

12. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Контакт двух проводников и термоэлектрические эффекты. Электроны в металле не могут самопроизвольно покинуть объем кристалла, т.е. находятся в потенциальной яме. Для выхода электрона из этой ямы необходимо затратить энергию, равную работе выхода A (рис.18, а). При соприкосновении двух металлов с разными работами выхода A_1 и A_2 , электроны с более высоких уровней металла 1 будут переходить на более низкие уровни металла 2. В итоге металл 1 зарядится положительно, а металл 2 – отрицательно. Описанный процесс будет происходить до установления равновесия, которое характеризуется выравниванием уровней Ферми в обоих металлах (рис.18, б). Потенциальная энергия электронов, лежащих вне металлов в непосредственной близости к их поверхности (точки A и B), будет различной, т.е. между точками A и B устанавливается внешняя контактная разность потенциалов

$$\Delta\varphi' = (A_2 - A_1)/e,$$

где e – заряд электрона.

Экспериментально установлены два закона:

- Контактная разность потенциалов зависит лишь от химического состава и температуры соприкасающихся металлов.

- Контактная разность потенциалов последовательно соединенных различных проводников, находящихся при одинаковой температуре, определяется только крайними проводниками.

В двойном электрическом слое (толщиной около 10^{-10} м) в приконтактной области наблюдается также внутренняя контактная разность потенциалов

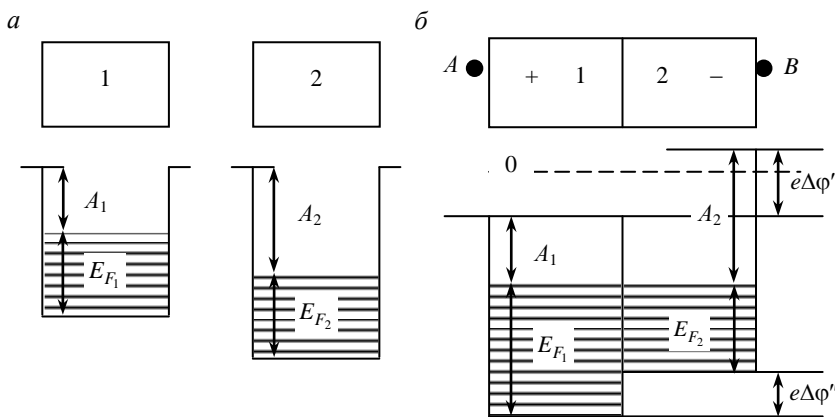


Рис.18

$$\Delta\varphi'' = (E_{F_2} - E_{F_1})/e.$$

Зависимость внутренней контактной разности потенциалов от температуры обуславливает появление термоэлектрических эффектов.

Эффект Зеебека. В проводнике, изготовленном из металла A , при наличии разности температур на его концах возникает разность потенциалов. Ее значение, отнесенное к этой разности температур, называют абсолютной удельной термоЭДС

α_a^A . В замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных нескольких различных проводников, если температура контактов не одинакова, возникает электрический ток, называемый термоэлектрическим. ЭДС, вызывающая появление тока, для многих пар металлов приблизительно прямо пропорциональна разности температур (T_T и T_X) горячего и холодного спаев соответственно:

$$\varepsilon = \alpha(T_T - T_X),$$

где α – коэффициент пропорциональности, называемый относительной дифференциальной, или удельной термоЭДС, $\alpha = (k/e) \ln(n_1/n_2)$; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; n_1 и n_2 – концентрации электронов в первом и втором металлах соответственно.

Можно доказать, что в термпарном контуре удельная термоЭДС α представляет собой разность абсолютных термоЭДС (α_a^A и α_a^B) проводников A и B , составляющих контур:

$$\alpha = \alpha_a^A - \alpha_a^B.$$

Эффект Пельтье. При прохождении через контакт двух различных проводников (или полупроводников) электрического тока помимо теплоты Джоуля – Ленца выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) дополнительная теплота: это явление называется эффектом

Пельтье, который обратен эффекту Зеебека. Количество выделившегося (поглощенного) в спай тепла пропорционально заряду q , прошедшему через спай, т.е.

$$Q_{AB} = P_{AB}q = P_{AB}It,$$

где P_{AB} – коэффициент Пельтье (последовательность AB указывает на направление тока); I – сила тока; t – время его пропускания.

Из законов термодинамики вытекает, что коэффициент Пельтье и удельная термоЭДС связаны соотношением

$$P_{AB} = \alpha T. \quad (12.1)$$

Контакт металл – полупроводник. Свойства контакта металл – полупроводник зависят от соотношения работ выхода из полупроводника A и из металла A_m и от типа электропроводности полупроводника.

Энергетические диаграммы для контакта металла с полупроводником n -типа при $A_m > A$ до и после приведения в контакт показаны соответственно на рис.19, *a* и *б*. Поскольку $A_m > A$, электроны из полупроводника будут переходить в металл, вследствие чего произойдет обеднение приконтактного слоя полупроводника электронами и он зарядится положительно, а металл – отрицательно.

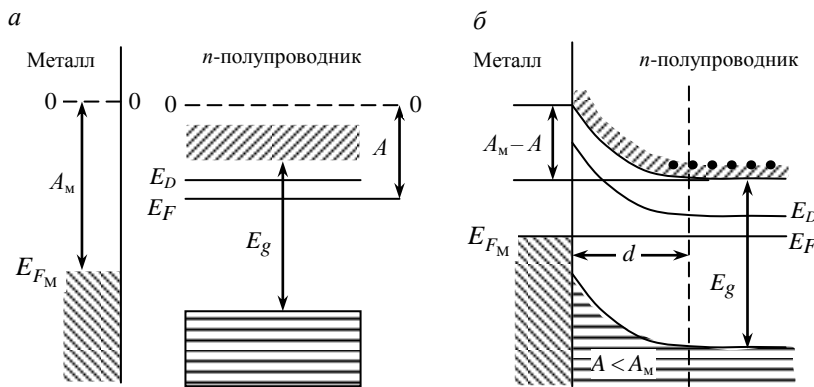


Рис.19

двойной электрический слой (толщиной $d \approx 10^{-7}$ м), причем напряженность электрического поля препятствует дальнейшему выходу электронов из полупроводника. Такой слой называют запирающим, а потенциальный барьер называют барьером Шоттки.

Энергетические диаграммы для случаев $A_M < A$ (полупроводник n -типа), $A_M > A$ (полупроводник p -типа) и $A_M < A$ (полупроводник p -типа) показаны на рис.20. Запирающий слой возникает при контакте полупроводника n -типа с меньшей работой выхода, чем у металла, и у полупроводника p -типа – с большей работой выхода, чем у металла. При этом для запирающего слоя на границе металла с полупроводником n -типа ($A_M > A$) пропускным является направление тока из металла в полупроводник, а для запирающего слоя на границе металла с полупроводником p -типа ($A_M < A$) – из полупроводника в металл. Зависимость плотности тока от приложенного напряжения, т.е. вольт-амперную характеристику (ВАХ) барьера Шоттки, можно записать в виде

$$j = j_0 \{ \exp[eU/(kT) - 1] \},$$

где j – плотность тока через p - n -переход; j_0 – плотность тока насыщения; U – приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое напряжение, которое при прямом включении барьера считается положительным, а при обратном – отрицательным; k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура.

Контакт электронного и дырочного полупроводников (p - n -переход). Если в пределах одного твердого тела сформировать области, имеющие по одну сторону от условной (металлургической) границы p -тип электропроводности, а по другую – n -тип, то электроны из n -области будут диффундировать в p -область, а дырки – в обратном направлении. В результате у контакта образуется двойной электрический слой (толщиной $d \approx 10^{-6} \div 10^{-7}$ м), электрическое поле которого имеет порядок $E \approx 10^6$ В/м, направлено из n -области в p -область и препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок. Равновесие наступает при выравнивании уровней Ферми обеих областей (рис.21).

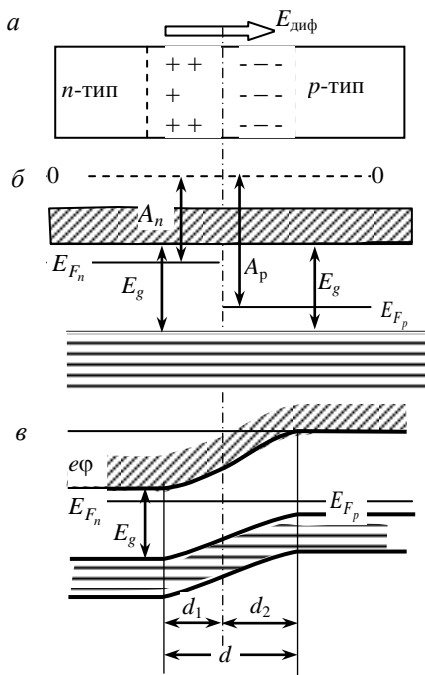


Рис.21

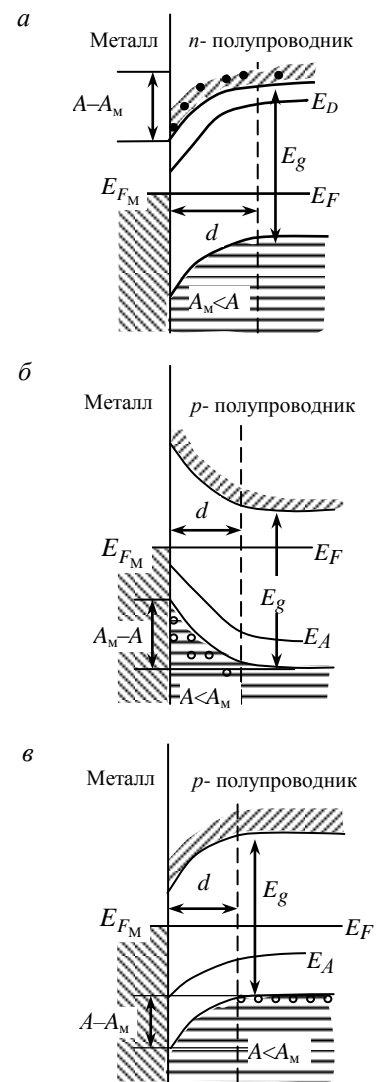


Рис.20

Высота потенциального барьера p - n -перехода, определяется первоначальной разностью положений уровней Ферми:

$$e\phi = kT \ln(p_p n_n / n_i^2), \quad (12.2)$$

где p_p и n_n – равновесные концентрации основных носителей заряда в p - и n -областях; n_i – собственная концентрация носителей заряда; ϕ – контактная разность потенциалов.

При обычных температурах носители заряда не способны преодолеть этот потенциальный барьер и p - n -переход обладает односторонней проводимостью. При комнатной температуре все атомы примеси обычно ионизованы, а концентрация основных носителей заряда мала. Поэтому можно считать, что $p_p = N_a$, а $n_n = N_d$, где N_a и N_d – концентрации акцепторной и донорной примесей в соответствующих областях. Определять

параметры p - n -перехода можно с учетом соотношения «действующих масс»:

$$n_n p_n = n_i^2 \text{ и } p_p n_p = n_i^2, \quad (12.3)$$

где p_n и n_p – концентрации неосновных носителей заряда, т.е. дырок в n -области и электронов в p -области.

Толщина d p - n -перехода

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(N_a + N_d)}{eN_a N_d}}(\varphi - U),$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – электрическая постоянная; e – заряд электрона; φ – контактная разность потенциалов p - n -перехода; U – приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое напряжение.

При прямом включении (прямом смещении) p - n -перехода это напряжение считается положительным, а при обратном включении (обратном смещении) – отрицательным.

Переход p - n можно рассматривать как плоский конденсатор, с емкостью

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S/d,$$

где S – площадь p - n -перехода. Это барьерная емкость.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

$$j = j_0 \{ \exp[eU/(kT) - 1] \}, \quad (12.4)$$

где j – плотность тока через p - n -переход; j_0 – плотность тока насыщения; U – приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое напряжение; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Плотность обратного тока насыщения j_0 определяется неосновными носителями, и ее можно оценить по выражению

$$j_0 = e[(D_p p_n / L_p) + (D_n p_p / L_n)], \quad (12.5)$$

где D_p и D_n – коэффициенты диффузии для дырок и электронов; L_p и L_n – диффузионная длина неосновных носителей заряда: дырок и электронов соответственно.

Коэффициенты диффузии можно найти из соотношения Эйнштейна:

$$D_p = \mu_p kT/e; \quad D_n = \mu_n kT/e, \quad (12.6)$$

а диффузионная длина зависит от времени жизни неосновных носителей τ_p для дырок и τ_n для электронов:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}; \quad L_n = \sqrt{D_n \tau_n}.$$

Пример 1. Определить напряженность электрического поля, возникающего в зазоре между пластинами плоского конденсатора, одна из которых изготовлена из алюминия, а другая – из платины. Пластины соединены между собой медным проводом, ширина зазора $d = 5$ мм. Работа выхода электронов из алюминия, меди и платины составляет соответственно 4,25; 4,4 и 5,32 эВ. Как изменится напряженность поля, если алюминиевую и медную пластины соединить проводом из платины?

Решение. Разность потенциалов на концах разнородной цепи, состоящей из последовательно соединенных проводников, определяется различием в работах выхода электронов из крайних проводников и не зависит от количества и состава промежуточных звеньев. Поэтому $E_1 = (A_{Pt} - A_{Al})/ed = 214$ В/м. Во втором случае $E_2 = (A_{Cu} - A_{Al})/ed = 30$ В/м.

Пример 2. Удельная термоЭДС контакта двух проводников $\alpha = 10$ мкВ/К. Через контакт пропускают ток силой $I = 1$ А. Каково должно быть сопротивление R контакта, чтобы в результате проявления эффекта Пельтье можно было наблюдать охлаждение контакта при комнатной температуре T ?

Решение. Коэффициент Пельтье найдем по формуле (12.1) и учтем, что выделяемое на контакте за время t тепло Джоуля – Ленца должно быть по абсолютной величине меньше тепла Пельтье, поглощаемого на том же контакте при надлежащем направлении тока за то же время, т.е. $I^2Rt < \alpha TIt$, откуда находим, что $R < \alpha T/I$. Приняв комнатную температуру равной 293 К, получим $R < 2,93 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Пример 3. В германиевом p - n -переходе удельная проводимость p -области $\gamma_p = 10^4$ См/м, а удельная проводимость n -области $\gamma_n = 100$ См/м. Подвижность электронов μ_n и дырок μ_p в германии соответственно 0,39 и 0,19 м²/(В·с). Получить выражение, связывающее контактную разность потенциалов с отношением концентраций основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике и найти по нему контактную разность потенциалов в переходе при температуре $T = 300$ К. Собственная концентрация носителей заряда при этой температуре в германии $n_i = 2,5 \cdot 10^{19}$ м⁻³.

Решение. Для p -области удельная проводимость γ_p определяется основными носителями заряда, т.е. дырками. Поэтому $\gamma_p = e p_p \mu_p$, где p_p и μ_p – концентрация и подвижность дырок в p -области. Соответственно $p_p = \gamma_p / e \mu_p = 3,29 \cdot 10^{23}$ м⁻³. Аналогично для n -области $n_n = \gamma_n / e \mu_n = 1,6 \cdot 10^{21}$ м⁻³. Из закона «действующих масс» (12.3) получим $n_i^2 / n_n = p_n$. Используя выражение для потенциального барьера p - n -перехода (12.2), вычислим $\phi = (kT/e) \ln(p_p / p_n) = 0,35$ В.

Пример 4. Используя данные и результаты примера 3, найти плотность обратного тока насыщения, отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной (диффузионная длина для электронов и дырок $L_n = L_p = 1$ мм) и напряжение, при котором плотность прямого тока $j = 100$ кА/м².

Решение. Концентрации неосновных носителей: дырок в n -области и электронов в p -области – согласно закону «действующих масс» (12.3) $p_n = 3,91 \cdot 10^{17}$ м⁻³, $n_p = 1,9 \cdot 10^{15}$ м⁻³.

В выражение для плотности тока насыщения (12.5) подставим коэффициенты диффузии, определяемые из соотношения Эйнштейна (12.6). Тогда

$$j_0 = (kT\mu_p p_n / L_p) + (kT\mu_n n_p / L_n). \quad (12.7)$$

После вычислений получим $j_0 = 0,31$ А/м².

В формуле (12.7) первое слагаемое, очевидно, представляет собой плотность тока j_p , связанного с движением дырок в n -области, а второе – плотность тока j_n , связанного с движением электронов в p -области, поэтому $j_p / j_n = (\mu_p p_n L_n) / (\mu_n n_p L_p) = 100$.

Искомое напряжение определим из выражения (12.4). Логарифмированием найдем, что $eU/(kT) = 12,7$ и, следовательно, $U = 0,328$ В.

Задачи.

1. Какова внутренняя контактная разность потенциалов, возникающая при соприкосновении двух металлов с концентрациями свободных электронов $5 \cdot 10^{28}$ м⁻³ и 10^{29} м⁻³?

2. Ток в цепи, состоящей из термопары сопротивлением 5 Ом и гальванометра сопротивлением 8 Ом, равен 0,5 мА в случае, когда спай термопары помещен в сосуд с кипящей водой. Вычислить удельную термоЭДС термопары при температуре окружающей среды 20 °С.

3. Один спай термопары помещен в печь с температурой 200 °С, второй находится при комнатной температуре (20 °С). Измеряемое значение термоЭДС 1,8 мВ. Какой станет термоЭДС, если второй спай поместить в сосуд с тающим льдом? с кипящей водой?

4. Контакт металл – полупроводник с барьером Шоттки, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 10$ мкА, соединен последовательно с источником напряжения $U_{ист} = 10$ В и резистором сопротивлением $R = 1$ кОм. Найти прямой ток, прямое напряжение и сопротивление контакта при комнатной температуре.

5. Обратный ток насыщения германиевого p - n -перехода, измеренный при обратном напряжении 5 В, равен 1 мкА. Через этот p - n -переход при его прямом включении течет ток 0,1 А. Определить прямое и обратное сопротивления p - n -перехода при комнатной температуре $T = 293$ К.

6. Обратный ток насыщения кремниевого p - n -перехода, измеренный при обратном напряжении 5 В, равен 10^{-8} А. Через этот p - n -переход при его прямом включении течет ток 0,1 А. Каковы прямое и обратное сопротивления p - n -перехода при $T = 293$ К?

7. При разности температур 100 К на концах первой металлической проволоки A появилась разность потенциалов 1,4 мВ, а на концах проволоки B в аналогичных условиях – разность потенциалов 0,6 мВ. Какими будут показания вольтметра, включенного в термопарный контур из этих проволок, если горячий спай термопары находится при температуре 400 °С, а холодный – при комнатной температуре?

8. Оценить значение коэффициента Пельтье при комнатной температуре для контакта двух металлов, в которых концентрации свободных электронов отличаются на 10 %.

9. Во сколько раз эффективней происходит охлаждение за счет эффекта Пельтье на контакте Pt-Ni, чем на контакте Pt-Cu при комнатной температуре и токе 1 А? Сопротивление каждого из контактов 1 МОм.

10. В замкнутую цепь, состоящую из медного, алюминиевого и платинового проводников между медным и алюминиевым проводниками включен милливольтметр. Температура контакта Cu-Al 20 °С, Al-Pt +200 °С, Pt-Cu +100 °С. Абсолютные удельные термоЭДС для Cu, Al и Pt соответственно +1,8; -1,3 и -5,1 мкВ/К. Каковы показания милливольтметра?

11. При изменении обратного напряжения от 0,1 до 1 В на контакте Шоттки, изготовленном с использованием донорного полупроводника и металла, емкость контакта уменьшилась в 2 раза. Работа выхода из металла равна 4,4 эВ. Найти работу выхода из полупроводника.

12. Обратный ток насыщения контакта металл – полупроводник с барьером Шоттки равен 2 мкА. Контакт последовательно соединен с резистором и источником постоянного напряжения 0,2 В. Определить сопротивление резистора, если падение напряжения на нем 0,1 В. Контакт находится при температуре 300 К.

13. Металл, работа выхода из которого равна 4,3 эВ, образует контакт с донорным полупроводником, работа выхода из которого равна 4,1 эВ. Какова толщина двойного электрического слоя, возникающего на контакте? Концентрация примеси в полупроводнике $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, а его относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 12$.

14. Акцепторный полупроводник с работой выхода 4,5 эВ и металл с работой выхода 4,2 эВ образуют контакт. Найти удельную емкость контакта при приложении к нему обратного напряжения 0,5 В. Концентрация примеси в полупроводнике $N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, а его относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 10$.

15. В германиевом p - n -переходе концентрация донорной примеси в n -области в 1000 раз больше, чем концентрация акцепторной примеси в p -области. При этом на каждые 108 атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов этого p - n -перехода при температуре 300 К. Общая концентрация собственных атомов германия $4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, а концентрация ионизированных атомов германия при данной температуре $2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

16. Удельное сопротивление p -области германиевого p - n -перехода 2 Ом·см, а удельное сопротивление n -области 1 Ом·см. Вычислить высоту потенциального барьера p - n -перехода при температуре 300 К.

17. В структуре с кремниевым p - n -переходом удельное сопротивление p -области и n -области 10^{-4} и 10^{-2} Ом·м соответственно. Вычислить контактную разность потенциалов при температуре 300 К, если подвижность дырок и электронов соответственно 0,05 и 0,14 $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а собственная концентрация в данных условиях $1,38 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

18. Концентрации доноров и акцепторов в n - и p -областях резкого p - n -перехода соответственно $5 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} см^{-3} . Определить контактную разность потенциалов и плотность обратного тока насыщения при комнатной температуре. Считать, что коэффициенты диффузии для неосновных электронов и дырок соответственно 100 и 50 $\text{см}^2/\text{с}$, а диффузионная длина электронов и дырок одинакова и составляет 0,8 см. Собственная концентрация носителей заряда 10^{13} см^{-3} .

19. Резкий p - n -переход сформирован из материала p -типа с удельным сопротивлением при температуре 300 К 1,3 МОм·м и из материала n -типа с удельным сопротивлением 4,6 МОм·м. Время жизни неосновных носителей заряда в материалах p - и n -типов 100 и 150 нс соответственно, площадь p - n -перехода 1 мм^2 . Вычислить обратный ток насыщения в

предположении, что протяженность p - и n -областей много больше диффузионной длины. Подвижность дырок и электронов соответственно 0,048 и 0,135 м²/(В·с), собственная концентрация $6,5 \cdot 10^{16}$ м⁻³.

20. Ток, проходящий через p - n -переход при большом обратном напряжении и $T = 300$ К, равен 0,2 мкА. Найти ток через p - n -переход при прямом напряжении 0,1 В.

21. Каково прямое напряжение на p - n -переходе при токе 1 мА, если обратный ток насыщения при комнатной температуре равен 1 нА?

22. При прямом напряжении 0,1 В на p - n -переходе и температуре 20 °С через него проходит некоторый ток. Каким должно быть напряжение, чтобы ток увеличился в 2 раза?

23. В равновесном состоянии высота потенциального барьера германиевого p - n -перехода 0,2 эВ, концентрация акцепторных примесей в p -области $3 \cdot 10^{14}$ см⁻³, что много меньше концентрации донорных примесей в n -области. Рассчитать барьерную емкость p - n -перехода при обратном напряжении 0,1 В. Площадь p - n -перехода 1 мм², относительная диэлектрическая проницаемость германия 16.

24. Барьерная емкость p - n -перехода 25 пФ при обратном напряжении 5 В. Как она изменится при увеличении обратного напряжения до 7 В?

25. Ток насыщения p - n -перехода при комнатной температуре 0,01 мкА. Каково его сопротивление при близком к нулю напряжении в этих условиях?