

Направление «Электроника и наноэлектроника»

Решение задачи № 1

Поскольку сопротивление амперметра равно нулю, исходную схему можно представить в виде:

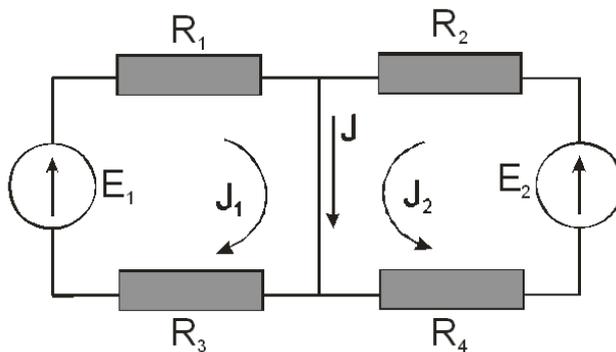


Рис. 1-1. Схема для расчета

Соответственно ток, текущий через амперметр равен сумме $J_1 + J_2$

Ток $J_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_3} = \frac{100}{100 + 400} = 0.2 \text{ A}$ $J_1 = E_1 / (R_1 + R_3) = 100 / (100 + 400) = 0.2 \text{ A}$, а ток

$J_2 = \frac{E_2}{R_2 + R_4} = \frac{200}{800 + 1200} = 0.1 \text{ A}$ $J_2 = E_2 / (R_2 + R_4) = 200 / (800 + 1200) = 0.1 \text{ A}$

Ответ: $J = J_1 + J_2 = 0,3 \text{ A}$

Решение задачи № 2

Обозначим узлы схемы буквенными индексами (см. рис. 2-1).

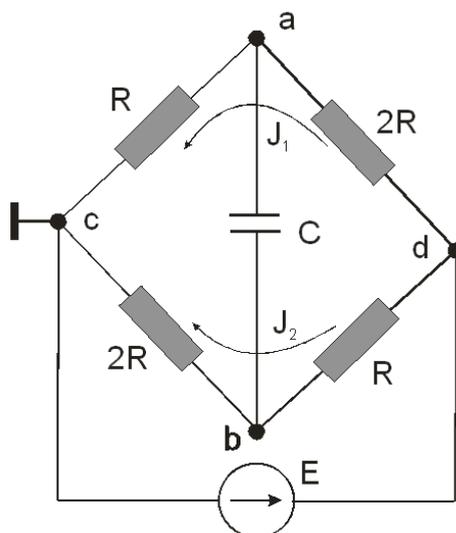


Рис. 2-1. К расчету схемы

Критерии оценивания и решения заданий заключительного этапа

Если принять потенциал точки «с» за ноль, потенциал точки «d» будет равен $E = 300$ В. Токи J_1 и J_2 очевидно равны друг другу. Соответственно потенциал точки «а» будет равен 100 В, а точки «b» будет равен 200 В. Таким образом, источник E создаст между точками «а» и «b» разность потенциалов 100 В. Заряд на конденсаторе $Q = C \cdot V = 500 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 100 \text{ В} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$

Ответ: $Q = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$

Решение задачи № 3

Очевидно, что поле между пластинами однородно (как в плоском конденсаторе). Вблизи внешних краев пластин поле должно быть равно нулю. Соответственно полная картина зависимости напряженности поля от координаты x будет иметь вид, изображенный на рисунке.

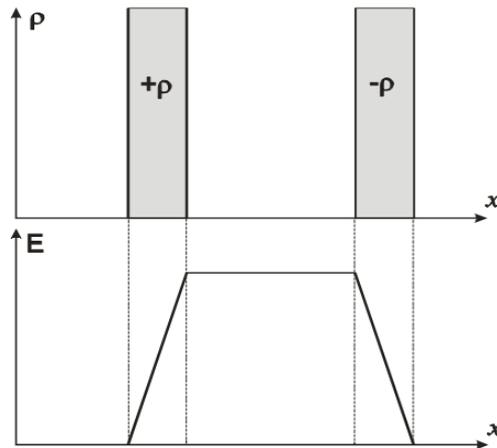


Рис. 3-1. Распределение напряженности электрического поля по координате x

Решение задачи № 4

Как видно из заданных энергетических диаграмм, оба полупроводника p -типа с различной шириной запрещенной зоны и одинаковой энергией активации примеси.

Зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры (в координатах $\ln(n_{n0}) - 1/T$) в примесных полупроводниках можно разбить на три области. В области низких температур (T меньше температуры истощения примеси T_s) зависимость $\ln(n_{n0}) - 1/T$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с угловым коэффициентом, пропорциональным энергии активации примеси.

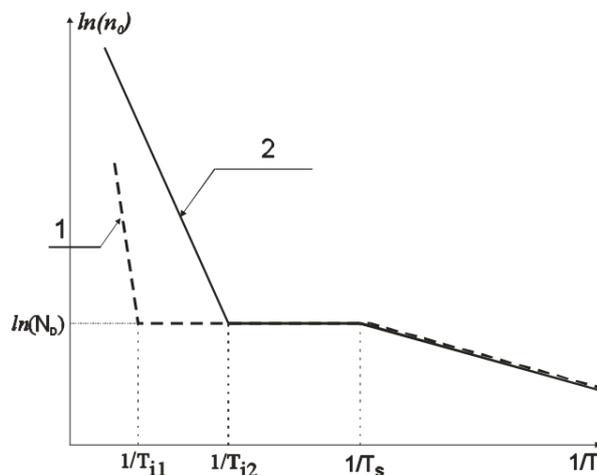


Рис.4-1. Зависимости $\ln(n_{n0}) = f(1/T)$ для обоих полупроводников

Сама же температура T_s зависит от энергии активации примеси E_d и эффективной плотности состояний в зоне проводимости полупроводника. Поскольку про плотность состояний информация в задании отсутствует, а E_d одинакова, то и T_s можно считать одинаковой для обоих полупроводников.

Критерии оценивания и решения заданий заключительного этапа

В области средних температур (T больше температуры истощения примеси, но меньше температуры перехода к собственной проводимости T_i) концентрация основных носителей заряда практически остается постоянной и равна концентрации донорной примеси. Сама же температура перехода к собственной проводимости зависит от ширины запрещенной зоны, чем больше E_g , тем T_i выше).

При температуре большей T_i концентрация электронов начинает экспоненциально расти с ростом температуры за счет тепловой генерации электронно-дырочных пар. В указанных (на графике) координатах эта зависимость будет изображаться прямой линией с угловым коэффициентом пропорциональным ширине запрещенной зоны полупроводника.

Решение задачи № 5

- Положение энергии Ферми (вблизи потолка валентной зоны) указывает на дырочную проводимость обоих полупроводников.
- Концентрация основных носителей заряда (дырок) определяется расстоянием энергии Ферми от потолка валентной зоны E_V и эффективной плотностью состояний в валентной зоне $N_V = \frac{2(2\pi \cdot m \cdot kT)^{3/2}}{h^3}$ $N_V = 2(2\pi \cdot m \cdot kT)^{3/2} / h^3$, где k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, T – абсолютная температура, m_p – эффективная масса дырок вблизи потолка валентной зоны. Поскольку эффективная масса дырки обратно пропорциональна кривизне зависимости $E=f(k)$ у потолка валентной зоны, то из рисунка следует, что эффективные массы дырок в обоих полупроводниках одинаковы и, следовательно, одинаковы концентрации дырок.
- Концентрация же электронов (равновесная) больше в первом полупроводнике, т.к. там больше эффективная масса электронов и, значит, больше эффективная плотность состояний, а вероятность заполнения состояний одинакова (из-за равенства энергий Ферми).
- Подвижность как электронов, так и дырок определяется двумя факторами: эффективной массой проводимости, которая обратно пропорциональна кривизне зависимости $E(k)$, и длиной свободного пробега носителя заряда, которая в свою очередь обратно пропорциональна количеству центров рассеяния. Основными центрами рассеяния в кристалле являются фононы (концентрация которых зависит от температуры, которая одинакова) и ионы примесных атомов, количество которых так же одинаково (т.к. одинаково количество основных носителей заряда – дырок).
- Таким образом, подвижность электронов в первом полупроводнике будет меньше, чем во втором в виду большей эффективной массы.
- Подвижность же дырок в обоих полупроводниках одинакова.
- Концентрация собственных носителей заряда n_i больше в первом полупроводнике, что следует из закона действующих масс $n_i^2 = p_{p0} \cdot p_{p0}$, где p_{p0} – равновесная концентрация дырок (основных носителей заряда), p_{p0} – равновесная концентрация электронов (неосновных носителей заряда).

Решение задачи № 6

Для решения задачи в первую очередь необходимо определиться с масштабом. Естественным масштабным фактором может служить ширина запрещенной зоны кремния, равная (в первом приближении) 1 эВ.

Заданная структура содержит три p - n -перехода. При указанной полярности источника питания первый (от омического контакта к аноду) переход будет смещен в прямом направлении, второй переход (p_1 - p_2) смещен в обратном направлении и третий переход (p_2 - p_2) смещен в прямом направлении.

Естественно, что сопротивление обратного смещенного перехода много больше сопротивления двух других переходов. Поэтому внешнее напряжение 3 Вольта будет делиться между переходами пропорционально их сопротивлению. Это означает, что большая часть внешнего напряжения будет падать на центральном переходе и лишь незначительная часть на 1-м и 3-м переходах.

Критерии оценивания и решения заданий заключительного этапа

Полное напряжение на структуре равно сумме падений напряжений на всех трех переходах $V_{A-K} = V_1 + V_2 + V_3 = 3 \text{ В}$

Соответственно, толщины объемных зарядов переходов будут существенно разными. Для 1-го и 3-го переходов толщины объемных зарядов станут меньше равновесных, а для среднего перехода толщина станет существенно больше равновесной. Эта ситуация иллюстрируется на рис. 6-1.

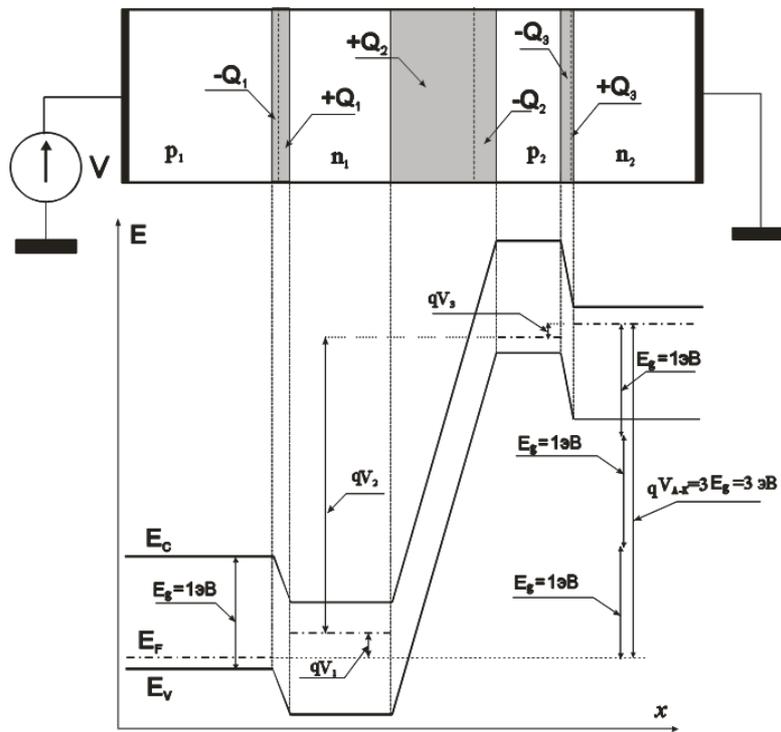


Рис. 6-1. Энергетическая диаграмма заданной тиристорной структуры, соответствующая поданному на структуру напряжению, равного 3В

На этом же рисунке изображена стилизованная энергетическая диаграмма структуры, соответствующая (в масштабе) напряжению на аноде, равном +3 Вольта. О величине смещения можно судить по интегральному смещению энергии Ферми. Как видно из рисунка сдвиг уровня Ферми соответствует $3E_g$, т.е. соответствует напряжению на структуре 3В.

Решение задачи № 7

1. В равновесном состоянии структуры, т.е. в отсутствии источников питания во входной и выходной цепи, картина распределение равновесной концентрации неосновных носителей заряда (с учетом количественного соотношения примесей) по координате имеет вид, изображенный на рис. 7-3. Здесь p_{p0} - равновесная концентрация электронов в областях p_1 и p_2 (в эмиттере и коллекторе), а p_{n0} - равновесная концентрация дырок в n -базе.

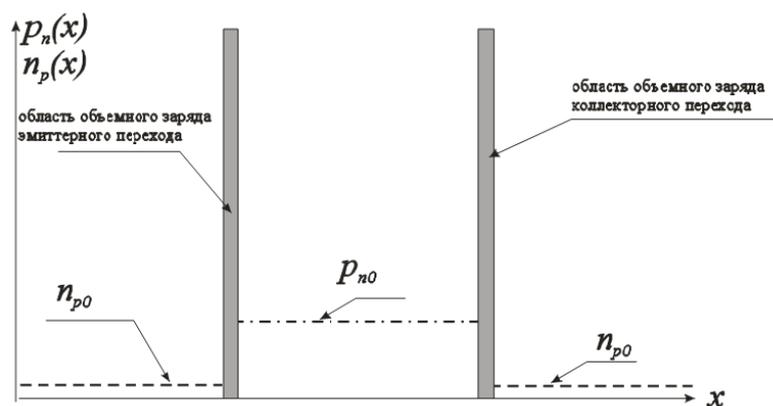


Рис. 7-3. Зависимость равновесной концентрации неосновных носителей заряда от координаты для всех областей структуры в отсутствии источников питания

Критерии оценивания и решения заданий заключительного этапа

2. При подаче источников питания во входной и выходной цепях и при произвольном значении сопротивления в цепи коллектора эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный в обратном. Вследствие чего концентрация неосновных носителей на границах объемного заряда эмиттерного перехода возрастает по закону инжекции:

$$p_n = p_{n0} \cdot \exp(+qV_{э-б}/kT)$$

$$n_p = n_{p0} \cdot \exp(+qV_{э-б}/kT)$$

А концентрация неосновных носителей на границах объемного заряда коллекторного перехода определяется соотношениями экстракции:

$$p_n = p_{n0} \cdot \exp(-qV_{к-б}/kT)$$

$$n_p = n_{p0} \cdot \exp(-qV_{к-б}/kT)$$

Ввиду того, что транзистор бездрейфовый (а значит перенос дырок через базу осуществляется диффузией) и коэффициент передачи тока эмиттера равен единице, то распределение дырок в базе по координате x носит линейный характер. А распределение электронов в эмиттере и коллекторе могут описываться экспоненциальными зависимостями (рис. 7-4) если расстояния от соответствующих контактов до границ объемных зарядов много больше диффузионных длин электронов в этих областях.

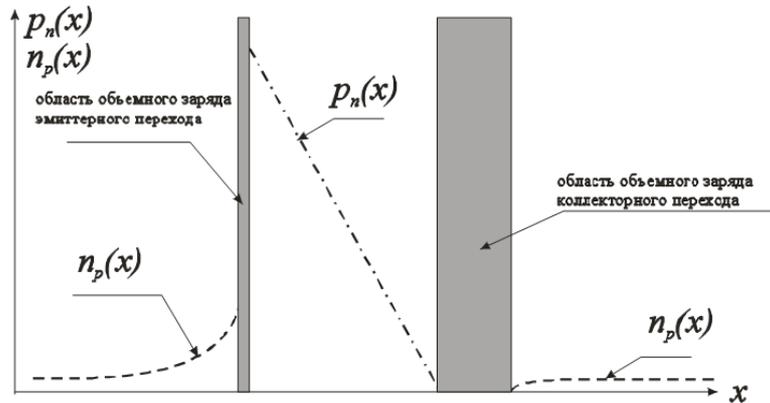


Рис. 7-4. Распределение концентрации неосновных носителей заряда по координате x во всех трех областях структуры

3. Рассмотрим теперь, как влияет величина сопротивления в коллекторной цепи на распределение $p_n(x)$ в базовой области транзисторной структуры.

Для этого разберем, как меняется величина смещения на коллекторном переходе с изменением величины R_k . Чтобы это узнать, необходимо воспользоваться методом нагрузочных прямых. На выходную характеристику нанесем нагрузочные прямые, соответствующие сопротивлениям R_{k1} и R_{k2} (см. рис. 7-5).

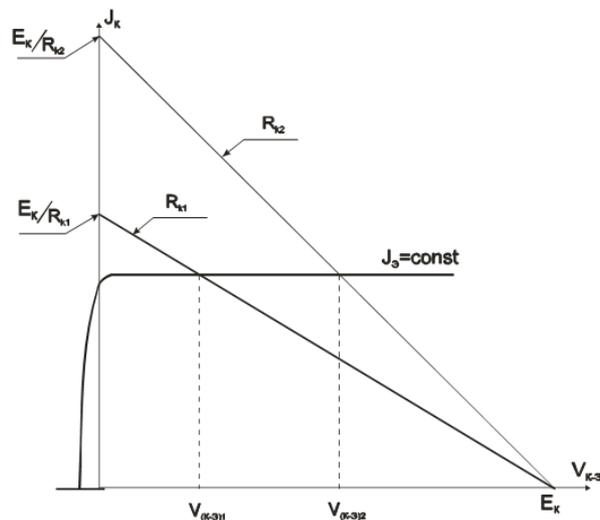


Рис. 7-5. Определение напряжения на коллекторе методом нагрузочных прямых

Как видно из рис. 7-5, с ростом сопротивления в цепи коллектора напряжение на

Критерии оценивания и решения заданий заключительного этапа коллекторном переходе уменьшается. А, следовательно, уменьшается и толщина слоя объемного заряда коллекторного перехода. Таким образом, толщина базовой области меняется с изменением сопротивления нагрузки. В то же время ток коллектора остается неизменным. А поскольку в бездрейфовом транзисторе перенос дырок через базу осуществляется диффузией, задаваемой градиентом концентрацией дырок в базе, то равенство токов при обоих сопротивлениях означает равенство градиентов концентрации дырок в базе. Соответственно эта ситуация иллюстрируется рис. 7-6.

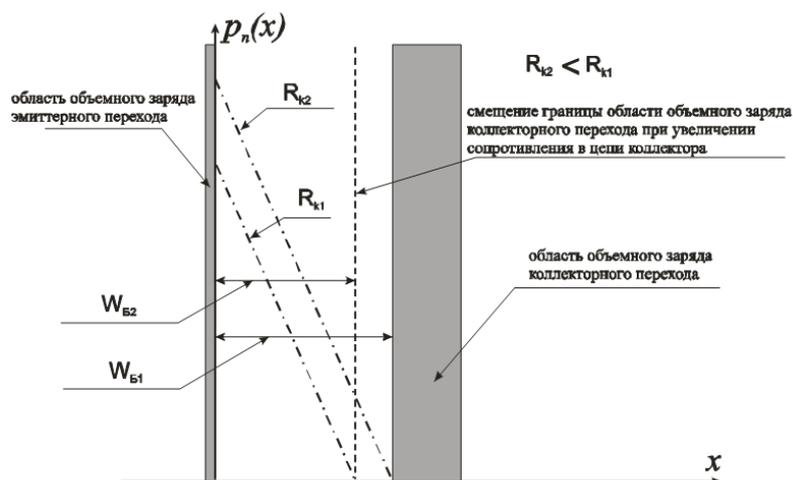


Рис. 7-6. Распределение дырок (неосновных носителей заряда) в базовой области транзисторной структуры, включенной по схеме, изображенной на рис. 7-1б, для двух значений сопротивления нагрузки