

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**СЛАВНИКОВА М.М. НЕСМЕЛОВ Н. С.,
ШИРОКОВ А. А.**

**Сборник задач
и методические указания по про-
ведению практических занятий**

по дисциплине

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МИКРО- и НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Томск, 2015

Введение

В настоящем учебном пособии представлены задачи, решение которых позволит студентам закрепить знания, полученные при изучении курсов «Физические основы микро- и наноэлектроники» и «Физика полупроводников». Для решения задач, сгруппированных в десять разделов, студенту необходимо предварительно проработать соответствующую по тематике часть лекционного курса.

Некоторые физические постоянные и соотношения между единицами физических величин

Масса покоя электрона $m_0=9,11\times 10^{-31}$ кг.

Абсолютное значение заряда электрона $q=1,6\times 10^{-19}$ Кл.

Скорость света в вакууме $c=3\times 10^8$ м/с.

Постоянная Планка $h=6,62\times 10^{-34}$ Дж·с = $4,14\times 10^{-15}$ эВ·с.

Постоянная Дирака $\hbar=h/2\pi =1,05\times 10^{-34}$ Дж·с.

Постоянная Больцмана $k_0=1,38\times 10^{-23}$ Дж/К = $8,625\times 10^{-5}$ эВ/К.

Диэлектрическая постоянная вакуума $\epsilon_0 =8,85\times 10^{-12}$ Ф/м.

Абсолютная температура $T= t^{\circ}\text{C} +273$.

$1\text{эВ} = 1,6\times 10^{-19}$ Дж.

$1\text{В} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$.

$1\text{А} = 1 \text{ Кл} \cdot \text{с}^{-1}$.

$1\text{Дж} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$.

1. Элементы зонной теории твердого тела

Задача 1.1. Вычислите длину волны де Бройля абсолютно свободного электрона с энергией $E=100$ эВ.

Задача 1.2. Протону с энергией E_1 соответствует длина волны $\lambda=4,8$ нм. Вычислите длину волны указанной свободной микрочастицы, если ее энергия увеличилась в четыре раза.

Задача 1.3. Найдите волновое число свободного электрона, который перемещается со скоростью $v=5 \times 10^5$ м/с.

Задача 1.4. Вычислите энергию электрона в электрон-вольтах на уровне с квантовым числом $n=3$ в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 0,43 нм.

Задача 1.5. Определите импульс микрочастицы, которой соответствует длина волны $\lambda=0,125$ нм.

Задача 1.6. Вычислите скорость электрона, которому соответствует длина волны $\lambda=0,125$ нм.

Задача 1.7. Оцените в электрон-вольтах энергию, которую необходимо сообщить электрону в глубокой прямоугольной потенциальной яме для его перехода с энергетического уровня с квантовым числом $n=2$ на уровень с $n=3$. Ширина потенциальной ямы равна 0,43 нм.

Задача 1.8. Электрон в атоме водорода переходит с энергетического уровня с главным квантовым числом $n=3$ на уровень с $n=1$. Определите в нанометрах длину волны излучения, которым сопровождается такой переход.

Задача 1.9. Вычислите в электрон-вольтах энергию, которую приобретает электрон с длиной свободного пробега, равной 3×10^{-6} м, в примесном полупроводнике в электрическом поле с напряженностью 4×10^3 В/м.

Задача 1.10. Расстояние между энергетическими уровнями зоны проводимости составляет $\delta E=1 \times 10^{-22}$ эВ. Вычислите минимальную напряженность электрического поля, при воздействии которого становится возможным рост энергии электрона с длиной свободного

пробега 1×10^{-8} м, характерной для случая тепловых столкновений электронов зоны проводимости с атомами полупроводника.

Задача 1.11. Представив движение электрона в кристалле абсолютно свободным, найдите выражение для его “эффективной” массы, обозначив ее символом μ , и объясните полученный результат.

Задача 1.12. Вычислите эффективную массу электрона, который перемещается в арсениде галлия в электрическом поле 6×10^2 В/м с ускорением $1,6 \times 10^{17}$ см/с².

Задача 1.13. Оцените в электрон-вольтах энергию ионизации примесного уровня в кристалле германия, легированном атомами мышьяка, если известно, что эффективная масса носителей заряда в нем $m^* = 0,25 m_0$, диэлектрическая проницаемость германия равна 16.

Задача 1.14. Оцените в электрон-вольтах энергию ионизации примесного уровня в кристалле германия, легированном атомами индия, если известно, что эффективная масса носителей заряда в нем $m^* = 0,25 m_0$, диэлектрическая проницаемость германия равна 16.

2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках

Задача 2.1. Определите с точностью до 0,001 вероятность заполнения электронами квантовых состояний, расположенных на 0,01 эВ выше уровня Ферми в вырожденном полупроводнике при температуре 50⁰ С.

Задача 2.2. Определите с точностью до 0,001 вероятность заполнения электронами невырожденных квантовых состояний, расположенных на 0,01 эВ выше уровня Ферми при температуре 50⁰ С.

Задача 2.3. Уровень Ферми в акцепторном германии (*p-Ge*) при температуре 300 К находится в запрещенной зоне на 0,01 эВ выше потолка валентной зоны. Рассчитайте вероятность заполнения электронами энергетических уровней в зоне проводимости, если известно, что ширина запрещенной зоны при указанной температуре равна 0,67 эВ.

Задача 2.4. Определите вероятность заполнения электронами уровней на дне зоны проводимости и дырками у потолка валентной зоны германия при температуре 27°C , если ширина запрещенной зоны указанного полупроводника равна $0,67\text{ эВ}$, а уровень Ферми находится на $0,2\text{ эВ}$ ниже дна зоны проводимости.

Задача 2.5. Вычислите эффективную плотность состояний в зоне проводимости германия при температуре 300 К , если эффективная масса плотности состояний для носителей заряда в ней $m_n^*=0,55 m_0$.

Задача 2.6. Вычислите эффективную плотность состояний в валентной зоне германия при температуре 300 К , если эффективная масса плотности состояний для носителей заряда в ней $m_p^*=0,388 m_0$.

Задача 2.7. Вычислите в электрон-вольтах положение уровня Ферми относительно потолка валентной зоны в собственном германии при температуре 27°C , если эффективные массы электронов и дырок, соответственно, $m_n^*=0,56 m_0$, $m_p^*=0,35 m_0$, ширина запрещенной зоны германия $\Delta E = 0,67\text{ эВ}$.

Задача 2.8. Вычислите в электрон-вольтах положение уровня Ферми относительно потолка валентной зоны в собственном кремнии при температуре 27°C , если эффективные массы электронов и дырок, соответственно, $m_n^*=1,08 m_0$, $m_p^*=0,56 m_0$, ширина запрещенной зоны кремния $\Delta E = 1,11\text{ эВ}$.

Задача 2.9. Рассчитайте концентрацию собственных носителей заряда в германии при температуре 300 К , если ширина запрещенной зоны $\Delta E=0,67\text{ эВ}$, эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, $N_c=1,02\times 10^{25}\text{ м}^{-3}$ и $N_v=6,08\times 10^{24}\text{ м}^{-3}$.

Задача 2.10. Найдите ширину запрещенной зоны (в электрон-вольтах) арсенида галлия при температуре $T=300\text{ К}$, если известно, что собственная концентрация носителей заряда в нем $n_i=1,1\times 10^{13}\text{ м}^{-3}$, эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, $N_c=4,7\times 10^{23}\text{ м}^{-3}$ и $N_v=7\times 10^{24}\text{ м}^{-3}$.

Задача 2.11. Вычислите концентрацию собственных носителей заряда в кремнии при температуре 300 К, если ширина запрещенной зоны $\Delta E = 1,11$ эВ, эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, $N_c = 2,8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $N_v = 1,02 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Задача 2.12. Определите в электрон-вольтах положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости при температуре $T = 300$ К в кристалле германия, легированном атомами сурьмы до концентрации 10^{23} м^{-3} . При решении следует предполагать полную ионизацию примесных атомов. Эффективная плотность состояний в зоне проводимости $N_c = 1,02 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.13. Вычислите концентрацию собственных носителей заряда в германии при температуре $T = 43^\circ \text{ C}$ с учетом температурного изменения ширины запрещенной зоны по закону $\Delta E(T) = \Delta E(0) - \alpha T$. Эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне считайте равными $1,04 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и $6,1 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$, соответственно, и независимыми от температуры. $\Delta E(0) = 0,785$ эВ, $\alpha = 3,9 \times 10^{-4}$ эВ/К.

Задача 2.14. Рассчитайте концентрацию собственных носителей заряда в арсениде галлия при температуре 300 К, если его ширина запрещенной зоны $\Delta E = 1,39$ эВ, а эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, равны соответственно, $N_c = 4,7 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $N_v = 7 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.15. Вычислите с точностью до первой значащей цифры в электрон-вольтах энергию ионизации примесного уровня в кристалле германия, содержащем $3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомов бора, если температура истощения примеси равна 27° K . Эффективная плотность состояний в валентной зоне $N_v = 3 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.16. В собственном германии ширина запрещенной зоны при $T = 300$ К равна 0,665 эВ. На сколько градусов надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличилось в два раза? Температурным изменением эффективной плотности состояний для электронов и дырок пренебречь.

Задача 2.17. Определите концентрацию дырок в германии, легированном атомами фосфора с плотностью $5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, если при за-

данной температуре 300 К концентрация собственных дырок равна $2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и все примесные атомы ионизированы.

Задача 2.18. Определите диапазон температур ΔT , при которых будет наблюдаться область истощения примеси в дырочном германии с концентрацией акцепторов $N_a = 5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, полагая, что ширина запрещенной зоны $\Delta E = 0,665 \text{ эВ}$, эффективные плотности состояний в зоне проводимости $N_c = 1,04 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и в валентной зоне $N_v = 6,1 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ не зависят от температуры, а энергия ионизации акцепторного уровня $E_a - E_v = 0,01 \text{ эВ}$.

Задача 2.19. Определите температурную ширину области истощения примеси в электронном кремнии с концентрацией доноров $N_d = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, полагая, что ширина запрещенной зоны $\Delta E = 1,12 \text{ эВ}$, эффективные плотности состояний в зоне проводимости $N_c = 2,8 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и в валентной зоне $N_v = 1,02 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и не зависят от температуры, а энергия ионизации донорного уровня $E_c - E_d = 0,01 \text{ эВ}$.

Задача 2.20. Рассчитайте концентрацию неосновных носителей заряда в кристалле германия, содержащем $3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомов мышьяка и $1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомов галлия, если концентрация собственных носителей заряда при заданной температуре 300 К равна $2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, и все примесные атомы ионизированы.

Задача 2.21. Определите в электрон-вольтах ширину запрещенной зоны чистого полупроводника при температуре $T = 300 \text{ К}$, если известно, что эффективные плотности состояний в зоне проводимости $N_c = 1,04 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и в валентной зоне $N_v = 6,1 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$, концентрация собственных дырок $p_i = 2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.22. Определите энергию ионизации примесного уровня в германии, легированном атомами сурьмы до концентрации $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, если при $T = 10 \text{ К}$ концентрация основных носителей равна $3,1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а эффективная плотность состояний в зоне проводимости $N_c = 1,04 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.23. Вычислите в электрон-вольтах (округлив ответ с точностью до первого знака после запятой) энергию ионизации примесного уровня в кремнии, легированном донорными атомами до концентрации $5 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, если температура истощения примеси 300

К, а эффективная плотность состояний в валентной зоне равна $1,02 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.24. Рассчитайте концентрацию неосновных носителей заряда в кристалле германия, содержащем $3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомов индия, которые при $T=300 \text{ К}$ ионизированы и образуют энергетический уровень, расположенный на $0,433 k_0 T$ выше потолка валентной зоны, где k_0 – постоянная Больцмана. Эффективная плотность состояний в валентной зоне и концентрация собственных носителей заряда равны, соответственно, $6,1 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 2.25. Найдите концентрацию собственных носителей заряда в антимониде индия (**InSb**) при $T=300 \text{ К}$, если известно, что ее температурная зависимость определяется выражением

$$n_i = 6 \times 10^{20} T^{1,5} \exp(-\Delta E / k_0 T), \text{ м}^{-3},$$

а ширина запрещенной зоны изменяется с температурой согласно формуле

$$\Delta E = 0,27 - 3 \times 10^{-4} T, \text{ эВ}.$$

Сравните полученный результат с собственной концентрацией носителей заряда в германии и объясните с физической точки зрения причину различия.

Задача 2.26. Рассчитайте концентрацию собственных носителей заряда в германии при $T=300 \text{ К}$, если ширина запрещенной зоны $\Delta E=0,67 \text{ эВ}$, эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, равны $1,02 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и $6,08 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

3. Электропроводность твердых тел

Задача 3.1. Образец германия (**Ge**) при $T=300 \text{ К}$ находится в электрическом поле с напряженностью 100 В/м , эффективная масса электронов проводимости $m_n^* = 0,12 m_0$, время релаксации $\tau = 3 \times 10^{-13} \text{ с}$.

Определите:

- 1.1. Среднюю скорость хаотического движения электронов;
- 1.2. Дрейфовую скорость электронов;
- 1.3. Среднюю длину свободного пробега электронов зоны проводимости.

Задача 3.2. Через образец германия *n*-типа с концентрацией ионизированных при $T=300$ К доноров $N_d=2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ пропускается ток плотностью $5 \times 10^3 \text{ А/м}^2$. Эффективная масса электронов в германии $m_n^* = 0,12m_0$.

Вычислите:

- 2.1. Тепловую скорость электронов;
- 2.2. Дрейфовую скорость носителей заряда.

Задача 3.3. Вычислите удельное сопротивление собственного германия (**Ge**), который при $T=300$ К имеет концентрацию собственных носителей заряда $n_i=2,1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижности электронов и дырок, соответственно, $\mu_n=0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $\mu_p=0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 3.4. Вычислите удельное сопротивление германия *p*-типа с концентрацией дырок $6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность которых равна $0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Собственная концентрация дырок и подвижность электронов, соответственно, равны $2,1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 3.5. Вычислите отношение электронной и дырочной проводимостей акцепторного полупроводника с концентрацией основных носителей заряда $6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и подвижностью $0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. При температуре $T=300$ К концентрация собственных носителей заряда и подвижность электронов, соответственно, равны $2,1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 3.6. Определите плотность тока в дырочном германии (*p-Ge*), который находится в электрическом поле напряженностью 100 В / м , если известно, что концентрация основных носителей заряда равна 10^{20} м^{-3} , подвижности электронов и дырок, соответственно, равны $0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а концентрация собственных носителей заряда $n_i=2,1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 3.7. Определите плотность тока в донорном арсениде галлия (**GaAs**) с концентрацией электронов $n_{n0}=5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ в электрическом поле напряженностью 100 В/м , если при температуре 300 К дрейфовая подвижность электронов $\mu_n=0,85 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, дырок $\mu_p=0,04 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а собственная концентрация носителей заряда $n_i=1,1 \times 10^{13} \text{ м}^{-3}$.

Задача 3.8. Рассчитайте величину напряжения, которое требуется подать на омические контакты на концах полупроводникового образца с концентрацией электронов $n_{n0}=4 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, длиной 20 мм и

прямоугольным поперечным сечением $2 \times 5 \text{ мм}^2$, чтобы в продольном направлении протекал электрический ток силой 15 мА. Подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, ток неосновных носителей пренебрежимо мал.

Задача 3.9. Определите дрейфовые скорости электронов в образцах кремния (**Si**), германия (**Ge**), арсенида галлия (**GaAs**), арсенида индия (**InAs**) и антимонида индия (**InSb**) *n*-типа проводимости при $T = 300 \text{ К}$ в электрическом поле напряженностью 100 В/м, если подвижности основных носителей заряда в них равны, соответственно, 0,15, 0,39, 0,85, 2,7 и 7,7 $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 3.10. Определите подвижности электронов в дырочных германии, кремнии и арсениде галлия при $T = 300 \text{ К}$, если в электрическом поле напряженностью 2000 В/м они имеют дрейфовые скорости 780, 300 и 1700 м/с, соответственно.

Задача 3.11. Вычислите дрейфовые скорости электронов и дырок в кристалле собственного кремния при комнатной температуре в электрическом поле 3000 В/м, если концентрация собственных носителей заряда $n_i = 1,6 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$, а электронная и дырочная электропроводности $\sigma_n = 3,8 \times 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ и $\sigma_p = 1,5 \times 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$.

Задача 3.12. Определите отношение плотностей тока через образцы электронного и дырочного антимонида индия с одинаковыми концентрациями основных носителей заряда, равными $2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, в электрическом поле напряженностью 2000 В/м при $T = 300 \text{ К}$. Подвижность электронов $\mu_n = 20 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и дырок $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 3.13. Рассчитайте значения подвижности носителей заряда в зоне проводимости германия в случае их рассеяния на фононах при температурах $T_1 = 400 \text{ К}$ и $T_2 = 500 \text{ К}$, если известно, что подвижность электронов в германии при комнатной температуре $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 3.14. Рассчитайте значения подвижности носителей заряда в валентной зоне германия в случае их рассеяния на фононах при температурах $T_1 = 400 \text{ К}$ и $T_2 = 500 \text{ К}$, если известно, что подвижность дырок в германии при комнатной температуре $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 3.15. Вычислите электропроводность собственного германия при $T = 300 \text{ К}$, предполагая, что $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$,

$\Delta E = 0,66$ эВ, эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, равны $1,04 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и $6,1 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Задача 3.16. Определите электропроводность собственного кремния при температурах 300 К и 500 К, приняв, что эффективные плотности квантовых состояний в зоне проводимости и в валентной зоне равны, соответственно, $2,8 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и $1,02 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, подвижности электронов $\mu_n = 0,15 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и дырок $\mu_p = 0,06 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ не зависят от температуры в отличие от ширины запрещенной зоны, которая изменяется с температурой по закону $\Delta E(T) = \Delta E(0) - \alpha T$, где $\Delta E(0) = 1,21$ эВ, $\alpha = 2,4 \times 10^{-4}$ эВ/К.

Задача 3.17. Вычислите удельные сопротивления двух кремниевых образцов, из которых первый содержит 10^{23} м^{-3} , а второй 10^{17} м^{-3} атомов бора, ионизированных при $T = 300$ К. При указанной температуре собственная концентрация носителей заряда в кремнии равна $1,6 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,15 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и подвижность дырок $\mu_p = 0,06 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 3.18. Рассчитайте электрические сопротивления в продольном направлении образцов германия и арсенида галлия, которые имеют сильно выраженный *n*-тип проводимости с одинаковыми концентрациями основных носителей (10^{24} м^{-3}), поперечным сечением $5 \times 1 \text{ мм}^2$ и длиной 15 мм при температуре $T = 300$ К. Подвижности электронов в германии и арсениде галлия равны, соответственно, $0,38 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $0,85 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 3.19. Определите температуру, при которой электропроводность собственного германия будет в два раза выше его электропроводности при 300 К. В расчете используйте ширину запрещенной зоны $\Delta E = 0,665$ эВ.

Задача 3.20. Вычислите электропроводность германия с примесными атомами галлия, которые создают в запрещенной зоне уровень на расстоянии 0,011 эВ от потолка валентной зоны. В расчете следует принять: $T = 300$ К, концентрация атомов галлия $4 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$, эффективная плотность состояний в зоне проводимости $1,04 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, подвижность дырок $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 3.21. Рассчитайте, во сколько раз при $T = 300$ К различаются электропроводности кристаллов арсенида галлия электронного

и дырочного типов проводимости, если они имеют одинаковые концентрации ионизированных примесных атомов ($N_d=N_a=5 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$), собственная концентрация носителей заряда в арсениде галлия равна $1,1 \times 10^{13} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n=0,85 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и подвижность дырок $\mu_p=0,04 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

4. Электропроводность полупроводников в сильном электрическом поле

Задача 4.1. Оцените критическую напряженность электрического поля* в германии *n*-типа проводимости при $T=300 \text{ К}$. Для расчета принять подвижность электронов $\mu_n=0,38 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, эффективную массу электрона $m_n^* = 0,12 m_0$, где m_0 - масса покоя электрона.

Задача 4.2. Рассчитайте критическую напряженность электрического поля* в кремнии *n*-типа проводимости при $T=300 \text{ К}$, если эффективная масса электрона в нем $m_n^* = 0,98 m_0$, где m_0 -масса покоя, подвижность электрона $\mu_n = 0,15 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 4.3. Определите критическую напряженность электрического поля* в арсениде галлия *n*-типа проводимости при $T=300 \text{ К}$, если эффективная масса электрона в нем $m_n^* = 0,07 m_0$, где m_0 - масса покоя, подвижность $\mu_n=0,86 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 4.4. В образце германия с примесью атомов сурьмы с концентрацией $1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ создано электрическое поле с напряженностью $2 \times 10^5 \text{ В/м}$. Температура образца $T=20 \text{ К}$. Определите концентрацию неравновесных носителей заряда, созданных электрическим полем в образце, если эффективная плотность состояний в зоне проводимости при $T=20 \text{ К}$ $N_c=2 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, постоянная кристаллической решетки германия $a=0,565 \text{ нм}$, положение примесного уровня $E_c-E_d=0,0096 \text{ эВ}$.

Задача 4.5. Рассчитайте подвижность “легких” электронов в арсениде галлия, если их эффективная масса в первой долине $m_n^*=0,072 m_0$, а время релаксации $\tau=3,4 \times 10^{-13} \text{ с}$.

Задача 4.6. Рассчитайте плотность тока электронов, которые находятся вблизи дна зоны проводимости в первой долине донорно-

* Электрическое поле считается критическим, когда значение дрейфовой скорости достигает 0,1 значения тепловой скорости.

го арсенида галлия с примесью атомов серы в концентрации $2 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, если полупроводник находится в электрическом поле напряженностью 1000 В/м .

Дополнительные указания: подвижность электронов $\mu_n = 0,831 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, температура образца $T=300 \text{ К}$, все примеси при этой температуре ионизированы.

Задача 4.7. Определите концентрацию “легких” электронов в образце ***n*-GaAs** с примесью донорных атомов с концентрацией $N_d=2 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и энергией ионизации донорного уровня $E_c-E_d=0,006 \text{ эВ}$ при $T=300 \text{ К}$, если эффективная плотность состояний в зоне проводимости

$$N_c=4,7 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 4.8. Найдите отношение (μ_1/μ_2) подвижностей “легких” и “тяжелых” электронов в долинах (1) и (2) зоны проводимости **GaAs**. Эффективная масса электрона в первой долине $m_n^*=0,072 m_0$, а во второй $m_n^*=1,2 m_0$, где m_0 - масса покоя электрона.

Задача 4.9. Определите, во сколько раз отличаются плотности токов “легких” и “тяжелых” электронов в арсениде галлия, который находится в электрическом поле с напряженностью $1,2 \times 10^6 \text{ В/м}$. Общая концентрация электронов в зоне проводимости $n_{n0}=1,9 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, концентрация “тяжелых” электронов $n_t=8,4 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, а подвижности “легких” и “тяжелых” электронов, соответственно, равны $0,488 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $0,029 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 4.10. Определите частоту колебаний электрического тока в образце ***n*-GaAs** длиной $d=5 \text{ мкм}$ при приложении к нему постоянного напряжения. Примите подвижность электронов во второй долине зоны проводимости $\mu_{n2}=3,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, напряженность поля в области домена $E_d=3,3 \times 10^7 \text{ В/м}$.

Задача 4.11. Оцените возможную частоту колебаний электрического тока в образце арсенида галлия длиной $L=100 \text{ мкм}$, если домен перемещается от катода к аноду с дрейфовой скоростью носителей заряда $v_d=10^7 \text{ см/с}$.

Задача 4.12. Определите частоту сверхвысокочастотных колебаний электрического тока в образце арсенида галлия толщиной 9 мкм , если после возникновения колебаний напряженность поля вне

домена равна $0,2 \times 10^5$ В/м, а подвижность электронов в нижней долине $\mu_n = 0,86$ м²/В·с.

5. Генерация и рекомбинация носителей заряда

Задача 5.1. Вычислите при температуре $T=10$ К концентрацию электронов в случае их монополярной генерации в германии с примесью сурьмы (Sb) с концентрацией 3×10^{21} м⁻³, которые образуют в запрещенной зоне уровень, расположенный на 0,0096 эВ ниже дна зоны проводимости. Эффективная плотность состояний в зоне проводимости при температуре $T=10$ К равна 7×10^{23} м⁻³.

Задача 5.2. Вычислите концентрацию дырок для случая их монополярной генерации при $T=50$ К в кристалле кремния с примесью атомов бора (B) с концентрацией 4×10^{22} м⁻³, которые образуют в запрещенной зоне уровень, расположенный на 0,045 эВ выше потолка валентной зоны, если эффективная плотность состояний в валентной зоне равна $6,9 \times 10^{23}$ м⁻³.

Задача 5.3. Кристалл кремния легирован алюминием так, что концентрация акцепторов $N_a = 5 \times 10^{21}$ м⁻³, энергия ионизации акцепторного уровня равна 0,057 эВ. При температуре $T=300$ К в кристалле протекает тепловая монополярная и биполярная генерация носителей заряда. Рассчитайте отношение концентраций свободных носителей заряда, образующихся в результате вышеуказанных процессов, допустив, что эффективная плотность состояний в валентной зоне равна $1,02 \times 10^{25}$ м⁻³, в зоне проводимости $N_c = 2,8 \times 10^{25}$ м⁻³, ширина запрещенной зоны $\Delta E = 1,11$ эВ.

Задача 5.4. Вычислите концентрацию неравновесных электронов в германии с примесью атомов сурьмы (Sb), если концентрация доноров $N_d = 5 \times 10^{20}$ м⁻³, которые образуют в запрещенной зоне уровень, расположенный на 0,0096 эВ ниже дна зоны проводимости и образец находится при $T=300$ К в электрическом поле напряженностью $1,8 \times 10^6$ В/м. Дополнительные данные: эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне равны $1,04 \times 10^{25}$ м⁻³, постоянная кристаллической решетки $a = 0,565 \times 10^{-9}$ м.

Задача 5.5. Рассчитайте концентрацию неравновесных дырок в германии с примесью атомов бора (B) с концентрацией $N_a = 1 \times 10^{21}$ м⁻³ и энергией акцепторного уровня, расположенного над валентной зо-

ной на энергетическом расстоянии 0,01 эВ, если образец при $T=10$ К находится в электрическом поле напряженностью 2×10^6 В/м. Дополнительные данные: эффективная плотность состояний в валентной зоне $N_v = 6,1 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, постоянная кристаллической решетки $a = 5,65 \times 10^{-10}$ м.

Задача 5.6. Определите время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике, если их установившаяся концентрация при воздействии источника возбуждения составляет $\Delta n_{\text{ст}} = 5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а начальная скорость уменьшения избыточной концентрации при выключении источника равна $8 \times 10^{23} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Задача 5.7. Вычислите избыточную концентрацию электронов через 2 миллисекунды после выключения источника внешнего возбуждения, если ее стационарная величина $\Delta n_{\text{ст}} = 5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а время жизни $\tau = 6,25 \times 10^{-5}$ с.

Задача 5.8. В кристалле германия при включении генерационного процесса устанавливается стационарная концентрация неравновесных (избыточных) дырок $\Delta p_{\text{ст}} = 4 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Определите их концентрацию через 10 миллисекунд после прекращения процесса генерации, если сразу после выключения внешнего ионизатора скорость уменьшения избыточной концентрации равна $8 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}/\text{с}$.

Задача 5.9. В образце германия генерация неравновесных электронов выключена в момент времени $t_1 = 10^{-4}$ с, когда концентрация избыточных носителей заряда была в 10 раз выше, чем в момент $t_2 = 10^{-3}$ с. Определите время жизни неравновесных электронов.

Задача 5.10. На основе теории рекомбинации через локальный уровень определите время жизни неравновесных носителей заряда при $T=300$ К в германии n -типа с равновесной концентрацией электронов $n_0 = 2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, если рекомбинационный уровень E_r занимает в запрещенной зоне положение $E_c - E_r = 0,3$ эВ, время жизни дырок $\tau_{p0} = 5 \times 10^{-6}$ с, эффективная плотность состояний в зоне проводимости $N_c = 1,04 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, собственная концентрация носителей $n_i = 2,1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 5.11. Определите скорость поверхностной рекомбинации на обработанной пластине толщиной 0,15 мм, вырезанной из кристалла германия с объемным временем жизни неравновесных но-

сителей заряда $\tau_0=0,5$ мс, если эффективное время жизни $\tau_{\text{эфф}}=0,4$ мс.

Задача 5.12. При освещении однородной пластины германия толщиной 0,5 мм в нем происходит генерация неравновесных электронно-дырочных пар, объемное время жизни которых равно 4×10^{-4} с. Вычислите концентрацию неравновесных электронов в данном образце, если скорость поверхностной рекомбинации $s=1,2$ м/с, а скорость объемной рекомбинации $R_n=6 \times 10^{21}$ м⁻³/с.

6. Диффузия и дрейф носителей заряда в полупроводниках

Задача 6.1. Определите величину диффузионного потока неравновесных электронов в образце германия, если их концентрация на поверхности (в плоскости $x_1=0$) $\Delta n(x_1) = 4 \times 10^{22}$ м⁻³, а в объеме, в плоскости $x_2=0,5$ мм, параллельной плоскости x_1 , $\Delta n(x_2) = 9 \times 10^{20}$ м⁻³. Коэффициент диффузии электронов в германии при комнатной температуре $D_n=9,8 \times 10^{-3}$ м²/с, концентрация неравновесных электронов линейно уменьшается в объем полупроводника на участке от x_1 до x_2 .

Задача 6.2. Вычислите диффузионный электрический ток электронов через пластину германия толщиной 0,5 мм, если на одной ее поверхности ($x_1=0$) создается концентрация неравновесных носителей $\Delta n(x_1)=4 \times 10^{22}$ м⁻³, а на другой – концентрация неравновесных электронов $\Delta n(x_2)=8 \times 10^{20}$ м⁻³. Коэффициент диффузии электронов $D_n=9,8 \times 10^{-3}$ м²/с. Считайте, что концентрация избыточных электронов линейно уменьшается по толщине пластины.

Задача 6.3. В образце дырочного антимонида индия (**InSb**) подвижность электронов при $T=300$ К равна $7,7$ м²/В·с. Вычислите диффузионную длину неосновных носителей заряда, если их время жизни $\tau=3 \times 10^{-8}$ с.

Задача 6.4. Вычислите диффузионный ток неосновных носителей в образце донорного германия толщиной $d=0,5$ мм между поверхностью, на которой внешним возбуждением создаются неравновесные дырки с концентрацией $\Delta p(0)=8 \times 10^{22}$ м⁻³ с подвижностью $0,19$ м²/В·с и противоположной стороной, где концентрация избыточных носителей $\Delta p(d) = 4 \times 10^{21}$ м⁻³.

Задача 6.5. Вычислите диффузионную длину основных носителей заряда в невырожденном акцепторном кремнии при температуре $T=300$ К, если время жизни дырок $\tau_p=0,3$ мс и их подвижность $\mu_p=6 \times 10^{-2} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 6.6. Рассчитайте концентрацию неравновесных электронов на нижней грани пластины германия толщиной 0,4 мм, если на верхней грани (плоскость $x=0$) под влиянием света генерируются электронно-дырочные пары с концентрацией $\Delta n(0)=\Delta p(0)=6 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Коэффициент диффузии электронов $D_n=9,8 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, время жизни $\tau_n=2,5 \times 10^{-4} \text{ с}$.

Задача 6.7. Рассчитайте концентрацию неравновесных дырок на нижней грани германиевой пластины толщиной 0,5 мм, если на ее верхней грани (плоскость $x=0$) создаются избыточные электронно-дырочные пары с концентрацией $8 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Коэффициент диффузии дырок $D_p=4,4 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, время жизни $\tau_p=2,8 \times 10^{-4} \text{ с}$.

Задача 6.8. В некоторой точке однородного образца германия n -типа генерируются электронно-дырочные пары. Определите диффузионную длину дырок, если концентрация неравновесных носителей на расстоянии $x_1=2$ мм от точки генерации равна $\Delta p_1=1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а на расстоянии $x_2=4,3$ мм $\Delta p_2=1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 6.9. При генерации неравновесных носителей заряда на верхней плоскости ($x=0$) пластины германия n -типа концентрация избыточных дырок на глубине $x_1=0,5$ мм при комнатной температуре составляет $\Delta p(x_1)=3 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, а в плоскости $x_2=2,8$ мм $\Delta p(x_2)=3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Определите время жизни дырок, если коэффициент диффузии неосновных носителей заряда равен $4,4 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача 6.10. Вычислите подвижность дырок в германии n -типа при $T=300$ К, если время их жизни $\tau_p=7 \times 10^{-4} \text{ с}$, диффузионная длина $L_p=0,69$ мм.

Задача 6.11. На поверхности однородной пластины кремния p -типа происходит генерация электронно-дырочных пар. Считая задачу одномерной, определите диффузионную длину электронов, если их избыточная концентрация при удалении от поверхности на 2 мм уменьшается в 20 раз.

Задача 6.12. Определите подвижность электронов в невырожденном германии при $T=300$ К, если коэффициент их диффузии $D_n=9,8 \times 10^{-3}$ м²/с.

Задача 6.13. Вычислите диффузионную длину дырок в невырожденном кремнии при комнатной температуре, если время жизни дырок $\tau_p=400$ мкс, а их подвижность $\mu_p=0,05$ м²/В·с.

Задача 6.14. Вычислите отношение плотностей электронного и дырочного дрейфовых токов в образце собственного германия при $T=300$ К в электрическом поле с напряженностью 10 В/м. Концентрация собственных носителей заряда $n_i=2,1 \times 10^{19}$ м⁻³, подвижности электронов и дырок, соответственно, $\mu_n=0,39$ м²/В·с, $\mu_p=0,15$ м²/В·с.

Задача 6.15. Рассчитайте плотность дырочного диффузионного тока в образце собственного германия при $T=300$ К на глубине 1,5 мм от поверхности, на которой воздействием света создается избыточная концентрация электронно-дырочных пар, равная 3×10^{20} м⁻³. Коэффициент диффузии неравновесных дырок $D_p=4,7 \times 10^{-3}$ м²/с, время жизни $\tau_p=1,9 \times 10^{-3}$ с.

Задача 6.16. (Вычислите плотность диффузионного электронного тока в образце собственного германия при $T=300$ К на глубине $x_1=1,5$ мм от поверхности ($x=0$), на которой светом создается избыточная концентрация электронно-дырочных пар, равная 3×10^{20} м⁻³. Коэффициент диффузии неравновесных электронов $D_n=9,8 \times 10^{-3}$ м²/с, время жизни $\tau_n=300$ мкс.

7. Контакт металл - полупроводник

Задача 7.1. Вычислите плотность потока электронов, эмитируемых при температуре 1000 °С из вольфрама, имеющего работу выхода $\chi=4,54$ эВ, если экспериментальное значение постоянной Ричардсона $A=0,75 \times 10^6$ А/(м²·град²).

Задача 7.2. Вычислите поток электронов, эмитируемых из пластины цезия при температуре 27 °С, близкой к температуре плавления (28,6 °С), если работа выхода электрона из цезия $\chi=1,89$ эВ, а опытное значение постоянной Ричардсона $A=1,62 \times 10^6$ А/(м²·град²).

Задача 7.3. Найдите отношение тока термоэлектронной эмиссии из образца оксида бария с работой выхода электрона $\chi=0,99$ эВ и постоянной Ричардсона $A=1,18 \times 10^4$ А/(м²·град²) к току из молибденовой пластины с $\chi=4,43$ эВ и $A=5,5 \times 10^5$ А/(м²·град²). Образцы находятся в вакууме при температуре 27 °С.

Задача 7.4. Рассчитайте плотность электронов, перешедших из одной плоской металлической пластины в другую, если их сблизить в вакууме до зазора между ними $d_0=0,1$ мм. Материал одной пластины – платина с работой выхода электрона $\chi_1=5,3$ эВ, другая состоит из цезия на платине с $\chi_2=1,3$ эВ.

Задача 7.5. Вычислите плотность тока термоэлектронной эмиссии из германия *n*-типа при температуре $T=300$ К с уровнем Ферми, расположенным на $5 k_0 T$ ниже дна зоны проводимости, если внешняя работа выхода для германия $\chi_0 = 4,0$ эВ, постоянная Ричардсона $A = 1,2 \times 10^6$ А/(м²·град²).

Задача 7.6. Определите плотность тока термоэлектронной эмиссии из германия *p*-типа при температуре $T=300$ К, если уровень Ферми занимает положение на $5 k_0 T$ выше потолка валентной зоны, а внешняя работа выхода $\chi_0 = 4,0$ эВ, постоянная Ричардсона $A=1,2 \times 10^6$ А/(м²·град²), ширина запрещенной зоны $\Delta E=0,67$ эВ.

Задача 7.7. Определите отношение плотностей токов термоэлектронной эмиссии из образцов германия *p*- и *n*-типов проводимости (j_p/j_n) при $T=300$ К. Ширина запрещенной зоны полупроводника при указанной температуре $\Delta E=0,67$ эВ, а уровень Ферми в *p-Ge* занимает положение $E_i - E_{Fp}=10 k_0 T$, в *n-Ge*, соответственно, $E_{Fn} - E_i=10 k_0 T$, где E_i - середина запрещенной зоны. В расчете примите внешнюю работу выхода электрона из германия $\chi_0=4,0$ эВ, постоянную Ричардсона $A=1,2 \times 10^6$ А/(м²·град²).

Задача 7.8. Вычислите величину плотности стационарного термоэлектронного тока из донорного германия при $T=300$ К с термодинамической работой выхода $\chi_1=4,08$ эВ в контакте с золотом, для которого величина работы выхода равна $\chi_2=4,3$ эВ. Примите постоянную Ричардсона $A=1,2 \times 10^6$ А/(м²·град²).

Задача 7.9. Рассчитайте плотность избыточного заряда полупроводника и укажите его знак в контакте золото – германий *n*-типа в стационарных условиях. Работа выхода электрона из золота $\chi_1=4,3$

эВ, из *n-Ge* $\chi_2=4,08$ эВ. Зазор между золотом и германием $d_0=1\times 10^{-9}$ м. Диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon=16$.

Задача 7.10. Вычислите толщину слоя объемного заряда в германии в контакте с золотом, если термодинамическая работа выхода электрона из полупроводника $\chi_1=4,1$ эВ, из золота $\chi_2=4,3$ эВ. Известно, что германий содержит ионизированные атомы сурьмы с концентрацией 3×10^{21} м⁻³. Диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon=16$.

Задача 7.11. Вычислите толщину слоя объемного заряда в контакте донорного кремния (*n-Si*) с металлом. Внешняя работа выхода электрона из кремния $\chi_0=4,05$ эВ. Полупроводник легирован атомами Cr с концентрацией $N_d=5\times 10^{23}$ м⁻³, которым соответствует уровень Ферми $E_F=E_c-0,078$ эВ. Работа выхода электрона из металла $\chi_{мет}=4,5$ эВ, диэлектрическая проницаемость кремния $\epsilon=11,8$, все примесные атомы ионизированы.

Задача 7.12. Вычислите толщину обедненного слоя в контакте алюминий - донорный арсенид галлия (*Al-n-GaAs*). Полупроводник легирован атомами теллура с концентрацией $N_d=3\times 10^{21}$ м⁻³, ионизированными при $T=300$ К. Внешняя работа выхода электрона из арсенида галлия $\chi_0=4,07$ эВ, работа выхода из алюминия $\chi_1=4,35$ эВ. Уровень Ферми в *n-GaAs* занимает положение $E_F=E_c-0,06$ эВ. Диэлектрическая проницаемость арсенида галлия $\epsilon=10,9$.

Задача 7.13. Равновесная толщина обедненного слоя в контакте *Al-n-GaAs* $d_0=2,9\times 10^{-7}$ м. Определите величину ее изменения Δd при подключении внешней разности потенциалов $V=0,15$ В, при этом положительный потенциал подается на металл, а отрицательный - на полупроводник. Арсенид галлия легирован атомами теллура с концентрацией $N_d=3\times 10^{21}$ м⁻³, полностью ионизированными при $T=300$ К. Работа выхода электрона из алюминия $\chi_1=4,35$ эВ, из арсенида галлия $\chi_2=4,13$ эВ, диэлектрическая проницаемость полупроводника $\epsilon=10,9$.

Задача 7.14. Определите величину изменения равновесной толщины обедненного слоя $d_0=2,9\times 10^{-7}$ м в контакте *Al-n-GaAs*, при подключении к нему внешней разности потенциалов $V=1$ В (при этом положительный потенциал подается на полупроводник, а отрицательный - на металл). Полупроводник легирован атомами теллура с концентрацией $N_d=3\times 10^{21}$ м⁻³, которые при заданных условиях ио-

низированы. Работа выхода электрона из арсенида галлия $\chi_1=4,13$ эВ, из алюминия $\chi_2=4,35$ эВ, диэлектрическая проницаемость арсенида галлия $\epsilon = 10,9$.

Задача 7.15. Вычислите отношение прямого и обратного токов ($J_{пр}/J_{об}$) в контакте металл - полупроводник при температуре $T=300$ К и напряжении на нем $|V|=0,1$ В.

8. Физические явления в электронно-дырочном переходе

Задача 8.1. Электронно-дырочный переход (*p-n* переход) создан диффузией атомов бора в кремний, содержащий примесные атомы мышьяка. Концентрации атомов **As** и **B**, соответственно, равны 5×10^{18} и 4×10^{23} м⁻³. Вычислите высоту потенциального барьера в указанном *p-n* переходе, если при заданной температуре $T=300$ К все примесные атомы в полупроводнике ионизированы, а концентрация собственных носителей заряда $n_i=1,6 \times 10^{16}$ м⁻³.

Задача 8.2. Вычислите контактную разность потенциалов в германиевом *p-n* переходе при $T=300$ К, если *p*- и *n*-области имеют удельные сопротивления, соответственно, $\rho_p=5 \times 10^{-3}$ Ом·м и $\rho_n=0,5$ Ом·м, подвижности основных носителей заряда в этих областях $\mu_n=0,39$ м²/В·с и $\mu_p=0,19$ м²/В·с, концентрация собственных носителей заряда $n_i=2,5 \times 10^{19}$ м⁻³.

Задача 8.3. Найдите высоту равновесного потенциального барьера *p-n* перехода при $T=300$ К, если концентрация неосновных носителей заряда в *p*-области равна 8×10^{12} м⁻³, удельное сопротивление германия в *n*-области составляет величину 0,05 Ом·м, подвижность основных носителей заряда в этой области $\mu_n=0,39$ м²/В·с и все примесные атомы в полупроводнике ионизированы.

Задача 8.4. Найдите высоту равновесного потенциального барьера при $T=300$ К в контакте акцепторного германия с удельным сопротивлением $6,6 \times 10^{-4}$ Ом·м с донорным германием, в котором концентрация неосновных носителей заряда равна 2×10^{14} м⁻³. Подвижность дырок $\mu_p=0,19$ м²/В·с.

Задача 8.5. Вычислите высоту равновесного потенциального барьера в *p-n* переходе, полученном на пластине донорного германия с концентрацией неосновных носителей заряда 8×10^{14} м⁻³ после

диффузии атомов индия с концентрацией $5 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$. При заданной температуре $T=300 \text{ К}$ все примесные атомы в полупроводнике ионизированы.

Задача 8.6. Найдите ширину области объемного заряда в резком *p-n* переходе на *n-Ge* при температуре $T=300 \text{ К}$, если концентрации донорной и акцепторной примесей, соответственно, равны 2×10^{20} и $3 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, концентрация собственных носителей заряда равна $2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon=16$.

Задача 8.7. Определите ширину области отрицательного объемного заряда в резком *p-n* переходе на *n-Ge* при температуре $T=300 \text{ К}$, если концентрации донорных и акцепторных ионов равны, соответственно, 2×10^{21} и $3 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, концентрация собственных носителей заряда $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon=16$.

Задача 8.8. Вычислите ширину области пространственного заряда в резком *p-n* переходе на *n-Ge* при температуре $T=300 \text{ К}$, если концентрации донорных и акцепторных ионов, а также собственных носителей заряда, соответственно, $N_d=4 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $N_a=5 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon=16$.

Задача 8.9. Обратный ток насыщения стандартного *p-n* перехода (диода) при температуре 300 К равен 2 мкА . Определите напряжение, при котором прямой ток достигнет величины 10 мА .

Задача 8.10. Рассчитайте напряжение, при котором прямой ток *p-n* перехода при температуре 300 К возрастает в два раза по сравнению с прямым током при напряжении $0,1 \text{ В}$.

Задача 8.11. Обратный ток насыщения i_s германиевого *p-n* перехода диаметром $0,3 \text{ мм}$ при температуре 300 К равен 1 мкА . Полагая, что ток обусловлен только электронами *p*-области, вычислите их диффузионную длину, если концентрация акцепторных ионов в этой области равна $8 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, собственных носителей в германии $n_i=2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, время жизни неосновных носителей заряда $\tau_n=2 \times 10^{-7} \text{ с}$.

Задача 8.12. Вычислите плотность обратного тока насыщения в *p-n* переходе на германии при температуре 300 К . Удельные со-

противления дырочной и электронной областей, соответственно, равны $1,6 \times 10^{-4}$ Ом·м и $6,5 \times 10^{-3}$ Ом·м; подвижности: $\mu_p = 0,19$ м²/В·с, $\mu_n = 0,39$ м²/В·с; времена жизни: $\tau_p = 400$ мкс, $\tau_n = 100$ мкс; концентрация собственных носителей равна $2,1 \times 10^{19}$ м⁻³.

Задача 8.13. Вычислите ширину области пространственного заряда в резком германиевом *p-n* переходе, который при температуре $T = 300$ К находится под внешним смещением $V = -20$ В на *p*-области относительно донорного полупроводника. Концентрации основных носителей заряда в *p*- и *n*-областях, соответственно, равны 5×10^{22} м⁻³ и 4×10^{20} м⁻³, собственная концентрация $n_i = 2,5 \times 10^{19}$ м⁻³, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon = 16$.

Задача 8.14. Вычислите емкость резкого германиевого *p-n* перехода диаметром 5×10^{-4} м в равновесном состоянии при температуре 300 К. Концентрации основных носителей заряда в *p*- и *n*-областях, соответственно, равны 5×10^{22} м⁻³ и 8×10^{19} м⁻³, собственная концентрация $n_i = 2,0 \times 10^{19}$ м⁻³, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon = 16$.

Задача 8.15. В донорном германии с удельным сопротивлением 0,16 Ом·м способом диффузии создан *p-n* переход с концентрацией акцепторной примеси в *p*-области 1×10^{24} м⁻³. Определите, на какую величину изменится при $T = 300$ К равновесная емкость *p-n* перехода при его внешнем прямом смещении $V = 0,2$ В, если все примесные атомы в полупроводнике ионизированы, собственная концентрация $n_i = 2 \times 10^{19}$ м⁻³, подвижность электронов $\mu_n = 0,39$ м²/В·с, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon = 16$, площадь *p-n* перехода $S = 1$ мм².

Примечание: знак “+” соответствует приращению емкости, тогда как ее снижение обозначается знаком “-”.

Задача 8.16. Определите, на какую величину изменится при $T = 300$ К емкость *p-n* перехода с площадью $S = 1$ мм² при включении обратного смещения $V = 5$ В. Концентрации основных носителей заряда в *p*- и *n*-областях, соответственно, равны 1×10^{24} м⁻³ и 1×10^{20} м⁻³, собственная концентрация $n_i = 2 \times 10^{19}$ м⁻³, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon = 16$.

Примечание: знак “+” соответствует приращению емкости, тогда как ее снижение обозначается знаком “-”.

Задача 8.17. На эмиттерный переход *p-n-p* транзистора при $T=300$ К подано прямое напряжение $V_{эб}=0,2$ В. Определите концентрацию неосновных носителей заряда в базе вблизи эмиттерного перехода, если концентрации основных носителей заряда в эмиттере и базе, соответственно, равны $1 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Для расчета примите концентрацию собственных носителей, равной $2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 8.18. Определите отношение концентрации дырок в базе на границе с эмиттером в *p-n-p* транзисторе при прямом напряжении $V_{эб}=0,25$ В и температуре $T=300$ К к концентрации основных носителей заряда в эмиттере, которая равна $7 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Концентрация основных носителей заряда в базе равна $2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, собственная концентрация $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 8.19. Определите отношение концентрации дырок *p-n(W)* в базе вблизи коллекторного перехода *p-n-p* транзистора к их концентрации в базе вблизи эмиттера *p-n(0)* при температуре $T=300$ К и прямом смещении $V_{эб}=0,2$ В. Концентрации основных носителей заряда в эмиттере и базе равны, соответственно, $7 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, собственная концентрация $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, диффузионная длина неосновных носителей $L_d=1$ мм, ширина базы $W=300$ мкм.

Задача 8.20. Вычислите концентрацию неосновных носителей в базе германиевого *n-p-n* транзистора на границе с эмиттером при нулевом смещении и $T=300$ К, если концентрации основных носителей заряда в эмиттере и базе равны, соответственно, $8 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $4 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, концентрация собственных носителей $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 8.21. Вычислите концентрацию неосновных носителей в базе германиевого *n-p-n* транзистора на границе с эмиттером при $T=300$ К и прямом смещении $V_{эб}=0,25$ В, если концентрации основных носителей заряда в эмиттере и базе равны, соответственно, $8 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $4 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, концентрация собственных носителей $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 8.22. Вычислите концентрацию неосновных носителей в базе вблизи границы с коллектором германиевого *n-p-n* транзистора при прямом смещении $V_{эб}=0,25$ В и $T=300$ К, если ширина базы $W=200$ мкм, диффузионная длина $L_n=0,5$ мм, равновесная концентрация электронов в *p*-области $n_{p0}=2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Задача 8.23. Сравните равновесные концентрации неосновных носителей заряда в дырочном полупроводнике, в котором концентрация основных носителей заряда $p_{p0}=5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, с концентрацией электронов в базе **n-p-n** транзистора на основе вышеупомянутого полупроводника. При этом концентрация основных носителей в эмиттере $n_{n0}=7 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, а концентрация собственных носителей $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Транзистор находится при $T=300 \text{ К}$.

9. Поверхностные явления в полупроводниках

Задача 9.1. Вычислите заряд реальной поверхности полупроводника, на которой находятся заполненные акцепторные и донорные поверхностные состояния, концентрация которых равна, соответственно, $9 \times 10^{18} \text{ м}^{-2}$ и $7 \times 10^{19} \text{ м}^{-2}$.

Задача 9.2. На реальной поверхности германия имеются акцепторные и донорные поверхностные энергетические состояния (ПЭС). Определите результирующую плотность поверхностных состояний, если плотность отрицательного заряда в акцепторных ПЭС равна $0,8 \text{ Кл/м}^2$, положительного заряда в донорных поверхностных состояниях $2,4 \text{ Кл/м}^2$.

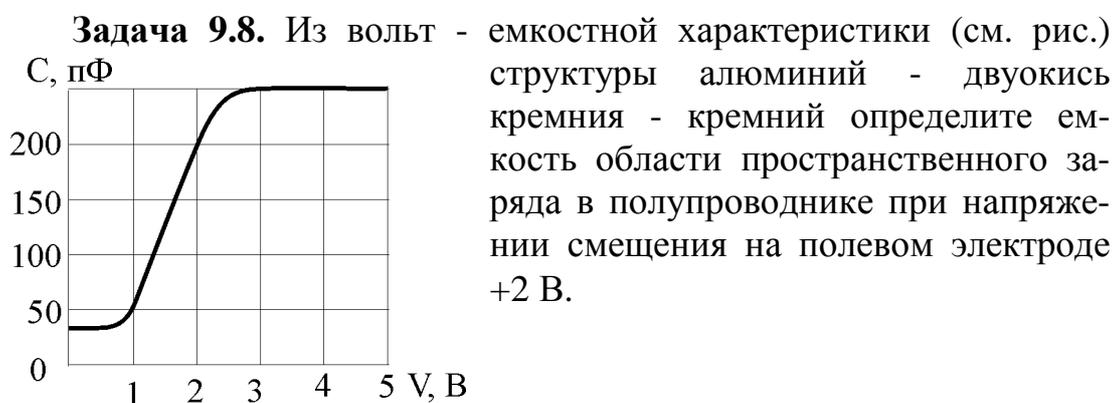
Задача 9.3. Рассчитайте отношение длин экранирования Дебая в донорном и акцепторном полупроводниках с концентрациями ионизированных при $T=300 \text{ К}$ атомов сурьмы $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и атомов бора $5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

Задача 9.4. Определите отношение длин экранирования Дебая в электронном кремнии с концентрацией основных носителей $4 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и в арсениде галлия **n**-типа с удельным сопротивлением $1,47 \times 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при подвижности электронов $\mu_n=0,85 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при температуре $T=300 \text{ К}$, если диэлектрические проницаемости **Si** и **GaAs**, соответственно, равны 11,8 и 10,9.

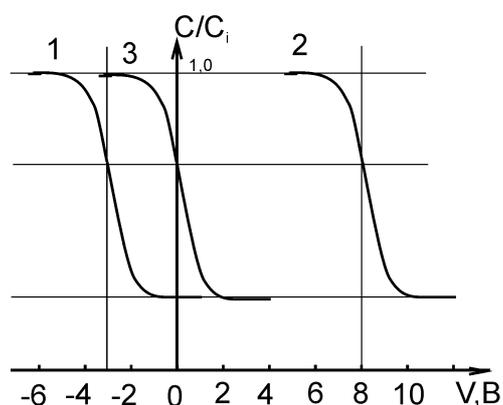
Задача 9.5. На какую величину изменится длина экранирования Дебая в собственном германии при $T=300 \text{ К}$ после его легирования атомами сурьмы в концентрации $2,5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. При расчете следует полагать, что при заданной температуре все примесные атомы ионизированы, концентрация собственных носителей заряда $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon=16$.

Задача 9.6. Вычислите емкость области пространственного заряда в структуре алюминий - двуокись кремния - кремний без внешнего смещения на полевом электроде с диаметром $D = 7 \times 10^{-4}$ м, если толщина диэлектрической пленки SiO_2 $d_i = 100$ нм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,9$, а емкость МДП -структуры $C = 80$ пФ.

Задача 9.7. Вычислите отношение концентраций избыточных электронов и дырок $\Delta n_s / \Delta p_s$ в приповерхностном слое пластинки собственного германия в поперечном электрическом поле, создаваемым внешней разностью потенциалов $V_g > 0$ на полевом электроде относительно полупроводника при $T = 300$ К, если поверхностный изгиб зон $\phi_s = 0,3$ эВ.



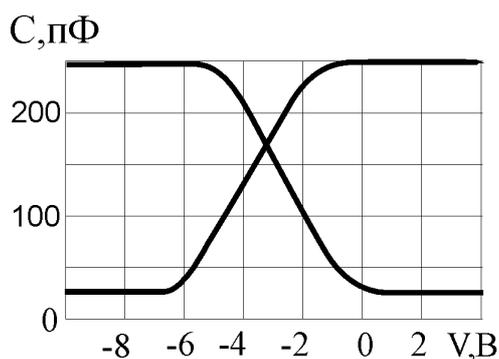
Задача 9.9. Две МДП-структуры, изготовленные способом термического окисления акцепторного кремния и вакуумного напыления алюминиевых электродов диаметром $D = 8 \times 10^{-4}$ м., после заключительной обработки имеют различные вольт - фарадные характеристики (ВФХ), показанные на рисунке (кривые 1 и 2). Определите разность начальных зарядов $Q_2 - Q_1$ указанных структур, если толщина окисла $d_i = 8 \times 10^{-8}$ м, а $C(V)$ -кривая 3 является характеристикой идеальной МДП - структуры (без центров захвата заряда). Диэлектрическая проницаемость окисла $\epsilon_i = 3,9$.



заряда). Диэлектрическая проницаемость окисла $\epsilon_i = 3,9$.

различных вольт - фарадных характеристики (ВФХ), показанные на рисунке (кривые 1 и 2). Определите разность начальных зарядов $Q_2 - Q_1$ указанных структур, если толщина окисла $d_i = 8 \times 10^{-8}$ м, а $C(V)$ -кривая 3 является характеристикой идеальной МДП - структуры (без центров захвата

Задача 9.10. Найдите отношение концентраций электронов и дырок n_s/p_s в приповерхностной области акцепторного германия с концентрацией основных носителей $2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в поперечном электрическом поле, создаваемым внешней разностью потенциалов $V_0 > 0$ на полевом электроде относительно полупроводника при $T=300 \text{ К}$, если поверхностный изгиб зон $\phi_s = 0,5 \text{ эВ}$, собственная концентрация носителей заряда $n_i = 2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.



Задача 9.11. На основе вольт - емкостных характеристик (см. рис.) структуры алюминий - двуокись кремния - кремний вычислите емкость области пространственного заряда в МДП - структуре на дырочном кремнии при полевом напряжении $V = -2 \text{ В}$.

Задача 9.12. Вычислите отношение избыточных концентраций электронов и дырок $\Delta n_s / \Delta p_s$ в приповерхностном слое пластинки собственного германия в поперечном электрическом поле, создаваемым внешней разностью потенциалов $V_g < 0$ на полевом электроде относительно полупроводника при $T=300 \text{ К}$, если поверхностный изгиб зон $\phi_s = -0,3 \text{ эВ}$.

Задача 9.13. Вычислите отношение концентраций дырок и электронов $p_s n_s$ в приповерхностной области образца донорного германия с объемной концентрацией электронов $n_0 = 6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в поперечном электрическом поле, создаваемым внешней разностью потенциалов $V_g < 0$ на полевом электроде относительно полупроводника, что сопровождается поверхностным изгибом зон $\phi_s = -0,4 \text{ эВ}$. Температура полупроводника $T=300 \text{ К}$, собственная концентрация носителей заряда $n_i = 2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 9.14. Вычислите поверхностную проводимость образца донорного германия с концентрацией основных носителей заряда $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при $T=300 \text{ К}$, если поверхностный изгиб зон $\phi_s = -0,25 \text{ эВ}$, собственная концентрация носителей заряда $n_i = 2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижности электронов

и дырок без учета поверхностного рассеяния, соответственно, равны 0,39 и 0,19 м²/В·с.

Задача 9.15. На основе вольт - емкостной характеристики (см.

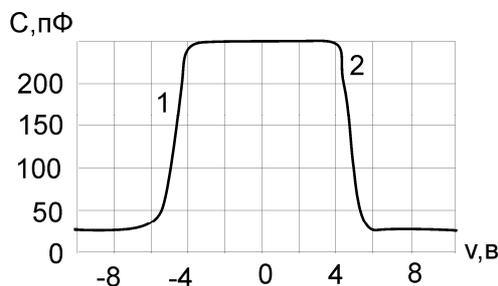


рис.) определите величину заряда, который индуцируется в МДП- структуре на дырочном кремнии при полевым напряжении $V = |5|$ В.

Задача 9.16. Оцените плотность тока, протекающего в канале МДП - транзистора на **p-Si** при $T=300$ К, если между истоком и стоком, расстояние между которыми $d_{ис}=4$ мкм, приложена разность потенциалов $V_{ис}=2$ В. Концентрации основных и собственных носителей заряда в кремнии $p_p=4 \times 10^{21}$ м⁻³ и $n_i=1,6 \times 10^{16}$ м⁻³, изгиб энергетических зон в приповерхностной области $\phi_s=0,4$ эВ, подвижность электронов 0,15 м²/В·с.

Задача 9.17. Вычислите управляющее напряжение V_q , при котором индуцируется проводящий канал в полевым МДП - транзисторе с изолированным затвором на **p-Si** без начального заряда в диэлектрике. Концентрации основных и собственных носителей заряда в кремнии $p_p=4 \times 10^{20}$ м⁻³ и $n_i=1,6 \times 10^{16}$ м⁻³, температура $T=300$ К.

10. Фотоэлектрические явления в полупроводниках

Задача 10.1. Пластика донорного германия при температуре 300К освещается монохроматическим светом. Определите длину волны излучения, при которой начинается собственное поглощение фотонов, если ширина запрещенной зоны в германии при указанной температуре $\Delta E=0,67$ эВ.

Задача 10.2. Образец антимонида индия (**InSb**) освещается при комнатной температуре монохроматическим светом. Вычислите длину волны оптического излучения, при которой начинается собственное поглощение, если ширина запрещенной зоны равна 0,18 эВ.

Задача 10.3. Образец германия с акцепторным уровнем, энергия ионизации которого равна 0,01эВ, освещается монохроматическим светом. Определите длину волны оптического излучения, при которой может возникнуть примесное поглощение.

Задача 10.4. Образец германия *n*-типа с донорным уровнем, энергия ионизации которого равна 0,01 эВ, освещается монохроматическим светом. Вычислите длину волны оптического излучения, при которой начинается примесное поглощение, если температура образца $T=4$ К.

Задача 10.5. Образец кремния с примесью атомов фосфора в концентрации $4 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ освещается при комнатной температуре светом с длиной волны $\lambda=1$ мкм. Вычислите фотопроводимость указанного образца, если концентрация дырок при облучении возрастает в $1,25 \times 10^8$ раз, все примесные атомы ионизированы, ширина запрещенной зоны $\Delta E=1,11$ эВ, концентрация собственных носителей $n_i=1,6 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n=0,15 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и дырок $\mu_p=0,06 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 10.6. Образец германия, легированный атомами бора с концентрацией $4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ освещается при комнатной температуре монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=1,5$ мкм. Определите величину фотопроводимости данного полупроводника, если концентрация неосновных носителей при освещении возрастает в 2×10^2 раз, все примесные атомы ионизированы, концентрация собственных носителей $n_i=2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, ширина запрещенной зоны $\Delta E=0,67$ эВ, подвижности основных и неосновных носителей равны, соответственно, $0,19 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $0,39 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 10.7. Вычислите фотопроводимость собственного германия с шириной запрещенной зоны $\Delta E=0,67$ эВ при 300 К, если при освещении светом с длиной волны 1,5 мкм в указанном полупроводнике генерируются электроны с концентрацией $5 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Подвижности электронов и дырок равны, соответственно, $0,39 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $0,19 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Задача 10.8. Вычислите минимальную длину волны оптического излучения, при воздействии которого при комнатной температуре возникает фотопроводимость образца собственного антимонида индия с шириной запрещенной зоны $\Delta E=0,167$ эВ.

Задача 10.9. Образец кремния, который имеет ширину запрещенной зоны $\Delta E=1,11$ эВ и донорный уровень с энергией ионизации $0,053$ эВ, образованный атомами марганца, освещается инфракрасным светом. Вычислите минимальную длину световой волны, при которой в указанном полупроводнике может наблюдаться примесная фотопроводимость.

Задача 10.10. Образец собственного германия с шириной запрещенной зоны $\Delta E=0,67$ эВ освещается при температуре $T=300$ К светом с длиной волны $\lambda=1,5$ мкм. Вычислите концентрацию носителей, создаваемых облучением, если проводимость при освещении $\sigma_{св}=2,9$ См·м⁻¹, концентрация собственных носителей $n_i=2,5 \times 10^{19}$ м⁻³, подвижность электронов $\mu_n=0,39$ м²/В·с и дырок $\mu_p=0,19$ м²/В·с.

Задача 10.11. В условиях постоянного воздействия света вследствие фотогенерации неравновесных носителей заряда стационарная фотопроводимость германия $\Delta\sigma_{ст}=0,6$ См·м⁻¹. После прекращения освещения фотопроводимость за время $t=4 \times 10^{-4}$ с уменьшилась до величины $0,22$ См·м⁻¹. Вычислите время жизни неравновесных носителей заряда.

Задача 10.12. Вычислите скорость фотогенерации неравновесных носителей заряда, если после включения света концентрация неравновесных носителей заряда достигает стационарной величины $\Delta n_{ст}=6 \times 10^{18}$ м⁻³ при времени жизни $\tau=400$ мкс.

Задача 10.13. Вычислите фото-э.д.с. освещенного *p-n* перехода при $T=300$ К, если сопротивление нагрузки является бесконечно большим, фототок неосновных носителей $i_{\phi}=2 \times 10^{-3}$ А, ток насыщения $i_s=1 \times 10^{-6}$ А

Методические указания по проведению практических занятий.

Практические занятия по курсу ФОМ в соответствии с учебным графиком начинаются одновременно с чтением лекционного курса и, поэтому, они не могут служить для закрепления уже полученных знаний. Мы рассматриваем практические занятия как способ организации самостоятельной работы студента с учебником или учебным пособием, содержащим изложение теоретического материала курса. В результате такой работы с учебником или учебным пособием при решении задач студенты знакомятся с основными терминами, положениями и формулами дисциплины, что облегчает им восприятие материала курса при последующем прослушивании лекций.

Организация практических занятий предполагает, что каждый студент должен приходить на практическое занятие, имея с собой четыре предмета: учебное пособие или учебник по курсу ФОМ, калькулятор, тетрадь для записи решений задач и авторучку. Не имеет особого значения, какой из учебников или учебных пособий по курсу ФОМ будет использовать студент. Однако лучше пользоваться учебным пособием [1], поскольку задачи в задачнике распределены по темам в соответствии с главами этого учебного пособия. Задачники (по одному на студента) приносит на занятие преподаватель. Для решения задач, включенных в конкретный раздел сборника, студенту необходимо ознакомиться с соответствующим разделом лекционного курса или вышеуказанного учебного пособия.

Всего учебным планом предусмотрено тринадцать практических занятий в течение осеннего семестра. Занятия организуются следующим образом. На двух занятиях студенты самостоятельно решают заданные преподавателем задачи (7-10 задач), относящиеся к одному из разделов курса, при этом они могут работать как кол-

лективно, так и индивидуально. На третьем занятии проводится контрольная работа по решению задач. На контрольной работе студентам предлагается решить семь новых задач из проработанных на предыдущих двух занятиях двух разделов курса. Система выставления оценок следующая: за пять и более правильно решенных задач ставится оценка отлично (пять баллов), за четыре – хорошо (четыре балла), за три - удовлетворительно (три балла), за две – неудовлетворительно (двойка), за одну и менее - неудовлетворительно (единица). Студенту, пропустившему контрольную работу, выставляется ноль баллов.

Список литературы.

1. Н. С. Несмелов, М. М. Славникова, А. А. Широков «Физические основы микроэлектроники», конспект лекций, ТУСУР, 2007 г., 275 с.