Интегральные микросхемы.....	31
Литература.....	36

Задачи

1. Статистика электронов и дырок в полупроводниках

1.1. Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии Si, германии Ge, арсениде галлия GaAs и антимониде индия InSb при комнатной температуре $T = 300\text{ К}$ и температуре жидкого азота $T = 77\text{ К}$.

1.2. Кремний Si и арсенид галлия GaAs легированы донорной примесью до концентрации $N_D = 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда при температуре $T = 300\text{ К}$.

1.3. Рассчитать объемное положение уровня Ферми φ_0 относительно середины запрещенной зоны в собственных полупроводниках – кремнии Si, и антимониде индия InSb при температурах $T_1 = 300\text{ К}$ и $T_2 = 77\text{ К}$ (с учетом различных значений эффективных масс электронов и дырок).

1.4. Найти объемное положение уровня Ферми φ_0 в германии Ge марки ГДА–10 при температуре $T = 300\text{ К}$.

1.5. Рассчитать объемное положение уровня Ферми φ_0 относительно середины запрещенной зоны в электронном и дырочном антимониде индия InSb при азотной температуре $T = 77\text{ К}$ и концентрации легирующей примеси $N_{D,A} = 10^{15}\text{ см}^{-3}$.

1.6. Рассчитать положение уровня Ферми φ_0 в приближении полностью ионизованной примеси в кремнии марки КЭФ–4.5 при температурах $T_1 = 300\text{ К}$ и $T_2 = 77\text{ К}$.

1.7. Найти удельное сопротивление ρ электронного и дырочного кремния Si с легирующей примесью $N_{D,A} = 10^{16}\text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

1.8. Рассчитать собственное удельное сопротивление ρ_i монокристаллов кремния Si, германия Ge, арсенида галлия GaAs и антимонида индия InSb при комнатной температуре.

1.9. Найти концентрацию легирующей акцепторной примеси для кремния Si и германия Ge, при которой наступает вырождение концентрации свободных носителей заряда при комнатной температуре $T = 300\text{ К}$.

1.10. Найти, как изменится объемное положение уровня Ферми φ_0 в электронном арсениде галлия GaAs с $\rho = 1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ при изменении температуры от $T = 300\text{ К}$ до $T = 77\text{ К}$.

1.11. Полупроводники кремний Si, германий Ge, арсенид галлия GaAs и антимонид индия InSb легированы донорной примесью до концентрации $N_D = 10^{15}\text{ см}^{-3}$. Найти граничную температуру $T_{гр}$, при которой собственная концентрация носителей заряда n_i еще ниже концентрации основных носителей n_0 .

1.12 Качественно представить на графике зависимость концентрации электронов в частично компенсированном полупроводнике ($N_D > N_A$) $\ln n$ от $\frac{1}{T}$.

Оценить границы области температур, в которых $n \approx N_D - N_A$ для кремния, легированного мышьяком $E_D = E_C - 0,05$ эВ.

2. Диффузия и дрейф. Генерация и рекомбинация

2.1. В образце p -Si, находящемся при $T = 300$ К, распределение примеси вдоль

оси x : $N_A(x) = N \cdot e^{-\frac{x}{x_0}}$, где $x_0 = 0,5$ мкм. Считая $p(x) = N_A(x)$, вычислить напряженность внутреннего электрического поля E_i и плотности диффузионного и дрейфового токов дырок в зависимости от N . Считать $D_p = 10 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ и $\mu_p = 400 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.2. Образец n -Si с удельным сопротивлением $0,6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ содержит $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ центров генерации-рекомбинации, расположенных на уровне Ферми для материала с собственной проводимостью. Сечения захвата носителей заряда $\sigma_t = 10^{-15} \text{ см}^2$, тепловая скорость $v_t = 10^7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

1) Вычислить скорость генерации, если область обеднена подвижными носителями заряда;

2) Вычислить скорость генерации в области, где только концентрация неосновных носителей заряда снижена по сравнению с равновесным значением.

2.3. Свет падает на образец кремния, легированный донорами с концентрацией $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При этом генерируется $10^{21} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ электронно-дырочных пар. Генерация происходит равномерно по образцу. Имеется 10^{15} см^{-3} центров генерации-рекомбинации с энергией $E_t = E_i$, поперечные сечения захвата электронов и дырок равны 10^{-14} см^2 . Рассчитать:

1) установившиеся концентрации электронов и дырок после включения света,

2) время релаксации системы после выключения света τ_p и время жизни τ_0 .

2.4. Образец арсенида галлия GaAs подвергается внешнему воздействию, в результате которого генерируется $10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ электронно-дырочных пар.

Уровень легирования $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, время жизни $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $T = 300 \text{ К}$. Вычислить: 1) коэффициент рекомбинации; 2) избыточную концентрацию неосновных носителей заряда.

2.5. Концентрация электронов в однородном слаболегированном n -Si при комнатной температуре линейно спадает от 10^{17} см^{-3} при $x = 0$ до $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $x = 2$ мкм и все время поддерживается постоянной. Найти плотность тока электронов при отсутствии электрического поля. Подвижность при данном уровне легирования считать $\mu = 1000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.6. Вычислить относительное изменение проводимости $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}$ при стационарном освещении с интенсивностью $I = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в германии. Коэффициент поглощения $\gamma = 100 \text{ см}^{-1}$, толщина образца много меньше γ^{-1} . Рекомбинация происходит на простых дефектах, время жизни $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, равновесная концентрация электронов $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3. Барьеры Шоттки и p-n переходы. Диоды

3.1. Найти, чему равна высота потенциального барьера ϕ_k в диоде Шоттки электронный германий *n*-Ge – золото Au. Нарисовать зонную диаграмму контакта при термодинамическом равновесии. Удельное сопротивление полупроводника $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

3.2. Рассчитать, чему равна ширина области обеднения при внешних напряжениях $V = +0,4 \text{ В}$, $V = -2 \text{ В}$ и в равновесных условиях в диоде *n*-Si – Pt. Нарисовать зонную диаграмму контакта при термодинамическом равновесии.

3.3. Для барьера Шоттки электронный арсенид галлия – золото GaAs – Au рассчитать, чему равно максимальное электрическое поле E в области пространственного заряда при внешних напряжениях $V = +0,3 \text{ В}$, $V = 0 \text{ В}$ и $V = -100 \text{ В}$. $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

3.4. Чему равны электрическое поле E и потенциал ϕ в барьере Шоттки *n*-Si – Au при напряжении $V = -5 \text{ В}$ на расстоянии $z = 1,2 \text{ мкм}$ от границы раздела кремний – золото. $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

3.5. Найти, чему равны плотности тока j в барьере Шоттки *n*-GaAs – Pt при внешнем напряжении $V = +0,5 \text{ В}$ и $V = -5 \text{ В}$. Чем обусловлены эти токи? $\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

3.6. Рассчитать высоту потенциального барьера ϕ_k в *p-n* переходе *n*-Ge – *p*-Ge с объемным сопротивлением $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Как изменится высота потенциального барьера на границе при изменении напряжения от $V = +0,15 \text{ В}$ до $V = -5 \text{ В}$. Нарисовать зонные диаграммы.

3.7. Найти максимальное электрическое поле E и ширину областей пространственного заряда W_n и W_p в электронном и дырочном германии для *p-n* перехода в равновесных условиях. $\rho_n = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_p = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

3.8. Как изменится величина и направление электрического поля в *p-n* переходе *n*-Si – *p*-Si с $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при изменении внешнего напряжения с прямого $V = +0,4 \text{ В}$ на обратное $V = -2 \text{ В}$ на расстоянии $z = +0,2 \text{ мкм}$ от границы раздела электронного и дырочного полупроводников.

3.9. Рассчитать изменение потенциального барьера $\phi(z)$ вглубь полупроводников в *p-n*⁺ переходе *n*⁺-Si – *p*-Si при напряжении $V = -1 \text{ В}$ с шагом $\Delta z = 0,1 \text{ мкм}$. $\rho_n = 0,001 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_p = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Нарисовать зонную диаграмму.

- 3.10. Рассчитать величину тока I в кремниевом p - n переходе при внешнем напряжении $V = +0,5$ В и $V = -0,5$ В. Уровни легирования: $N_A = 10^{16}$ см $^{-3}$, $N_D = 10^{14}$ см $^{-3}$, площадь $S = 1$ мм 2 .
- 3.11. Рассчитать и построить зонную диаграмму гетероперехода n -Ge – p -GaAs. $N_{D,A} = 10^{16}$ см $^{-3}$.
- 3.12. Имеется резкий кремниевый p - n переход при комнатной температуре $T = 300$ К с площадью $S = 10^{-3}$ см 2 и концентрацией легирующей примеси $N_D = N_A = 10^{18}$ см $^{-3}$. Вычислить накопленный заряд и время, за которое обратное смещение возрастет от 0 до -10 В, если ток через этот диод равен 1 мА.
- 3.13. Вычислить малосигнальные параметры: дифференциальное сопротивление и емкость для идеального кремниевого диода с длинной базой, если $N_D = 10^{18}$ см $^{-3}$ и $N_A = 10^{16}$ см $^{-3}$, время жизни $\tau_n = \tau_p = 10^{-8}$ с, площадь $S = 10^{-4}$ см 2 , температура $T = 300$ К в случае прямого смещения диода $V = 0,1; 0,5; 0,7$ В и обратного $V = -0,5$ и -20 В. Чему равно последовательное сопротивление квазинейтрального объема p -области (базы), если ее длина 0,1 см?

4. Биполярные транзисторы

- 4.1. Для некоторого транзистора типа p - n - p задано $I_{pэ} = 1$ мА, $I_{nэ} = 0,01$ мА, $I_{рк} = 0,98$ мА, $I_{нк} = 0,001$ мА. Вычислить: а) статический коэффициент передачи тока базы – α_T ; б) эффективность эмиттера (коэффициент инжекции – γ); в) ток базы и коэффициент передачи тока в схемах с ОБ – α и ОЭ – β .
- 4.2. Показать, что при экспоненциальном распределении примеси в базе n - p - n биполярного транзистора поле E_x постоянно. Найти в этом случае концентрацию неосновных носителей вблизи коллектора, если уровень легирования около эмиттера $N_A = 10^{17}$ см $^{-3}$, толщина базы транзистора $x_б = 0,3$ мкм, а $E_x = 4000$ В/см.
- 4.3. Кремниевый транзистор типа n^+ - p - n имеет эффективность эмиттера $\gamma = 0,999$, коэффициент переноса через базу $\alpha_T = 0,99$, толщину нейтральной области базы $W_б = 0,5$ мкм, концентрацию примеси в эмиттере $N_D = 10^{19}$ см $^{-3}$, базе $N_A = 10^{16}$ см $^{-3}$ и коллекторе $N_D = 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Определить предельное напряжение на эмиттере, при котором прибор перестает быть управляемым и наступает пробой и вычислить время пролета базы и частоту отсечки.
- 4.4. Имеется кремниевый транзистор типа p^+ - n - p с параметрами: $N_{Aэ} = 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, $N_{Dб} = 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $N_{Ак} = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, ширина области базы $W = 1$ мкм, площадь $S = 3$ мм 2 , $U_{эк} = +0,5$ В, $U_{бк} = -5$ В. Вычислить: а) толщину нейтральной области $W_б$ в базе, б) концентрацию неосновных носителей около перехода эмиттер – база $p_n(0)$, в) заряд неосновных носителей в области базы $Q_б$.

5. МДП-структуры

5.1. Рассчитать дебаевскую длину экранирования в кремнии с удельным сопротивлением $\rho = 15$ Ом·см и сравнить с глубиной проникновения электрического поля, $T = 300$ К.

5.2. Рассчитать и сравнить дебаевские длины экранирования L_D в собственных полупроводниках – кремнии Si, германии Ge, арсениде галлия GaAs, антимониде индия InSb при комнатной температуре.

5.3. Рассчитать объемную концентрацию электронов и дырок на поверхности n_s , p_s для n -Si с $\rho = 1$ Ом·см при значениях поверхностного потенциала $\psi_s = 0,3$ В; $-0,2$ В, $-0,5$ В, $-0,9$ В. Определить состояние поверхности.

5.4. Найти величину заряда Q_{sc} и емкости C_{sc} ОПЗ кремния марки КДБ–10 при значениях поверхностного потенциала ψ_s , равных $\psi_s = 0$; φ_0 , $2\varphi_0$.

5.5. Найти в классическом случае среднее расстояние λ_c , на котором локализованы свободные электроны в инверсионном канале в p -Si с сопротивлением $\rho = 0,1$ Ом·см при поверхностном потенциале $\psi_s = \frac{3}{2}\varphi_0$ при температурах

$T = 300$ К и $T = 77$ К.

5.6. Оценить дебройлевскую длину волны электронов для кремния Si, германия Ge, арсенида галлия GaAs и антимонида индия InSb при комнатной $T = 300$ К и азотной $T = 77$ К температурах.

5.7. Рассчитать энергию дна первых трех квантовых подзон в n -Si при значении $\psi_s = 2\varphi_0$ и при $N_A = 10^{16}$ см⁻³. Найти среднюю область локализации l_c электрона от поверхности на каждом из этих уровней и полное число электронов N_i в подзонах $T = 77$ К.

5.8. Рассчитать, чему равен заряд поверхностных состояний Q_{ss} при значениях поверхностного потенциала: $\psi_s = 0$; $\psi_s = \varphi_0$; $\psi_s = 2\varphi_0$ для кремния p -типа при $T = 300$ К с уровнем легирования $N_A = 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Поверхностные состояния распределены равномерно по зоне с плотностью $N_{ss} = 2 \cdot 10^{12}$ см⁻²·эВ⁻¹. Сравнить заряд Q_{ss} с соответствующим зарядом Q_{sc} ОПЗ.

5.9. В запрещенной зоне n -Si с $\rho = 7,5$ Ом·см имеются моноэнергетические поверхностные состояния (ПС) с концентрацией $N_s = 8 \cdot 10^{12}$ см⁻² и сечением захвата $\sigma_t = 10^{-16}$ см², расположенные на $E_t = 0,45$ эВ выше середины запрещенной зоны. Рассчитать постоянную времени ПС τ , эквивалентную последовательную емкость C_s и сопротивление R_s при обогащающем изгибе зон ψ_s , когда уровень Ферми совпадает с положением уровня ПС, $T = 300$ К.

5.10. Чему равна плотность поверхностных состояний N_{ss} в МДП-структуре p -Si – Si₃N₄ – Si(п/к) в состоянии плоских зон, если уровень легирования подложки $N_A = 1,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, площадь затвора $S = 0,5$ мм², толщина нитрида крем-

ния $d_n = 1,2 \cdot 10^{-5}$ см, а наклон экспериментальной ВФХ равен $\delta = \frac{\Delta C}{\Delta V} = 42 \frac{\text{пФ}}{\text{В}}$.

5.11. Рассчитать плотность поверхностных состояний N_{ss} , если максимум кривой зависимости нормированной проводимости $\frac{G_p}{\omega}$ от ω находится на

частоте $\omega = 2 \cdot 10^5$ Гц и равен $\left. \frac{G_p}{\omega} \right|_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-9} \frac{\Phi}{\text{см}^2}$. Оценить тип ПС по вели-

чине сечения захвата σ_t , если поверхностная концентрация электронов n_{s0} равна $n_{s0} = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻³.

5.12. Рассчитать вольт-фарадную характеристику МДП-системы $p\text{-Si} - \text{SiO}_2 - \text{Al}$, $d_{\text{ox}} = 150$ нм, $N_A = 1,5 \cdot 10^5$ см⁻³, $T = 300$ К при наличии отрицательного заряда в окисле $N_{\text{ox}} = -4 \cdot 10^{11}$ см⁻² и донорного моноуровня поверхностных состояний $N_s = 6 \cdot 10^{11}$ см⁻² на 0,1 эВ ниже середины запрещенной зоны кремния.

6. Полевые транзисторы

6.1. Найти пороговое напряжение V_T n -канального МОП-транзистора с алюминиевым затвором, если уровень легирования подложки равен $N_D = 10^{15}$ см⁻³, толщина диэлектрика $d_{\text{ox}} = 100$ нм, заряд в окисле $Q_{\text{ox}} = +10^{-8}$ Кл·см⁻², поверхностные состояния отсутствуют.

6.2. МОП-транзистор с отношением ширины к длине канала $\frac{W}{L} = 5$, толщи-

ной затворного окисла 80 нм и подвижностью электронов в канале $\mu_n = 600$ см²·В⁻¹·с⁻¹ предполагается использовать как управляемый резистор. Рассчитать превышение затворного напряжения V_G над пороговым напряжением V_T , при котором сопротивление транзистора R при малых напряжениях на стоке V_d будет равно 2,5 кОм.

6.3. В запоминающем устройстве с плавающим затвором нижний изолирующий слой имеет толщину $d_1 = 10$ нм и относительную проницаемость $\epsilon_1 = 4$, параметры верхнего слоя: $d_2 = 100$ нм и $\epsilon_2 = 10$. Плотность тока в нижнем слое $J = \sigma E$, где $\sigma = 10^{-7}$ Ом⁻¹·см⁻¹, в верхнем слое током можно пренебречь. Вычислить изменение порогового напряжения ΔV_T , считая что к затвору приложено 10 В в течение $t = 0,25$ мкс.

6.4. Дан ПЗС-прибор с затворами 5×5 мкм для формирования изображения. Пороговое значение детектируемого заряда составляет $2,5 \cdot 10^3$ электронов на элемент изображения, а заряд каждого элемента считывается и обнуляется каждые 10 мс. В термодинамическом равновесии поверхностная плотность зарядов в инверсионном слое равна $1 \cdot 10^{13}$ см⁻². Рассчитать время жизни неос-

новых носителей заряда τ_0 в кремнии p -типа с $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, учитывая, что доля тепловой генерации не превышает 5% от детектируемого порогового заряда.

6.5. Рассчитать плотность поверхностных состояний N_{ss} , при которой скорость поверхностной генерации I_s для полностью обедненной поверхности вдвое превышает скорость генерации в приповерхностной обедненной области I_F . Считать, что сечения захвата носителей заряда равны $\sigma_i = 10^{-15} \text{ см}^2$, тепловая скорость $v_t = 10^7 \text{ см/с}$, постоянная времени $\tau = 1 \text{ мкс}$, ширина ОПЗ $W = 1 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

7. Оптоэлектроника

7.1. Эффективность преобразования внешней (электрической) мощности планарного GaAs светодиода η равна 1,5 % при прямом токе $I = 50 \text{ мА}$ и разности потенциалов $U = 2 \text{ В}$. Оценить генерируемую прибором оптическую мощность P_i , если коэффициент отражения R на границе GaAs – воздух равен $R = 0,8$. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

7.2. Оценить эффективность преобразования внешней мощности планарного GaAs светодиода η , когда внутренняя оптическая мощность P_i составляет 30 % от приложенной электрической мощности. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

7.3. Рекомбинационное время жизни неосновных носителей заряда фотодиода $\tau = 5 \text{ нс}$. При протекании постоянного тока оптическая выходная мощность равна $P_{dc} = 300 \text{ мВт}$. Определить выходную мощность P_f , когда сигнал через диод модулирован на частоте 20 МГц и 100 МГц.

7.4. Ширина запрещенной зоны слаболегированного GaAs при комнатной температуре 1,43 эВ. Когда материал сильно легирован (до вырождения) появляются «хвосты состояний», которые эффективно уменьшают ширину запрещенной зоны на 8%. Определить разницу в излучаемой длине волны света в случае слабого и сильного легирования.

7.5. Идеальный фотодиод (т.е. с квантовым выходом равным 1) освещается излучением мощностью $P = 10 \text{ мВт}$ при длине волны 0,8 мкм. Рассчитать ток и напряжение на выходе прибора, когда детектор используется в режиме фототока и фото–э.д.с. соответственно. Ток утечки при обратном смещении $I_0 = 10 \text{ нА}$, рабочая температура $T = 300 \text{ К}$.

7.6. Фотодиод на основе p - n перехода имеет квантовый выход 50 % на длине волны 0,9 мкм. Рассчитать чувствительность R , поглощенную оптическую мощность P ($I_p = 1 \text{ мкА}$) и число фотонов, поглощенных в секунду на этой длине волны r_p .

7.7. Лавинный фотодиод с коэффициентом умножения $M = 20$ работает на длине волны $\lambda = 1,5 \text{ мкм}$. Рассчитать квантовый выход и выходной фототок

прибора, если его чувствительность R на этой длине волны равна 0,6 А/Вт при потоке 10^{10} фотонов/с.

7.8. Кремниевый лавинный фотодиод имеет коэффициент умножения $M = 20$ на длине волны 0,82 мкм при этом квантовый выход 50 % и темновой ток 1 нА. Определить число падающих фотонов r_p на этой длине волны в секунду, обеспечивающее выходной ток прибора (после умножения), больший уровня темнового тока.

8. Интегральные микросхемы

8.1. Для изготовления кремниевого транзистора типа $n-p-n$ используется планарно-диффузионная технология без скрытого слоя. Какие операции необходимо выполнить в рамках данного технологического цикла? Кремниевая пластина p -типа имеет толщину 0,127–0,152 мм и удельное сопротивление 10 Ом·см. Толщина эпитаксиального слоя 0,025 мм, толщина оксидного слоя 50 нм.

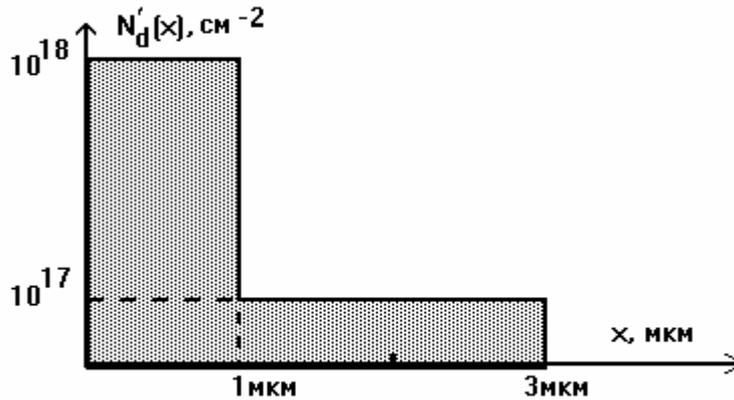
8.2. Сравнить максимально возможную емкость конденсатора размером 100×100 мкм, выполненную в виде МОП-конденсатора с емкостью конденсатора, такого же размера на обратном смещенном $p-n$ переходе в $n-Si$ с $N_D = 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Принять, что поле пробоя окисла $E = 8 \cdot 10^6$ В/см, рабочее напряжение конденсатора $U = 5$ В (с учетом коэффициента запаса «2»): $U = 10$ В).

8.3 Для интегральной схемы (ИС) проектируется резистор p -типа с двумя сильнолегированными областями p^+ -типа, контактирующими с резистивной полоской. Ширина полоски $W = 6$ мкм, расстояние между контактами $L = 24$ мкм. Полоска имеет глубину перехода $x_j = 6$ мкм. Требуемое значение сопротивления $R = 1$ кОм. Определить поверхностное сопротивление R_s и усредненное удельное сопротивление $\rho_{ср}$, необходимое для данного резистора. Диффузией в горизонтальном направлении можно пренебречь.

8.4. Соединительная дорожка из поликристаллического кремния с удельным сопротивлением $\rho = 500$ мкОм·см имеет ширину $W = 5$ мкм и толщину $d = 0,5$ мкм. Ток пропускается через такую дорожку длиной $L = 1$ мм, чтобы зарядить конденсатор площадью $S = 0,1 \times 0,5$ мм 2 , имеющей обкладки с двух сторон слоя двуокиси кремния, толщина которого равна $d_{ок} = 100$ нм. Чему равна постоянная времени RC для результирующей последовательно включенной цепочки сопротивление – конденсатор? (Сопротивление поликремния – минимальное).

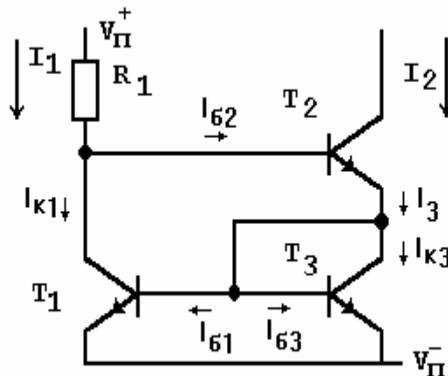
8.5. У поверхности кремния создано ступенчатое распределение легирующих примесей. Рассчитать поверхностное сопротивление, не используя усредненное значение подвижности.

$$\mu_n(N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}) = 730 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}; \quad \mu_n(N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}) = 280 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$



Здесь N'_d – поверхностная концентрация примеси.

8.6. Источник тока отрицательной полярности с токовым зеркалом Уилсона для операционного усилителя показан на рисунке ниже.

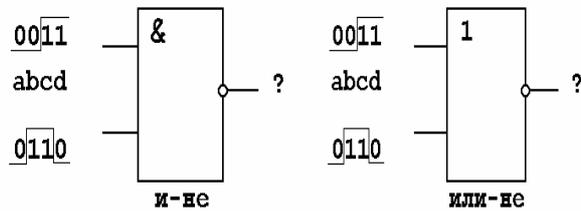


Все транзисторы в ИМС – идентичные. Коэффициент усиления (средний) $\beta = 100$ для $n-p-n$ транзистора и $\beta = 50$ $p-n-p$ транзистора. Напряжение питания $V_{\Pi}^- = -10 \text{ В}$ и $V_{\Pi}^+ = 10 \text{ В}$. Напряжение на прямосмещенном переходе база–эмиттер $V_{бэ} = 0,7 \text{ В}$. Напряжение пробоя коллектор–эмиттер (минимальное) – 50 В .

Покажите, что а) $I_2 = I_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_3} - \frac{2}{\beta_2} \right)$, пренебрегая членами типа $\frac{1}{\beta^2}$,

б) найдите R_1 при $I_1 = 1,0 \text{ мА}$, в) найдите диапазон линейного изменения напряжения, г) найдите выходное сопротивление источника тока r_0 , д) найдите процентное изменение I_2 при изменении $U_{к2}$ на 1 В .

8.7. На рисунке, приведенном ниже, представлены логические элементы и состояние их входов. Что будет наблюдаться на выходах данных элементов?

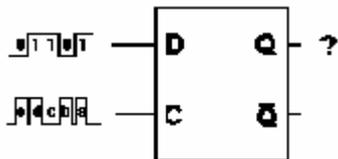


Дана таблица истинности, записать булевское выражение и начертить логическую схему, соответствующую.

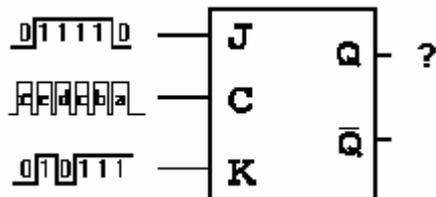
Вх А	Вх В	Вх С	Вх D	Вых Y	Вх А	Вх В	Вх С	Вх D	Вых Y
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1	1	1	1	1

Назовите его функциональные состояния и перечислите двоичные значения на выходе Q, соответствующие каждому тактовому импульсу.

8.9. Дан D-триггер:

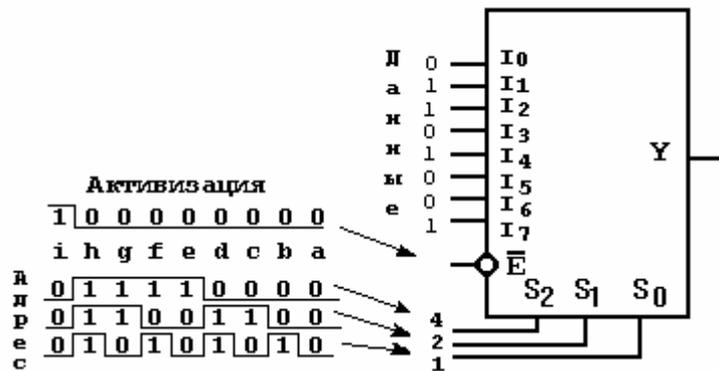


8.10. Дан JK-триггер:



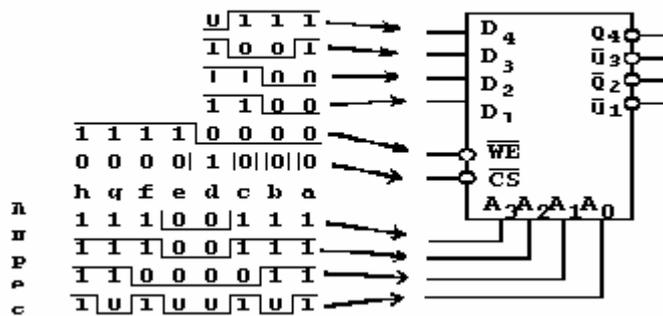
Назовите его функциональные состояния и перечислите двоичные значения на выходе Q, соответствующие каждому тактовому импульсу.

8.11. Дан мультиплексор с 8 входами.



Что будет на выходе Y при каждом сигнале $a-i$? Можно ли его использовать для преобразования параллельного кода в последовательный?

8.12. Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 16×4 бита представлено ниже:



Перечислить состояния ОЗУ и состояние выходов во время импульсов $a-i$.

Справочные таблицы

Физические параметры важнейших полупроводников

Параметр		Обозначение	Si	Ge	GaAs	InSb
Ширина запрещенной зоны, эВ	300 К	E_g	1,12	0,66	1,43	0,18
	0 К		1,21	0,80	1,56	0,23
Подвижность при 300 К, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	электронов	μ_n	1500	3900	8500	78000
	дырок	μ_p	600	1900	400	5000
Эффективная масса	электронов	$m_{дн}^*$	1,08	0,56	0,068	0,013
	дырок	$m_{дп}^*$	0,56	0,35	0,45	0,6
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см^{-3}		N_C	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$3,7 \cdot 10^{16}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне, см^{-3}		N_V	$1,02 \cdot 10^{19}$	$6,11 \cdot 10^{18}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$1,16 \cdot 10^{19}$
Диэлектрическая постоянная		ϵ_s	11,9	16,0	10,9	17,0
Электронное сродство		χ	4,05	4,00	4,07	4,60
Собственная концентрация носителей, см^{-3}		n_i	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{16}$
Время жизни носителей, с		τ	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Дебаевская длина, мкм		L_d	24	0,68	2250	
Показатель преломления		n	3,44	4,0	3,4	3,75
Температурный коэффициент		α	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$

Работа выхода из металлов (эВ)

Mg	Al	Ni	Cu	Ag	Au	Pt
3,4	4,1	4,5	4,4	4,3	4,7	5,3

Свойства диэлектриков

	E_g , эВ	$\epsilon_{ст}$	ϵ_{∞}	ρ , $\text{г}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$	$E_{пр}$, В/см
SiO ₂	9,0	3,82	2,13	2,33	$1,2 \cdot 10^7$
Si ₃ N ₄	5,1	6,5	4,2	3,11	$6,0 \cdot 10^6$
Ta ₂ O ₅	4,5	27	5,0	8,53	$6,0 \cdot 10^6$

Ответы и решения

1. Статистика электронов и дырок в полупроводниках

1.1. Концентрация собственных носителей заряда n_i имеет сильную температурную зависимость и определяется как

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (1.1),$$

где эффективная плотность состояний в C - и V -зонах $N_{C,V}$ также зависит от температуры T и эффективной массы носителей заряда в зоне m^* :

$$N_{C,V} = 2 \cdot \left(2\pi \cdot \frac{m^* kT}{h^2}\right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}, \text{ см}^{-3}. \quad (1.2)$$

Ширина запрещенной зоны E_g имеет слабую зависимость от температуры типа $E_g = E_{g0} - \alpha T$. Величины E_{g0} и α приведены в таблице 9.1, здесь же можно найти величины N_C и N_V при $T = 300$ К. Расчет значений эффективной плотности состояний в C - и V -зонах и концентрации собственных носителей заряда n_i при температуре жидкого азота 77 К приводится ниже

	Si	Ge	GaAs	InSb
$N_C, \text{ см}^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{15}$
$N_V, \text{ см}^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$6,9 \cdot 10^{18}$	$9,8 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{18}$
$N_i, \text{ см}^{-3}$	$3 \cdot 10^{-20}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$	$1,2 \cdot 10^{10}$

Примесь полностью ионизована, когда концентрация равновесных электронов равна концентрации легирующей примеси $n_0 = N_D$. Из основного соотношения для полупроводников: $n_0 p_0 = n_i^2$ найдем концентрацию неосновных

носителей заряда $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$. Для Si $p_0 = 2,6 \cdot 10^3$, для GaAs $p_0 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$.

1.3 В собственном полупроводнике $n_0 = p_0$ и положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны полупроводника φ_0 можно рассчитать как

$$\varphi_{0i} = \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} = \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_n^*}{m_p^*} \right),$$

$$N_{c,v} = 2 \cdot \left(2\pi \cdot \frac{m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}.$$

T, K		300	77
φ_0 , эВ	Si	-0,0124	-0,0032
	InSb	0,074	0,019

Таким образом, в кремнии уровень Ферми лежит ниже, а в антимониде индия – выше середины запрещенной зоны полупроводника E_i .

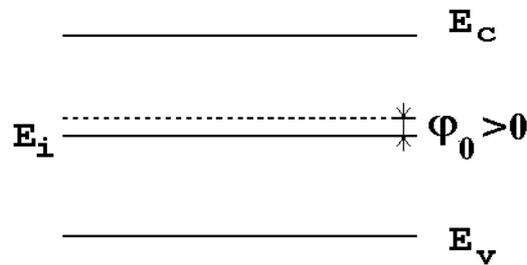


Рис. Зонная диаграмма полупроводника, когда $\varphi_0 > 0$, $m_p^* > m_e^*$

1.4 В легированном полупроводнике $p_0 \gg n_i$ положение уровня Ферми φ_0 можно рассчитать по формуле

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_0}{n_i} \right) \quad (1.4)$$

Концентрацию основных носителей p_0 найдем, зная величину удельного сопротивления $\rho = 10$ Ом·см, как

$$p_0 = \frac{1}{q\mu\rho}. \quad (1.5)$$

В результате: $p_0 = 3,3 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $\varphi_0 = 0,067$ эВ.

1.5. Положение уровня Ферми в InSb найдем по формуле (1.4):

$\varphi_0 = 0,085$ эВ. Чтобы найти φ_0 относительно середины запрещенной зоны, нужно учесть сдвиг уровня Ферми в собственном полупроводнике (см. задача 1.3): $-0,019$ эВ, т.е. $\varphi_{0n} = 0,104$ эВ в n -InSb и $\varphi_{0p} = 0,066$ эВ в p -InSb. Если рассчитать положение уровня Ферми относительно края C -зоны, то

$\frac{E_g}{2} - \varphi_{0n} = 0,115 - 0,104 = 0,011$ эВ – это не превышает величины $2kT$ (0,013 эВ при $T = 77$ K), т.е. n -InSb – вырожден, p -InSb – нет.

1.6. Зная удельное сопротивление $\rho = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, по формуле (1.5) найдем уровень легирования $N_D = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а далее по формуле (1.4) положение уровня Ферми $\varphi_0 = 0,284 \text{ эВ}$ при 300 К и $\varphi_0 = 0,52 \text{ эВ}$ при 77 К.

1.7. $n\text{-Si } \rho = 0,42 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $p\text{-Si } \rho = 1,05 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

1.8. В собственном полупроводнике удельная электропроводность равна $\sigma_i = qn\mu_n + qp\mu_p = qn_i(\mu_n + \mu_p)$ и, соответственно, $\rho_i = 1/\sigma_i$:

	Si	Ge	GaAs	InSb
$\rho_i, \text{ Ом}\cdot\text{см}$	$1,9 \cdot 10^5$	43	$6,4 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{-3}$

1.9. Вырождение в полупроводнике наступает, когда уровень Ферми F приближается к C - или V -зоне на расстояние порядка kT , т.е. $F - E_V = kT$. В случае полной ионизации примеси концентрация дырок p определяется как

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - F}{kT}\right) \quad (1.6)$$

и равна уровню легирования N_A : $N_A = p = N_v/q$. Для Si: $N_A = 3,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, для Ge: $N_A = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

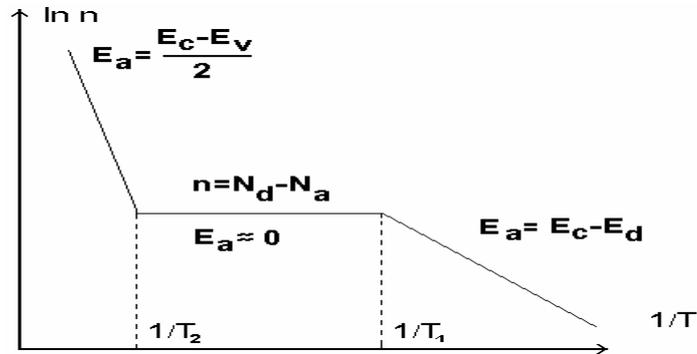
1.10. $N_D = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Учитывая температурную зависимость n_i (см. зад. 1.1), вычисляем φ_0 : при $T = 300 \text{ К}$ $\varphi_0 = 0,47 \text{ эВ}$ и при 77 К $\varphi_0 = 0,72 \text{ эВ}$, тогда $\Delta\varphi_0 = 0,25 \text{ эВ}$

1.11. Известно, что E_g и $N_{C,V}$ зависят от температуры. Для оценки граничной температуры пренебрежем этим фактом. Тогда учитывая, что $n_0 = N_D$ и $n_0 = n_i$, после преобразования получим:

$$T_{\text{гр}} = \frac{E_g}{2k} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{N_C N_V}}{N_D}\right)}$$

	Si	Ge	GaAs	InSb
$T_{\text{гр}}, \text{ К}$	668	439	1104	195
$T_{\text{гр}}, \text{ }^\circ\text{C}$	395	166	831	-78

1.12. На качественной зависимости $\ln n$ от $1/T$ можно выделить 3 участка



1) с энергией активации E_a , соответствующей ионизации примеси, 2) собственно матрицы полупроводника и 3) нулевой. Нижняя граница области T_1 определяется условием $n = N_D - N_A$, т.е.

$$T_1 = \frac{E_C - E_D}{k \ln \frac{N_C(T)}{gN_A}}$$

Верхняя граница области T_2 определяется условием $n_i = N_D - N_A$, т.е.

$$T_2 = \frac{(E_C - E_V)_0}{2k \left(\ln \frac{N_C(T_2)}{N_C - N_V} + \frac{\alpha}{2k} \right)}$$

$$E_C - E_V = (E_C - E_V)_0 - \alpha T.$$

В первом приближении $T_1 = 580$ К и $T_2 = 7010$ К. Второе приближение дает существенно отличные значения $T_1 = 78$ К и $T_2 = 540$ К.

2. Диффузия и дрейф. Генерация и рекомбинация

2.1. В условиях термодинамического равновесия полная плотность тока дырок j_p равна нулю, т.е. $j_p = j_{p \text{ диф}} + j_{p \text{ др}} = q(\mu_p E - D_p \frac{dp}{dx}) = 0$.

Отсюда внутреннее поле $E_i = \frac{D_p}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{1}{p}$.

Продифференцировав $p(x)$: $\frac{dp}{dx} = -\frac{p}{x_0}$,

получим $E_i = \frac{D_p}{\mu} \frac{1}{x_0} = 500 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ и $j_{p \text{ диф}} = j_{p \text{ др}} = 3,2 \cdot 10^{-14} \cdot N_A$.

2.2. Темп генерации с учетом $E_i = E_t$ задается формулой

$$G = \frac{pn - n_i^2}{(p + n + 2 \cdot n_i) \tau_0}. \quad (2.1)$$

По уровню легирования $N_D = n_0 = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ можно рассчитать равновесную концентрацию неосновных носителей заряда $p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Время жизни τ_0 рассчитаем как:

$$\tau_0 = \frac{1}{N_i \sigma_i \nu_i}, \quad (2.2)$$

т.е. τ_0 равно $1 \cdot 10^{-7}$ с. Неравновесные концентрации носителей заряда равны $n = n_0 + \Delta n \approx n_0$ – основных и $p = p_0 + \Delta p \approx \Delta p$ – неосновных. В первом случае, когда $n, p \ll n_i$ формула (2.1) сводится к

$$G = \frac{-n_i^2}{n_i \cdot 2 \cdot \tau_0} = -\frac{n_i}{2 \cdot \tau_0},$$

$G = 7,25 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, во втором случае $n \gg n_i$ и $p_0 \gg p$

$$G = \frac{n_0 \cdot \Delta p}{n_0 \tau_0} = \frac{p - p_0}{\tau_0} = -\frac{p_0}{\tau_0}$$

$G = 2,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.3. Время жизни τ_0 рассчитаем по формуле (2.2) как $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-8}$ с, концентрации неравновесных носителей заряда равны $n = N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $p = G \tau_0 = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

2.4. Коэффициент рекомбинации r получим из соотношения $G = R = r \cdot n \cdot p$.

$$G = r(n + p) = r(n_0 + \Delta n + p_0 + \Delta p) = r \cdot \Delta n \cdot (n_0 + p_0) = r \cdot \Delta n \cdot n_0.$$

Отсюда имеем для r : $r = \frac{G}{\Delta n} \cdot \frac{1}{n_0} = \frac{1}{\tau_0 n_0}$.

$c = 1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, избыточная концентрация электронов $\Delta n = G \cdot \tau_0 = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

2.5. При наличии градиента концентраций плотность диффузионного тока

$$j_{\text{диф}} = qD \frac{\Delta n}{\Delta x} = \frac{q \mu_n}{\left(\frac{kT}{q} \right)} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta x} = 825 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

2.6. В стационарном случае имеем: $G = \frac{\Delta p}{\tau_0}$ и $G = \gamma \cdot I$, поэтому

$$\Delta p = \gamma \cdot I \cdot \tau, \text{ т.е. } \Delta p = 10^{16} \text{ см}^{-3}. \frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} = \frac{\Delta p (\mu_n + \mu_p)}{n_0 \mu_n} = 0,15.$$

3. Барьеры Шоттки и $p-n$ переходы. Диоды

3.1. Контактная разность потенциалов $\varphi_k = \Phi_{Au} - \Phi_{Ge} = \Phi_{Au} - \chi + E_g/2$. Учитывая, что $N_D = \frac{1}{q\mu\rho} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\varphi_0 = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 0,11 \text{ эВ}$, имеем

$$\Phi_{Ge} = 4,22 \text{ эВ}, \quad \varphi_k = 0,48 \text{ эВ}.$$

3.2. Ширина области обеднения W определяется

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\varphi_k - V_g)}{q \cdot N_d}}. \quad (3.1)$$

Высота барьера φ_k , уровень легирования N_D и φ_0 рассчитываются, как и в задаче 3.1: $N_D = 4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_0 = 0,38 \text{ эВ}$, $\varphi_k = 1,07 \text{ эВ}$. Тогда $W(V = +0,4) = 0,14 \text{ мкм}$, $W(V = -0,2) = 0,14 \text{ мкм}$, $W(V = 0) = 0,14 \text{ мкм}$.

3.3, 3.4. Зависимость электрического поля E и потенциала φ в барьере Шоттки от координаты x можно рассчитать как

$$E = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{q \cdot N_d \cdot W}{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0} \left(1 - \frac{x}{W}\right);$$

$$\varphi = \varphi_{\max} \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2. \quad (3.2)$$

Ширина области обеднения W определяется, как и в задаче 3.2.

Ответ для задачи 3.3 при $x = 0$: $E_{\max}(V_G = +0,3 \text{ В}) = 3,82 \cdot 10^4 \text{ В/см}$, $E_{\max}(V_G = 0 \text{ В}) = 4,95 \cdot 10^4 \text{ В/см}$, $E_{\max}(V_G = -110 \text{ В}) = 5,78 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

Ответ для задачи 3.4 при $W = 4,2 \text{ мкм}$: $E(x = 1,2 \text{ мкм}) = 1,9 \cdot 10^4 \text{ В/см}$, $\varphi_{\max} = \varphi_k + V_G = 5,65 \text{ эВ}$, $\varphi(x) = 2,9 \text{ В}$.

3.5. Вольт-амперная характеристика идеального диода описывается формулой:

$$j = j_s (e^{\frac{qV_G}{kT}} - 1). \quad (3.3)$$

Величина тока насыщения j_s может быть рассчитана по диодной

$$j_s = \frac{1}{4} q n_0 e^{-\frac{q\varphi_k}{kT}} \sqrt{\frac{8kT}{m^* \pi}}.$$

или диффузионной теории

$$j_s = q \mu_n E_{\max} n_0 e^{\frac{q\varphi_k}{kT}}.$$

Из сравнения соотношения длины свободного пробега

$$l_{\text{пр}} = v_t \cdot \tau = \frac{v_t \mu_n m^*}{q} = 0,033 \text{ мкм} \text{ и величины } \frac{2q\varphi_k W}{kT} = 0,12 \text{ мкм}, \text{ можно}$$

сделать вывод, что справедлива диффузионная теория. Тогда имеем:

$j_s = 1,8 \cdot 10^{-13}$ А/см² и j рассчитаем по формуле (3.3): $j = 4,3 \cdot 10^{-5}$ А/см² при $V = 0,5$, $j = 1,8 \cdot 10^{-13}$ А/см² при $V = -5$ В.

3.6. Высота потенциального барьера в p - n переходе равна $\varphi = \varphi_k - V$. Контактную разность потенциалов (к.р.п.) φ_k найдем как разность работ выхода:

$$\varphi_k = \Phi_p - \Phi_n = \varphi_{p0} + \varphi_{n0} = kT \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 0,09 + 0,11 = 0,2 \text{ эВ.}$$

Поэтому $\varphi (V = +0,15) = 0,05$ В, $\varphi (V = -0,5) = 0,7$ В.

3.7. Ширина области обеднения W_n в n -типе определяется как

$$W_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (\varphi_k - V)}{q N_D^2 \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}. \quad (3.4)$$

Предварительно сосчитав $N_D = 1,7 \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $N_A = 3,3 \cdot 10^{15}$ см⁻³, а также $\varphi_k = 0,18$ эВ, получим $W_n = 1,3$ мкм, $W_p = 0,068$ мкм и

$$E_{\max} = \frac{q N_D W_n}{\epsilon_s \epsilon_0} = \frac{q N_A W_p}{\epsilon_s \epsilon_0} = 2,5 \cdot 10^3 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

3.8. Аналогично предыдущей задаче имеем $W_p (V = -0,4 \text{ В}) = 0,42$ мкм и $W_p (V = +2 \text{ В}) = 0,97$ мкм. Максимальное электрическое поле на границе $E_{\max} (V = -0,4 \text{ В}) = 6,4 \cdot 10^3$ В/см и $E_{\max} (V = +2 \text{ В}) = 1,75 \cdot 10^4$ В/см, а при $x = 0,2$ мкм $E (V = -0,4 \text{ В}) = 3,4 \cdot 10^3$ В/см и $E (V = +2 \text{ В}) = 1,4 \cdot 10^4$ В/см.

3.9. Т.к. концентрация примеси $N_D = 4,2 \cdot 10^{18}$ см⁻³ много больше $N_A = 2,3 \cdot 10^{15}$ см⁻³, то $W_p = 1$ мкм \gg $W_n = 0,00055$ мкм. Спад потенциала $\varphi(x)$ в p -область рассчитаем как

$$\varphi_p(x) = \frac{q N_A W_p^2}{2\epsilon_s \epsilon_0} \left(1 - \frac{x}{W_p} \right)^2. \quad (3.5)$$

Результаты расчета по формуле (3.5) сведем в таблицу:

x , мкм	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
$\varphi(x)$, В	1,8	1,46	1,11	0,65	0,29	0,07	0,02

3.10. Вольт-амперная характеристика идеального диода описывается формулой 3.3, а ток насыщения j_s в случае p - n перехода, будет равен

$$j_s = \frac{q \cdot D_n \cdot n_{p0}}{L_n} - \frac{q \cdot D_p \cdot p_{n0}}{L_p}. \quad (3.6)$$

Коэффициент диффузии D найдем из соотношения Эйнштейна:

$$D = \mu \frac{kT}{q}, \quad (3.7)$$

$D_n = 39 \text{ см}^2/\text{с}$ и $D_p = 16 \text{ см}^2/\text{с}$, а диффузионную длину L по формуле

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (3.8)$$

$L_n = 0,31 \text{ см}$ и $L_p = 0,063 \text{ см}$.

Плотность тока насыщения $j_s = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Ток через диод равен $I(V = +0,5) = 0,13 \text{ мА}$ и $I(V = -0,5) = 5,3 \cdot 10^{-13} \text{ А}$.

3.11. Вычислим работу выхода из Ge и GaAs $\Phi = \chi + \frac{E_g}{2} + \varphi_0$, учитывая, что

$\varphi_{0 \text{ Ge}} = -0,16 \text{ эВ}$ и $\varphi_{0 \text{ GaAs}} = -0,53 \text{ эВ}$. К.р.п. $\varphi_k = 5,32 - 4,15 = 1,15 \text{ эВ}$.

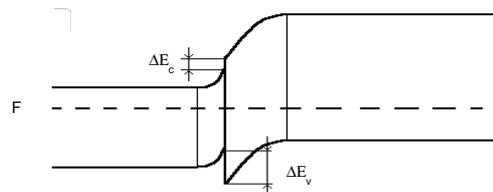
Ширина области обеднения W в гетеропереходе равна

$$W = \sqrt{\frac{2\varphi_k N_{b1} \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{q N_{b2} (\varepsilon_1 N_{b1} + \varepsilon_2 N_{b2})}}, \quad (3.9)$$

где $N_{b1,2}$ и $\varepsilon_{1,2}$ – уровни легирования и диэлектрические проницаемости полупроводников. $W_{\text{Ge}} = W_{\text{GaAs}} = 0,28 \text{ мкм}$. Разрыв зон можно рассчитать как

$$\Delta E_C = \chi_{\text{GaAs}} - \chi_{\text{Ge}} = 0,07 \text{ эВ},$$

$$\Delta E_V = (\chi_{\text{GaAs}} + E_{g \text{ GaAs}}) - (\chi_{\text{Ge}} + E_{g \text{ Ge}}) = 0,84 \text{ эВ}.$$



nGe - pGaAs

Зонная диаграмма гетероперехода

3.12. Время нарастания обратного смещения t вычислим как отношение изменения заряда барьерной емкости ΔQ к протекающему току I : $t = \frac{\Delta Q}{I}$. Заряд

Q выразим через ширину ОПЗ W : $Q = \frac{q N_D S W}{2}$. Ширина областей обеднения

в p - и n -областях равны $W_p = W_n$ (т.к. равны концентрации $N_A = N_D$) и рассчитываются по формуле (3.4): $W(0) = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ см}$, $W(-10) = 5,29 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Заряды соответственно равны $Q(0) = 9,73 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$ и $Q(-10) = 4,23 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$, а время нарастания $t = 3,26 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

3.13. Емкость диода при обратном смещении является барьерной емкостью

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q \cdot \epsilon_0 \epsilon_s \cdot N_d \cdot N_a}{2(\phi_k - V)(N_d + N_a)}}, \quad (3.10)$$

а в прямом смещении – это диффузионная емкость $C = \frac{I\tau}{\left(\frac{kT}{q}\right)}$.

Дифференциальное сопротивление вычислим через проводимость

$g_d = \frac{dI(V)}{dV}$, т.е. $r_d \approx \frac{(kT/q)}{I(V)}$. Сопротивление базы – это просто последова-

тельно включенный резистор из кремния:

$r_b = \frac{\rho d_{Si}}{S} = \frac{d_{Si}}{SqN_A\mu} = 1 \text{ кОм}$. Учитывая к.р.п. $\phi_k = 0,82 \text{ В}$, проведем необхо-

димый расчет:

$V, \text{ В}$	$r_d, \text{ Ом}$	$C, \text{ пФ}$
0,7	2,8	3580
0,5	6100	6,68
0,1	$3 \cdot 10^{10}$	3,36
0	$1,4 \cdot 10^{12}$	3,15
-5	∞	1,18
-10	∞	0,63

Обратим внимание, что при прямом смещении $V > 0,5 \text{ В}$: $r_d < r_b$!

4. Биполярные транзисторы

4.1. а) статический коэффициент передачи тока базы $\alpha_T = \frac{I_{пк}}{I_{пэ}} = 0,98$;

б) эффективность эмиттера $\gamma = \frac{I_{пэ}}{I_{пэ} + I_{нэ}}$; в) коэффициент передачи тока в

схемах с ОБ и ОЭ: $\alpha = \alpha_T \gamma = 0,97$ и $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 33$; ток базы $I_b = I_c - I_k$;

$I_b = (1 + 0,01) - (0,98 - 0,001) = 30 \text{ мкА}$.

4.2. Пусть $x = 0$ – граница эмиттер–база $p(x) = p(0) \cdot \exp(-\alpha x)$, $p(0) = N_A$. В усло-

виях термодинамического равновесия токи дрейфа и диффузии равны друг другу: $q\mu p E_x = qD_p \frac{dp}{dx}$.

Учитывая соотношение Эйнштейна (3.7) выразим E_x :

$$E_x = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{\alpha \cdot p(0)e^{-\alpha x}}{p(0)e^{-\alpha x}} = \frac{kT}{q} \cdot \alpha,$$

$$\alpha = \frac{qE_x}{kT} = 1,54 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}.$$

У коллектора при $x = x_6$, $p(x_6) = N_A \cdot \exp(-\alpha x) = 9,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

4.3. Пробой наступает при смыкании в базе областей обеднения со стороны коллектора $W_{кб}$ и со стороны эмиттера $W_{эб}$. Сосчитаем барьеры на границах базы $\varphi_{0э} = 0,902$ эВ и $\varphi_{0к} = 0,706$ эВ. Величину $W_{эб}$ сосчитаем по формуле (3.4): $W_{эб} = 0,2$ мкм. Прокол базы наступит, когда $W_{кб} = W_6 - W_{эб} = 0,3$ мкм, это напряжение $U_{пр}$ получим из уравнения типа 3.4

$$W_{кб} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 N_D^K (\varphi_{0к} - U_{пр})}{q N_A^6 (N_D^K + N_A^6)}}, \quad (4.1)$$

$U_{пр} = 13,2$ В.

Время пролета через базу $\tau = \frac{W^2}{2D_{пб}}$, где W – ширина базы без ОПЗ $W = W_6 -$

$W_{эб} - W_{кб} = 0,23$ мкм, $\tau = 9,2$ пс. Граничная частота $f = \frac{1}{2\pi\tau} = 17,3$ ГГц.

4.4.

а) Для данного транзистора барьеры на границах базы $\varphi_{0э} = 0,856$ эВ и $\varphi_{0к} = 0,635$ эВ, при данных $U_{эк} = +0,5$ В и $U_{бк} = -5$ В, соответствующие значения областей обеднения рассчитаем по формуле (4.1) и получим: $W_{эб} = 0,215$ мкм и $W_{бк} = 0,258$ мкм, толщина нейтральной области в базе: $W_6 = W - W_{эб} - W_{бк} = 0,527$ мкм.

б) концентрацию неосновных носителей около перехода эмиттер–база $p_n(0)$ рассчитаем по формуле:

$$p_n(0) = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{qU_{эб}}{kT}} = 5,18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

в) заряд неосновных носителей в области базы:

$$Q_6 = \frac{qSW_6 p_n(0)}{2} = 6,4 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}.$$

5. МДП–структуры

5.1. Дебаевская длина характеризует глубину проникновения электрического поля в полупроводник при малых возмущениях потенциала порядка kT/q :

$$L_D = \sqrt{\frac{kT}{q} \cdot \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{q N_D}} \quad (5.1)$$

Зная $N_D = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $L_D = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,25 \text{ мкм}$. При больших величинах обедняющих напряжений глубина проникновения электрического поля W обычно много больше длины Дебая т.к. обычно

$$\psi_s \gg \frac{kT}{q} \text{ и } \frac{W}{L_D} = \sqrt{\frac{2\psi_s}{\left(\frac{kT}{q}\right)}} \gg 1.$$

5.2. Для собственных полупроводников дебаевская длина экранирования L_D определяется ϵ_s и n_i , (см. формулу (5.1)):

Полупроводник	Si	Ge	GaAs	InSb
L_D , мкм	33	0,96	1200	0,035

т.е. дебаевская длина возрастает с ростом ширины запрещенной зоны.

5.3. Значения поверхностной концентрации n_s и p_s в классическом случае выражаются $n_s = n_0 e^{\beta\psi_s}$ и $p_s = n_0 e^{-\beta(\psi_s + 2\phi_0)}$. Рассчитаем необходимые параметры:

$$n_0 = \frac{1}{q\mu_n\rho_n}, \quad p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}, \quad 2\phi_0 = 2\frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i}.$$

$$n_0 = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad p_0 = 6,1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}, \quad 2\phi_0 = 0,65 \text{ эВ}.$$

ψ_s , эВ	0,3	-0,2	-0,5	-0,9
n_s , см^{-3}	$4,5 \cdot 10^{20}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
p_s , см^{-3}	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$6,5 \cdot 10^{19}$

Сравнивая значения n_s и p_s со значениями получаем, что состояние:

1 – обогащение, 2 – обеднение, 3 – слабая инверсия, 4 – сильная инверсия.

5.4. Заряд в ОПЗ Q_{sc} в общем случае записывается как

$$Q_{sc} = \epsilon_s \epsilon_0 E_s = \pm \frac{\sqrt{2\epsilon_s \epsilon_0 kT}}{qL_D} \cdot F(\psi_s, \phi_0), \quad (5.2)$$

здесь L_D – длина экранирования Дебая, функция $F(\psi_s, \phi_0)$ для невырожденно-го полупроводника p -типа:

$$F(\psi_s, \phi_0) = \sqrt{\left(e^{-\beta\psi_s} + \beta\psi_s - 1\right) + e^{-2\beta\phi_0} \left(e^{\beta\psi_s} - \beta\psi_s - 1\right)}. \quad (5.3)$$

Емкость ОПЗ C_{sc} также выражается через $F(\psi_s, \phi_0)$:

$$C_{sc} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{\sqrt{2} L_D} \cdot \frac{\sqrt{(1 - e^{-\beta \psi_s}) + e^{-2\beta \phi_0} (e^{\beta \psi_s} - 1)}}{F(\psi_s, \phi_0)}. \quad (5.4)$$

Для частных случаев: обогащения ($\psi_s < 0$), обеднения ($\phi_0 > \psi_s > 0$), слабой ($2\phi_0 > \psi_s > \phi_0$) и сильной ($\psi_s > 2\phi_0$) инверсии можно получить упрощенные выражения. Объемное положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны вычислим по формулам (1.3–1.4), учитывая что $\phi_0 = 0,29$ эВ, тогда имеем (см. таблицу ниже):

ψ_s	Q_{sc} , Кл/см ²	C_{sc} , Ф/см ²
0, плоские зоны	0	$8,0 \cdot 10^{-8}$
ϕ_0 , середина зоны	$9,3 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$
$2\phi_0$, пороговый потенциал	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$

5.5. Т.к. $\phi_0 < \psi_s < 2\phi_0$, то реализуется условие слабой инверсии, что соответствует случаю треугольной потенциальной ямы, при этом:

$$\lambda_c = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{Q_B} \cdot \frac{kT}{q}. \quad (5.5)$$

Вычислив $N_D = 1 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $\phi_0 = 0,41$ эВ, рассчитаем заряд в ОПЗ:

$$Q_B = \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A \psi_s}, \quad (5.6)$$

$Q_B = 1,4 \cdot 10^{-7}$ Кл·см⁻² и среднее расстояние локализации $\lambda_c = 1,9 \cdot 10^{-7}$ см при 300К и $\lambda_c = 5 \cdot 10^{-8}$ см при 77 К.

5.6. Величина дебройлевской длины волны λ будет

$$\lambda = \frac{2\pi h}{(2m^* kT)^{1/2}}. \quad (5.7)$$

Будем для определенности рассчитывать ее для тяжелых электронов в Si, Ge, где m^* – анизотропная. Поскольку в соотношении присутствует постоянная Планка, все расчеты необходимо вести в системе единиц СИ. Величины дебройлевской длины волны l (в нм) приведены ниже:

	Si	Ge	GaAs	InSb
$T = 300$ К	7,7	6,0	29,0	67,0
$T = 77$ К	15,4	12,0	58,0	134,0

Следовательно, при $T = 77$ К дебройлевская длина волны возрастает в 2 раза.

5.7. Поскольку заряд в ОПЗ $Q_{sc} \gg Q_B$ в основном обусловлен ионизованными донорами, то можно воспользоваться приближением треугольной потенциальной ямы. Для определенности будем считать E_i , N_i , l_c для тяжелых дырок. Рассчитаем необходимые параметры:

$$\varphi_0 = 0,45 \text{ эВ}, E_s = \frac{Q_B}{\epsilon_s \epsilon_0} = \sqrt{\frac{2qN_D 2\varphi_0}{\epsilon_s \epsilon_0}} = 5,3 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}},$$

$$E_i = \left[\frac{qh\epsilon_s}{(2m^*)^{1/2}} \right]^{2/3} \cdot \gamma_i = 0,044 \text{ эВ}.$$

Значение энергии дна подзон будет:

$I = 0$	$g_0 = 2,238$	$E_0 = 0,103 \text{ эВ}$
$I = 1$	$g_1 = 4,087$	$E_1 = 0,18 \text{ эВ}$
$I = 2$	$g_2 = 5,52$	$E_2 = 0,24 \text{ эВ}$

Значение уровня Ферми на поверхности F_s , отсчитанное, как и E_i , от дна валентной зоны будет $F_s = \frac{E_g}{2qg_0} = 0,13 \text{ эВ}$. Отметим, что отсчет F_s и E_i проведен в противоположные стороны; поэтому в функции заполнения уровней, куда входит расстояние между F_s и E_i , они должны суммироваться.

Число электронов N_i :

$$N_i = \frac{kT}{\pi h^2} m^* \cdot \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{F_s + E_i}{kT} \right) \right] \approx \frac{kT}{\pi h^2} m^* \exp \left(-\frac{F_s + E_i}{kT} \right)$$

$$N_0 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}, N_1 = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2}, N_2 = 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}.$$

Область локализации λ_c будет:

$$\lambda_{ci} = \frac{2E_i}{3q\epsilon_s},$$

$$\lambda_{c0} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 130 \text{ \AA}, \lambda_{c1} = 230 \text{ \AA}, \lambda_{c2} = 310 \text{ \AA}.$$

5.8. Величина заряда в ПС: $Q_{ss} = -qN_{ss}(\psi_s - \varphi_0)$, а заряд Q_{sc} в ОПЗ при условиях задачи обусловлен ионизованными акцепторами, т.е.

$$Q_{sc} = \sqrt{2q\epsilon_s \epsilon_0 N_A \psi_s}.$$

Рассчитаем необходимые параметры: $\varphi_0 = 0,46 \text{ эВ}$ и получим:

	$Q_{ss}, \text{ Кл/см}^2$	$Q_{sc}, \text{ Кл/см}^2$
$\psi_s = 0$	$+1,5 \cdot 10^{-7}$	0
$\psi_s = \varphi_0$	0	$-3,9 \cdot 10^{-7}$
$\psi_s = 2\varphi_0$	$-1,5 \cdot 10^{-7}$	$-5,5 \cdot 10^{-7}$

5.9. Постоянную времени моноэнергетических ПС τ , эквивалентную последовательную емкость C_s и сопротивление R_s рассчитывают по формулам:

$$C_s = \frac{q^2}{kT} \cdot N_s \cdot f_0 \cdot (1 - f_0);$$

$$R_s = \frac{kT}{q^2} \cdot \frac{1}{N_s \cdot (1 - f_0) \cdot \alpha \cdot n_{s0}};$$

$$\tau = R_s \cdot C_s;$$

$$\alpha = \sigma_t \cdot v_t;$$

$$f_0 = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_t - F_s}{kT}}}.$$

Найдем вероятность заполнения уровня ловушек: уровень Ферми совпадает с ПС $E_t = F_s$, т.е. $f_0 = 0,5$. Найдем как и ранее: $\varphi_0 = 0,27$ эВ, вероятность захвата $\alpha = 1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, тепловую скорость $v = 10^7$ см/с, изгиб зон на поверхности $\psi_s = E_t - \varphi_0 = 0,18$ эВ, концентрацию электронов на поверхности $n_{s0} = 5,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Тогда $R_s = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, $C_s = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/см}^2$, $\tau = 8,8 \cdot 10^{-10} \text{ с}$.

5.10. Плотность поверхностных состояний в методе Термана рассчитывается

$$N_{ss} = \frac{C_{ox}}{q} \cdot \frac{\Delta V_G}{\Delta \psi_s}. \quad (5.8)$$

Где ΔV_G – сдвиг экспериментальной ВФХ относительно теоретической ВФХ при двух значениях ψ_s , т.е. фактически $\Delta V_G = \Delta V_{G \text{ теор}} + \Delta V_{G \text{ эксп}}$. Значение напряжения на затворе идеальной МДП-структуры равно:

$$V_{G \text{ теор}} = \frac{Q_{sc}(\psi_s)}{C_{ox}} + \psi_s. \quad (5.9)$$

При этом заряд в ОПЗ Q_{sc} определим по (5.2), а емкость подзатворного диэлектрика найдем по формуле плоского конденсатора:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_n \epsilon_0}{d_n} = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{см}^2}. \quad \text{Значения } \psi_s \text{ выберем вблизи плоских зон}$$

$$\psi_s = \pm \frac{kT}{q} = \pm 0,0259 \text{ эВ}. \quad \text{Тогда } \Delta V_{G \text{ теор}} = 0,070 - (-0,087) = 0,16 \text{ В}. \quad \text{Значение}$$

$$\Delta V_{G \text{ эксп}} \text{ найдем из наклона ВФХ } \Delta V_{G \text{ эксп}} = \frac{\Delta C}{\delta}.$$

Удельную емкость МДП-структуры рассчитаем как

$$C = \frac{C_{ox} \cdot C_{sc}(\psi_s)}{C_{ox} + C_{sc}(\psi_s)}, \quad (5.10)$$

учитывая, что емкость ОПЗ C_{sc} можно определить по (5.4), то $\Delta C = 184 - 148 = 36 \text{ пФ}$. $\Delta V_{G \text{ эксп}} = 0,86 \text{ В}$. И окончательно $N_{ss} = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$.

5.11. Для континуума поверхностных состояний в максимуме кривой нормированной проводимости $\frac{G_p(\omega)}{\omega} = qN_{ss} \frac{\ln 3}{4} = 0,27 \cdot qN_{ss}$ и $\omega_m \tau = 1,98$. Отсюда

$$N_{ss} = 4,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1} \text{ и } \tau = 10^{-5} \text{ с. Зная постоянную времени } \tau = \frac{1}{\sigma_t \nu_t n_{s0}},$$

можно определить сечение захвата ловушки $\sigma_t = 10^{-14} \text{ см}^2$, т.е. размер ловушки соответствует кулоновскому центру захвата $10\text{Б} \times 10\text{Б}$.

6. Полевые транзисторы

6.1. Как и ранее рассчитаем $\varphi_0 = 0,29 \text{ эВ}$, высоту потенциального барьера $\varphi_k = 4,05 + 0,56 + 0,29 - 4,1 = 0,8 \text{ эВ}$, емкость подзатворного диэлектрика $C_{ox} = 3,38 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$. Пороговое напряжение V_T :

$$V_T = \Delta\varphi_{ms} + 2 \cdot \varphi_0 + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s \varepsilon_0 q N_D \varphi_0}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}, \quad (6.1)$$

$$V_T = 0,8 + 0,58 + 0,42 - 0,29 = 1,51 \text{ В.}$$

6.2. ВАХ МОП-транзистора в области плавного канала описывается формулой:

$$I_D = \frac{W}{L} \cdot C_{ox} \cdot \mu \cdot (V_G - V_T) \cdot V_D. \quad (6.2)$$

Учитывая, что $R = \frac{V_D}{I_D}$, имеем:

$$(V_G - V_T) = \frac{L}{W} \cdot \frac{1}{R \cdot C_{ox} \cdot \mu} = 3,1 \text{ В,}$$

6.3. Напряженности полей в нижнем E_1 и верхнем слое E_2 связаны законом Гаусса: $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 + \frac{Q}{\varepsilon_0}$, где Q – заряд, накопленный в плавающем затворе.

Кроме того, $V_G = E_1 d_1 + E_2 d_2$. Следовательно, поле в нижнем слое:

$$E_1 = \frac{V_G}{d_1 + d_2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} + \frac{Q}{\varepsilon_0 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{d_1}{d_2})}. \quad (6.3)$$

Ток $J = \sigma E_1$ зависит от накопленного заряда Q как $J = 0,2 - 2,26 \cdot 10^5 \cdot |Q|$. Рассмотрим два случая:

а) Если внутреннее поле существенно меньше внешнего, т.е. в уравнении (6.3) первое слагаемое много больше второго, то $Q = \int J dt \approx Jt$, т.е. имеем

$Q = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл и $\Delta V_T = \frac{Q}{C_{\text{ок}}} = 0,565$ В, где емкость окисла

$C_{\text{ок}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0}{d_2}$, т.к. емкость нижнего слоя много больше, чем

верхнего $C_1 \gg C_2$.

б) Если $t \rightarrow \infty$, то ток J падает (т.е. $J \rightarrow 0$), и соответственно из выражения для тока $J = 0,2 - 2,26 \cdot 10^5 \cdot |Q| = 0$ можно получить встроенный заряд

$Q = 0,2 / 2,26 \cdot 10^5 = 8,84 \cdot 10^{-7}$ Кл и $\Delta V_T = 9,98$ В $\approx V_G$.

6.4. Накопление заряда в инверсионном канале при термогенерации происходит по закону:

$$N_{\text{th}} = N_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{рел}}}}), \quad \text{где} \quad \tau_{\text{рел}} = \frac{N_D}{n_1}. \quad (6.4)$$

Площадь элемента $2,5 \cdot 10^{-7}$. Количество электронов в равновесии равно $N_s = 1 \cdot 10^{13} \cdot 2,5 \cdot 10^{-7} = 5 \cdot 10^6$ на элемент. За счет тепловой генерации имеем $N_{\text{th}} = 0,05 \cdot 2,5 \cdot 10^3 = 125$ электронов на элемент. Из уравнения (6.4), учитывая $\tau_{\text{рел}} \gg t_n$ ($t_n = 10$ мс), $\tau_{\text{рел}} = 200$ с. Сосчитав уровень легирования $N_D = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³, имеем $\tau_0 = 4$ мс.

6.5. Скорость поверхностной генерации I_s для полностью обедненной поверхности и скорость генерации I_F в приповерхностной обедненной области:

$$I_s = \frac{q n_1 S N_{ss} v_t \sigma_t}{2}; \quad I_F = \frac{q n_1 S W}{2\tau}. \quad (6.5)$$

Отсюда плотность поверхностных состояний рассчитаем при условии

$$I_s = 2 \cdot I_F, \quad \text{т.е.} \quad N_{ss} = \frac{2W}{\tau v_t \sigma_t} = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}.$$

7. Оптоэлектроника

7.1. Доля излучаемого света через лицевую поверхность светодиода F и коэффициент отражения R определяются:

$$F = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \right]; \quad R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2. \quad (7.1)$$

$P_0 = F \cdot P_i$ – внешняя мощность (P_i – внутренняя мощность);

$$P_0 = \eta \cdot I \cdot V; \quad P_i = \frac{\eta \cdot I \cdot V}{F}; \quad \frac{1}{F} = \frac{4 \cdot (3,6)^2}{\left(1 - \left(\frac{2,4}{4,6} \right)^2 \right)} = 71,23;$$

$$P_i = 0,015 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 71,23 = 0,106845 = 107 \text{ мВт.}$$

7.2. Аналогично задаче 7.1 имеем $\eta = \frac{P_0}{I \cdot V}$, учитывая что

$$P_0 = F \cdot 3 \cdot I \cdot V = \frac{F \cdot I \cdot V}{I \cdot V} = 0,3 \cdot F \text{ и } F = 0,014; \eta = 0,0042;$$

7.3. $P_f = \frac{P_{dc}}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}$. $P_f(20) = 254,2 \text{ мкВт}$; $P_f(100) = 90,9 \text{ мкВт}$;

7.4. $E_g = 1,43 \cdot 0,92 = 1,315$; $\Delta\lambda = \frac{1,24}{1,315} - \frac{1,24}{1,43} = 0,075 \text{ мкм}$.

7.5.

а) Режим фототока: ток через диод: $I = -(I_0 + I_p)$; фототок I_p равен $I_p = R \cdot P$, R – чувствительность [А/Вт]:

$$R = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \nu} = \frac{\eta \cdot q \cdot \lambda}{h \cdot c}, \quad \eta = \frac{r_e}{r_p} = \frac{r_e \cdot h \cdot \nu}{P}, \quad (7.2)$$

где r_e – число появившихся при облучении электронов, r_p – число фотонов с длиной волны λ . Имеем $I_p = 6,4 \text{ мА}$.

б) Режим фото-э.д.с.: $I_{вц} = 0$. Тогда $I_p = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$, учитывая $I_p \gg I_0$

$$V = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_p}{I_0}\right), \quad (7.3)$$

$$V = 0,345 \text{ В.}$$

7.6. Аналогично предыдущей задаче имеем:

$$R = 0,36 \text{ А/Вт}, P = 2,78 \text{ мкВт}, r_b = 1,26 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}.$$

7.7. Входная оптическая мощность $P = \frac{r_p \cdot hc}{\lambda} = 1,32 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$, фототок

$I_p = R \cdot P = 7,95 \cdot 10^{-10} \text{ А}$, выходной ток $I = M \cdot I_p = 15,9 \text{ нА}$, $r_e = I_p/q = 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, отсюда квантовый выход $\eta = r_e/r_p = 0,5$.

7.8. Ток на выходе $I = M \cdot I_p$, отсюда имеем $I_p = 5 \cdot 10^{-11} \text{ А}$ и $r_p = I_p/(q\eta) = 6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$.

8. Интегральные микросхемы

8.1. Технологические операции создания транзистора типа *n-p-n*:

- 1) Эпитаксиальное наращивание слоя *n*-типа ($\rho = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $d = 0,254 \text{ мм}$);
- 2) Наращивание SiO_2 ($d = 500 \text{ нм}$) на эпитаксиальный слой;
- 3) Нанесение фоторезиста, маскирование и вытравливание окон в слое;
- 4) Легирование акцепторной примесью путем диффузии атомов бора;
- 5) Наращивание слоя SiO_2 ;

- 6) Повторение операции 3 для подготовки базовой области;
- 7) Диффузия бора в базовую область;
- 8-11) Аналогично повторение операций для подготовки областей эмиттера и коллектора;
- 12) Повторение операции 3 для создания окон под контактные площадки;
- 13) Металлизация всей поверхности вакуумным распылением алюминия;
- 14) Повторение операции 3 для создания межсоединений. Удаление излишков алюминия;
- 15) Контроль функционирования;
- 16) Помещение в корпус;
- 17) Выходной контроль.

8.2. Толщину подзатворного диэлектрика можем найти как $d_{ox} = \frac{U}{E} = \frac{10}{8} \cdot 10^6 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ см, а емкость МОП-конденсатора найдем по формуле плоского конденсатора: $C_{ox} = 2,7 \cdot 10^{-7}$ Ф/см². Емкость *p-n* перехода C_j считаем по (3.10): $W = 8,9 \cdot 10^{-5}$ см, $C_j = 1,16 \cdot 10^{-8}$ Ф/см², $\frac{C_{mos}}{C_j} = 23,4$.

8.3. Число квадратов в рисунке резистора равно $\frac{L}{W} = 4$. Поверхностное сопротивление рассчитаем как $R_s = \frac{1000}{4} = 250 \frac{\text{Ом}}{\text{квад}}$, тогда усредненное

удельное сопротивление $\rho_{cp} = \frac{x_j}{q\mu_{cp}N_{as}} = R_s \cdot x_j = 250 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$,

где N_{as} – поверхностная концентрация примеси.

8.4. Емкость $C = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0 S}{d_{ox}} = 1,7 \cdot 10^{-11}$ Ф, сопротивление $R = \frac{\rho L}{Wd} = 2 \text{ кОм}$,

$RC = 34 \text{ нс}$.

8.5. Сопротивление такого резистора можно представить как параллельную цепочку двух резисторов R_1 и R_2 : $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Известно, что

$$\frac{1}{R} = q\mu N'_D = q\mu N_D x.$$

Тогда $R_1 = 223 \text{ Ом}$, $R_2 = 428$ и $R = 147 \text{ Ом}$.

8.6. Источник тока с токовым зеркалом Уилсона для операционного усилителя.

а) Запишем для трех узлов соотношения токов в соответствии с рисунком в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{к1} + I_{б2}, \\
 I_2 &= I_3 - I_{б2}, \\
 I_3 &= I_{к3} + I_{б1} + I_{б3}.
 \end{aligned}$$

Учитывая, что $I_6 = \frac{I_k}{\beta}$, получим:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_k \left(1 + \frac{1}{\beta_2} \right); \\
 I_2 &= I_k \left(1 - \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_3} \right).
 \end{aligned}$$

Далее,

$$I_2 = I_k \left(1 + \frac{1}{\beta_2} \right) + I_k \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_3} - \frac{2}{\beta_2} \right),$$

с учетом $I_1 \approx I_k$ окончательно имеем искомое

$$I_2 = I_1 \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_3} - \frac{2}{\beta_2} \right).$$

б)

$$I_1 = \frac{V_{\Pi}^+ - V_{\Pi}^- - V_{бэ2} - V_{бэ3}}{R_1}; \quad V_{бэ} = 0,7 \text{ В};$$

$$R_1 = \frac{V_{\Pi}^+ - V_{\Pi}^- - V_{бэ2} - V_{бэ3}}{I_1} = \frac{20 - 1,4}{1 \text{ мА}} = 18,6 \text{ кОм}.$$

в) Диапазон линейного изменения напряжения обусловлен работой транзистора в активной области ВАХ и связан с напряжением питания $V_{\Pi} = \pm 10 \text{ В}$, напряжением насыщения $V_{\text{нас}} = 0,2 \text{ В}$ и напряжением пробоя коллектор-эмиттер (50 В) транзисторов.

Минимальное напряжение:

$$V_{\text{мин}} = V_{\Pi} + V_{бэ2} + V_{\text{нас}} = -10 + 0,7 + 0,2 = -9,1 \text{ В}.$$

Максимальное напряжение:

$$V_{\text{макс}} = 50 - V_{\text{мин}} = +41 \text{ В}.$$

г) Выходное дифференциальное сопротивление

$$r_0 = \frac{1}{g_0}, \quad g_0 = \frac{dI_0}{dV_0} \approx \frac{I_k}{\beta + 1} V_a,$$

где V_a – напряжение Эрли (обычно около 200 В), для $I_k = 10^{-3} \text{ А}$ и $\beta = 100$ имеем $r_0 = 20 \text{ МОм}$;

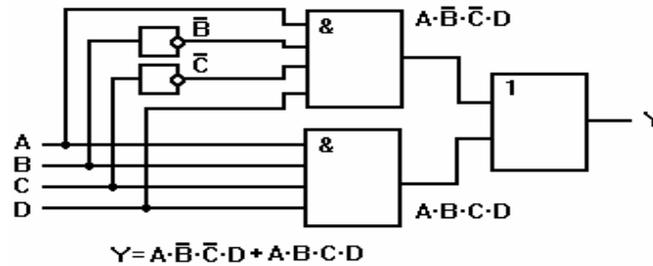
д) Процентное изменение I_2 при изменении $U_{к2}$ на 1 В связано с выходным дифференциальным сопротивлением r_0 как

$$\frac{1}{I_0} \cdot \frac{dI_0}{dV_0} = \frac{1}{I_{к} r_0} = 0,005 \frac{\%}{\text{В}}.$$

8.7. Логические элементы

а				б			
1	1	0	1	1	0	0	0
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>

8.8. Логическая схема и булевское выражение



8.9. D-триггер

Импульс	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Состояние	установ.	сброс	ожидан.	установ.	сброс
Выход <i>Q</i>	1	0	0	1	0

8.10. JK-триггер

Импульс	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Состоян.	сброс	триг.	триг.	устан.	триг.	ожид.
Выход <i>Q</i>	0	1	0	1	0	0

устан. – установка;
 ожид. – ожидание (хранение);
 триг. – триггер (счетный режим).

8.11. Мультиплексор

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
<i>Y</i>	0	1	1	0	1	0	0	1	0

Да, можно, подключив на адресные входы 3–разрядный счетчик.

8.12. ОЗУ 16×4 бита

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
Адрес	1111	1110	1101	0000	0000	1101	1110	1111
Данн. <i>Q</i>	1100	1000	1011	1111	неизв	1011	1000	1100
Состоян	зап	зап	Зап	ожд	чтен	чтен	чтен	чтен

Состояние	<u>CS</u>	<u>WE</u>	выходы Q
Запись	0	0	1
Чтение	0	1	инверсия данных
Ожидание	1	*	1

Литература

1. Гуртов В. А. Сборник задач по физике поверхности полупроводников/ Учебное пособие. – Петрозаводск. ПетрГУ, 1985. 92 с.
2. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / М. Высшая школа, 1991. 352 с.
3. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем / М. Мир 1989. 630 с.
4. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Карпенко И. В., Миронов А. Г. Сборник задач по физике полупроводников / М. Наука, 1987. 142 с.
5. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы / М., Мир, 1988. 583 с.
6. Dr. Geoff Childs (Oxford Brookes University), Optoelectronics, Mikkeli Polytechnic, 1996. (Курс лекций по оптоэлектронике)

Составители
Валерий Алексеевич Гуртов
Олег Николаевич Ивашенков

Сборник задач по микроэлектронике

Учебное пособие