

терь туннельного и $a R_{\pi}$ — суммарное сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов.

К максимально допустимым параметрам относят *максимально допустимый постоянный прямой ток туннельного диода* $I_{\text{пр max}}$, *максимально допустимый прямой импульсный ток* $I_{\text{пр. и max}}$, *максимально допустимый постоянный обратный ток* $I_{\text{обр max}}$, *максимально допустимую мощность СВЧ* $P_{\text{СВЧ max}}$, рассеиваемую диодом.

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

1.1. Имеется сплавной германиевый p - n -переход с концентрацией $N_d = 10^3 N_a$, причем на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T = 300$ К (концентрации атомов N и ионизованных атомов n_i принять равными $4,4 \cdot 10^{22}$ и $2,5 \cdot 10^{13}$ см^{-3} соответственно).

Решение

Определим концентрацию акцепторных атомов:

$$N_a = N/10^8 = 4,4 \cdot 10^{22}/10^8 = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

($N = 4,4 \cdot 10^{22}$ см^{-3} — концентрация атомов германия).

Концентрация атомов доноров $N_d = 4,4 \cdot 10^{17}$ см^{-3} .

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0,0258 \ln \frac{4,4 \cdot 10^{17} \cdot 4,4 \cdot 10^{14}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \cong 0,33 \text{ В.}$$

1.2. Удельное сопротивление p -области германиевого p - n -перехода $\rho_p = 2$ Ом·см, удельное сопротивление n -области $\rho_n = 1$ Ом·см. Вычислить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при $T = 300$ К, если подвижности электронов и дырок в германии соответственно равны $\mu_n = 0,39$ и $\mu_p = 0,19$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение

Известно, что удельное сопротивление p -области полупроводника

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} \approx \frac{1}{N_a e \mu_p},$$

где N_a — концентрация акцепторов; e — заряд электрона; μ_p — подвижность дырок. Отсюда

$$N_a = \frac{1}{\rho_p e \mu_p} = \frac{1}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1900} = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Аналогично найдем концентрацию доноров в n -области полупроводника:

$$N_d = \frac{1}{\rho_n e \mu_n} = \frac{1}{1 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 3900} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0,0258 \ln \frac{1,65 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{15}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \approx 0,22 \text{ В.}$$

1.3. Германиевый сплавной p - n -переход имеет обратный ток насыщения $I_0 = 1$ мкА, а кремниевый с такими же размерами — ток $I_0 = 10^{-8}$ А. Вычислить и сравнить прямые напряжения на переходах при $T = 293$ К, если через каждый диод протекает ток 100 мА.

Решение

Ток диода определим по формуле

$$I = I_0 (e^{eU/(kT)} - 1),$$

где I_0 — обратный ток насыщения.

Для германиевого p - n -перехода

$$100 \cdot 10^{-3} = 10^{-6} e^{1,602 \cdot 10^{-19} U / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293)},$$

откуда $U = 288$ мВ.

Аналогично, для кремниевого p - n -перехода при $I_0 = 10^{-8}$ А $U = 407$ мВ.

1.4. Кремниевый p - n -переход имеет следующие данные: ширина p - n -перехода $\Delta = 10^{-3}$ см, концентрация акцепторных примесей $N_a = 10^{19}$ см $^{-3}$, концентрация донорных примесей $N_d = 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, площадь поперечного сечения $\Pi = 10^{-4}$ см 2 , длина областей $l_n = 10^{-4}$ см, $l_p = 10^{-3}$ см, коэффициенты диффузии неосновных носителей $D_p = 8$ см 2 /с; $D_n = 25$ см 2 /с, концентрация собственных носителей заряда $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$. Определить: а) обратный ток насыщения I_0 , б) прямой ток и падение напряжения на объемах p - и n -областей при прямом напряжении, равном 0,65 В.

Решение

а) Так как $N_a \gg N_d$, то обратный ток насыщения определим из выражения

$$I_0 = \frac{e \Pi n_i^2 D_n}{\Delta N_d} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-4} (1,5)^2 \cdot 10^{20} \cdot 25}{10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{16}} = 4,5 \cdot 10^{-15} \text{ А.}$$

б) Для прямого напряжения, равного 0,65 В, ток

$$I = I_0 e^{eU/(kT)} = 4,5 \cdot 10^{-15} e^{0,65 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Сопротивления объемов p - и n -областей определим по формуле

$$R = \rho l / \Pi,$$

где ρ — удельное сопротивление; l — длина областей; Π — площадь p - n -перехода.

Для n -области, где $n \gg p$, удельное сопротивление можно вычислить по формуле

$$\rho_n = 1 / (e \mu_n n) = 3 \cdot 10^{-1} \text{ Ом} \cdot \text{см.}$$

Следовательно, сопротивление n -области

$$R = \frac{3 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 0,3 \text{ Ом.}$$

Для p -области, где $p \gg n$ и $\rho_p = 1 / (e \mu_p p) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, сопротивление

$$R = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} / 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

При токе, равном $4 \cdot 10^{-4} \text{ А}$, падение напряжения на сопротивлениях объемов p - и n -областей равно $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ В}$.

1.5. Германиевый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 25 \text{ мкА}$, работает при прямом напряжении, равном $0,1 \text{ В}$, и $T = 300 \text{ К}$. Определить сопротивление диода постоянному току R_0 и дифференциальное сопротивление $r_{\text{диф}}$.

Решение

Найдем ток диода при прямом напряжении $U = 0,1 \text{ В}$ по формуле $I = I_0 (e^{eU/(kT)} - 1) = 25 \cdot 10^{-6} (e^{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1 / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)} - 1) = 1,17 \text{ мА}$.

Тогда сопротивление диода постоянному току

$$R_0 = U/I = 0,1 / (1,17 \cdot 10^{-3}) = 85 \text{ Ом.}$$

Вычислим дифференциальное сопротивление, используя формулу

$$r_{\text{диф}}^{-1} = \frac{dI}{dU} = I_0 \left(\frac{e}{kT} \right) e^{eU/(kT)} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 38,6 \cdot 48 = 46 \cdot 10^{-3} \text{ См,}$$

откуда

$$r_{\text{диф}} = 1 / (46 \cdot 10^{-3}) = 21,6 \text{ Ом.}$$

Приближенно с учетом того, что $I \gg I_0$,

$$r_{\text{диф}}^{-1} = \frac{dI}{dU} = \left(\frac{e}{kT} \right) (I + I_0) \approx \frac{e}{kT} I,$$

откуда

$$r_{\text{диф}} \approx \frac{kT}{eI} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,17 \cdot 10^{-3}} = 22 \text{ Ом.}$$

1.6. Для идеального p - n -перехода определить: а) напряжение, при котором обратный ток будет достигать 90% значения обратного тока насыщения при $T = 300 \text{ К}$; б) отношение тока при прямом напряжении, равном 0,05 В, к току при том же значении обратного напряжения.

Решение

а) Известно, что при $T = 300 \text{ К}$ температурный потенциал

$$\varphi_T = \frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} = T/11600 \approx 0,026 \text{ В.}$$

Ток диода

$$I = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1).$$

По условию задачи,

$$0,9I_0 = I_0 (e^{U/0,026} - 1),$$

откуда

$$U = 0,026 \cdot (-2,3) = -0,06 \text{ В.}$$

б) Определим отношение прямого тока к обратному при напряжениях 0,05 и $-0,05 \text{ В}$:

$$\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} = \frac{I_0 (e^{50/26} - 1)}{I_0 (e^{-50/26} - 1)} = \frac{e^{1,92} - 1}{e^{-1,92} - 1} \approx -7.$$

1.7. В некотором идеальном p - n -переходе обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-14} \text{ А}$ при $T = 300 \text{ К}$ и $I_0 = 10^{-9} \text{ А}$ при $T = 125^\circ \text{С}$. Определить напряжения на p - n -переходе в обоих случаях, если прямой ток равен 1 мА.

Решение

Из уравнения ВАХ перехода $I = I_0 (e^{U/(kT)} - 1)$ имеем $I/I_0 = e^{U/(kT)}$.

Логарифмируя и решая это уравнение относительно U , получаем

$$U = \frac{kT}{e} \ln(I/I_0 + 1).$$

При $T = 300 \text{ К}$

$$U = 0,026 \ln(10^{-3}/10^{-14} + 1) = 0,026 \cdot 25,3 = 0,66 \text{ В.}$$

При $T = 125^\circ\text{C}$

$$U = 0,036 \ln(10^{-3}/10^{-9} + 1) = 0,5 \text{ В.}$$

Такая температурная зависимость характерна для кремниевых диодов.

1.8. Определить, во сколько раз увеличивается обратный ток насыщения сплавного p - n -перехода диода, если температура увеличивается: а) от 20 до 80°C для германиевого диода; б) от 20 до 150°C для кремниевого диода.

Решение

Зависимость обратного тока насыщения от температуры выражается следующим уравнением:

$$I_0 = kT^m e^{U_{g0}/(\eta\varphi_T)},$$

где k — постоянная; $E_{g0} = eU_{g0}$ — ширина запрещенной зоны при $T = 0 \text{ К}$; $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал.

Известно, что для германия $\eta = 1$, $m = 2$, $U_{g0} = 0,785 \text{ В}$; для кремния $\eta = 2$, $m = 1,5$, $U_{g0} = 1,21 \text{ В}$.

Следовательно, для германия обратный ток насыщения

$$I_0 = kT^2 e^{-0,785/\varphi_T}.$$

При $T = 80^\circ\text{C}$, или $T = 353 \text{ К}$, имеем

$$\varphi_T = 353/11600 = 0,0304 \text{ В.}$$

Таким образом,

$$I_{0(T=80^\circ\text{C})} = k(353)^2 e^{-0,785/0,0304}.$$

При $T = 20^\circ\text{C}$, или $T = 293 \text{ К}$,

$$\varphi_T = 293/11600 = 0,0253 \text{ В.}$$

Тогда

$$I_{0(T=20^\circ\text{C})} = k(293)^2 e^{-0,785/0,0253}.$$

Следовательно,

$$\frac{I_{0(T=80^\circ\text{C})}}{I_{0(T=20^\circ\text{C})}} = \frac{k(353)^2 e^{-0,785/0,0304}}{k(293)^2 e^{-0,785/0,0253}} = 263.$$

Для кремниевого диода

$$I_0 = kT^{1,5} e^{-1,21/(2\varphi_T)}.$$

При $T = 150^\circ\text{C}$, или $T = 423 \text{ К}$, температурный потенциал

$$\varphi_T = 423/11600 = 0,0364 \text{ В;}$$

тогда

$$I_{0(T=150^{\circ}\text{C})} = k(423)^{1,5} e^{-1,21/(2 \cdot 0,0364)}.$$

Так как при температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$, или $T = 293\text{ K}$, $\varphi_T = 0,025\text{ В}$, то

$$I_{T=20^{\circ}\text{C}} = k(293)^{1,5} e^{-1,21/(2 \cdot 0,0253)}.$$

Отношение токов

$$\frac{I_{0(T=150^{\circ}\text{C})}}{I_{(T=20^{\circ}\text{C})}} = \frac{(423)^{1,5} e^{-16,6}}{(293)^{1,5} e^{-23,9}} = 2568.$$

1.9. Барьерная емкость диода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы уменьшить емкость до 50 пФ, если контактная разность потенциалов $\varphi_K = 0,82\text{ В}$?

Решение

Барьерная емкость резкого p - n -перехода определяется по формуле

$$C_6 = \left[\frac{\epsilon e N_a N_d}{2(N_a + N_d)} \right]^{1/2} U^{-1/2},$$

где U — напряжение на p - n -переходе; N_a и N_d — концентрация примесей на каждой из сторон p - n -перехода.

Следовательно, для данного диода

$$C_6 = k(U_{\text{обр}} + \varphi_K)^{1/2},$$

где k — некоторая постоянная; $U_{\text{обр}}$ — обратное напряжение; φ_K — контактная разность потенциалов.

При $U_{\text{обр}} = 2\text{ В}$ величина $C_6 = 200\text{ пФ}$, тогда

$$k = 200 \cdot 10^{-12} (2 + 0,82)^{1/2} = 3,35 \cdot 10^{-10} \text{ пФ} \cdot \text{В}^{1/2}.$$

Находим обратное напряжение, при котором $C_6 = 50\text{ пФ}$:

$$50 \cdot 10^{-12} = \frac{3,35 \cdot 10^{-10}}{(U_{\text{обр}} + 0,82)^{1/2}},$$

откуда $U_{\text{обр}} = 44,1\text{ В}$.

1.10. Обратный ток насыщения диода с барьером Шотки равен 2 мкА. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения смещения $E = 0,2\text{ В}$ так, что на диод подается прямое напряжение. Определить сопротивление резистора, если падение напряжения на нем равно 0,1 В. Диод работает при $T = 300\text{ К}$.

Решение

Определим ток диода:

$$I = I_0 (e^{U/(kT)} - 1),$$

где I_0 — обратный ток насыщения; U — прямое напряжение.

Так как падение напряжения на резисторе равно 0,1 В, то напряжение на диоде $U = E - U_R = 0,2 - 0,1 = 0,1$ В. Отсюда ток диода

$$I = 2 \cdot 10^{-6} \left(e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) = 93 \text{ мкА.}$$

Следовательно,

$$R = U/I = 0,1 / (9,3 \cdot 10^{-6}) \cong 1,1 \text{ кОм.}$$

1.11 Определить ток диода I с идеализированной ВАХ, текущий в цепи, показанной на рис. 1.7, а, если $E = 5$ В, $R = 1$ кОм, обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-12}$ А, температура $T = 300$ К.

Решение

Задачу решим графоаналитическим способом. Используя значение $I_0 = 10^{-12}$ А и задаваясь напряжением диода, построим вначале ВАХ диода в соответствии с уравнением

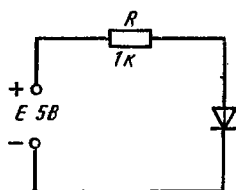
$$I = I_0 (e^{U/(kT)} - 1).$$

Вольт-амперная характеристика показана на рис. 1.7, б.

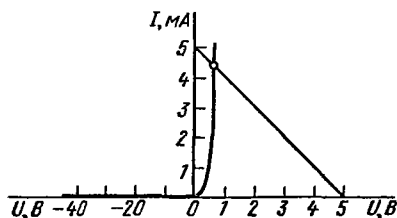
На том же графике построим нагрузочную прямую, используя уравнение

$$I = (E - U)/R.$$

Точка пересечения нагрузочной прямой с ВАХ дает решение задачи. Из построения следует, что $I = 4,5$ мА.



а)



б)

Рис. 1.7

1.12. Идеальный диод включен в схему, изображенную на рис. 1.8. Определить выходное напряжение.

Решение

Так как на диод подано обратное напряжение, то можно предположить, что обратное сопротивление диода составляет несколько сотен килоом или больше. Следовательно, можно считать, что практически все напряжение падает на диоде, т. е. $U_{\text{вых}} = 15 \text{ В}$.

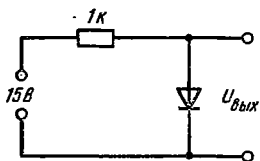


Рис. 1.8

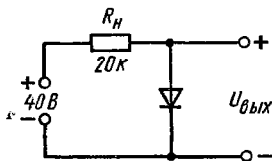


Рис. 1.9

1.13. Определить выходное напряжение в схеме, изображенной на рис. 1.9, если при комнатной температуре используется кремниевый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 10 \text{ мкА}$.

Решение

Так как на диод подано прямое напряжение, то сопротивление кремниевого диода будет малым и ток в схеме будет определяться в основном сопротивлением резистора $R_n = 20 \text{ кОм}$. Следовательно, $I = 40 / (20 \cdot 10^3) = 2 \text{ мА}$. Подставив это значение в уравнение тока полупроводникового диода и решив его относительно U , получим:

$$I = I_0 (e^{eU/(kT)} - 1);$$

$$2 \cdot 10^{-3} = 10 \cdot 10^{-6} (e^{eU/(kT)} - 1);$$

$$e^x = 201; \quad x = eU/(kT) = 5,30; \quad kT/e \approx 26 \text{ мВ}.$$

Следовательно,

$$U_{\text{вых}} = 5,30 \cdot 26 \text{ мВ} = 0,138 \approx 0,14 \text{ В}.$$

1.14. Определить выходное переменное напряжение $U_{\text{вых}}$ схемы на рис. 1.10, если работа происходит при комнатной температуре.

Решение

Выходное переменное напряжение будет равно переменной составляющей напряжения на диоде. Положение рабочей

точка определяется для постоянной составляющей тока диода $I = 20 / (10 \cdot 10^3) = 2$ мА. Прямое дифференциальное сопротивление диода находим по формуле $r_{\text{диф.пр}} = kT / (eI) = 26 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 10^{-3}) = 13$ Ом. Поэтому

$$U_{\text{вых}} = 3 \cdot 13 / (13 + 10 \cdot 10^3) = 3,9 \text{ мВ.}$$

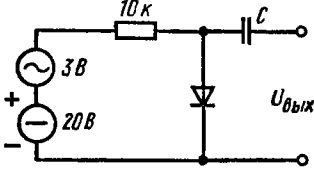


Рис. 1.10

1.15. Дана цепь, изображенная на рис. 1.11, а. Определить значение и форму выходного напряжения U_2 , предполагая, что диод представляет собой идеальный вентиль. ВАХ диода и его эквивалентная схема изображены на рис. 1.11, б, в соответственно.

Решение

При положительной полуволне подводимого напряжения на диод подается прямое напряжение, при отрицательной — обратное. Представляя диод в качестве идеального вентиля, изобразим эквивалентные схемы цепи для положительной (рис. 1.11, г) и отрицательной (рис. 1.11, д) полуволн подводимого напряжения.

При положительном входном напряжении U_1 выходное напряжение $U_2 = U_1$; при отрицательном напряжении на диоде ток диода, а следовательно, ток и напряжение на резисторе равны нулю. Графики входного и выходного напряжений показаны на рис. 1.11, е, ж.

В действительности выходное напряжение должно быть несколько меньше (69 или 69,5 В), так как имеется падение напряжения на диоде. Поскольку это напряжение мало, им можно

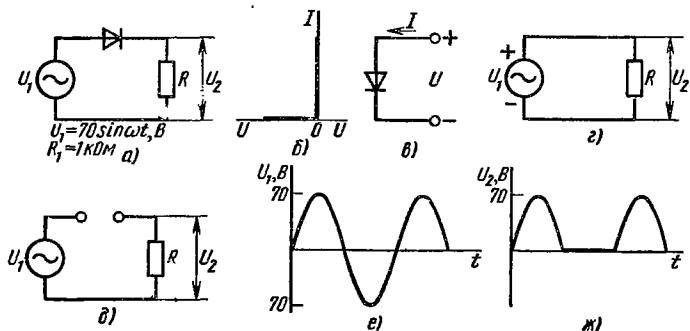


Рис. 1.11

пренебречь. Однако его следует учитывать при малых проводимых напряжениях. Если, например, $U_1 = +2$ В, то, согласно схеме, выходное напряжение тоже должно быть равно 2 В. В действительности выходное напряжение с учетом падения напряжения на диоде будет равно около 1,3 В для кремниевого диода или 1,7 В для германиевого диода.

1.16. Диод представлен моделью для большого сигнала (рис. 1.12, а) и имеет ВАХ, изображенную на рис. 1.12, б.

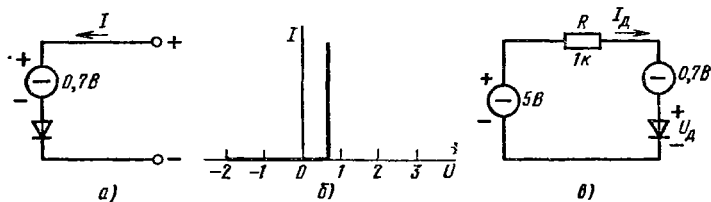


Рис. 1.12

Определить ток в цепи, показанной на рис. 1.12, в. Сравнить результат с ответом, полученным в задаче 1.11. Считать, что диод кремниевый.

Решение

По второму закону Кирхгофа для контура на рис. 1.12, в

$$-5 + 1000I_d + 0,7 + U_d = 0.$$

Из этого выражения следует, что на идеальном вентиле и на резисторе должно падать напряжение 4,3 В. Так как, согласно указанной полярности, вентиль смещен в прямом направлении, то падение напряжения на нем отсутствует ($U_d = 0$). Следовательно, напряжение 4,3 В падает только на резисторе. По закону Ома, ток диода $I_d = 4,3/10^3$ А = 4,3 мА.

1.17. Рассчитать простейшую схему выпрямителя без сглаживающего фильтра для выпрямления синусоидального напряжения с действующим значением $U = 700$ В, используя диоды типа Д226Б.

Решение

Определим амплитудное значение синусоидального напряжения: $U_m = \sqrt{2} U = \sqrt{2} \cdot 700 \approx 1000$ В. Это напряжение в простейшей схеме выпрямления будет обратным. Так как $U_{обр\ max}$ у диодов Д226Б при максимальной рабочей температуре составляет 300 В, то для выпрямления необходимо применить цепочку последовательно соединенных диодов. Но из-за больших разбросов обратных сопротивлений диодов (обратные сопро-

тивления диодов одного и того же типа могут отличаться в несколько раз) диоды необходимо шунтировать резисторами.

Необходимое число диодов n определим по формуле $n = U_m / (k_n U_{обр\max})$, где k_n — коэффициент нагрузки по напряжению (может принимать значения от 0,5 до 0,8). Пусть $k_n = 0,7$, тогда

$$n = 1000 / (0,7 \cdot 300) = 4,76.$$

Возьмем $n = 5$.

Значения сопротивлений шунтирующих резисторов определим по формуле

$$R_{ш} \leq \frac{nU_{обр\max} - 1,1U_m}{(n-1)I_{обр\max}},$$

где коэффициент 1,1 учитывает 10%-ный разброс сопротивлений применяемых резисторов; $I_{обр\max}$ — обратный ток при максимально допустимой температуре.

Из справочника находим, что $I_{обр\max} = 300$ мкА. Тогда, подставляя числовые значения величин в формулу для $R_{ш}$, получаем

$$R_{ш} \leq \frac{5 \cdot 300 - 1,1 \cdot 1000}{(5-1) \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = 333 \text{ кОм}.$$

Возьмем $R_{ш} = 300$ кОм.

Следовательно, схема выпрямителя имеет вид, показанный на рис. 1.13.

1.18. Составить и рассчитать выпрямительную цепь, позволяющую получить выпрямленный ток $I_{выпр} = 400$ мА, если используются диоды Д226.

Решение

Так как требуемый выпрямленный ток превышает максимально допустимое значение тока одного диода (при максимальной температуре $I_{выпр\max} = 200$ мА), то необходимо несколько диодов соединить параллельно. Ввиду возможного разброса прямых сопротивлений диодов (диоды одного типа могут иметь разброс прямых сопротивлений порядка десятков процентов) для выравнивания токов, протекающих через диоды, необходимо последовательно с диодами включать добавочные резисторы.

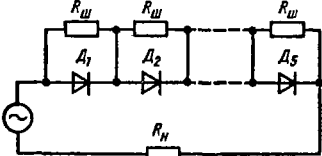


Рис. 1.13

Требуемое число диодов определяются по формуле

$$n = I_m / (k_T I_{\text{выпр max}}),$$

где k_T — коэффициент нагрузки по току, принимающий значения от 0,5 до 0,8. При $k_T = 0,8$

$$n = 400 / (0,8 \cdot 200) = 2,5.$$

Возьмем $n = 3$.

Значения сопротивлений добавочных резисторов найдем по формуле

$$R_{\text{доб}} \geq \frac{U_{\text{пр. ср}} (n - 1)}{n I_{\text{выпр max}} - 1,1 I_m}$$

Пользуясь справочником, находим

$$R_{\text{доб}} \geq \frac{1(3 - 1)}{3 \cdot 300 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 400 \cdot 10^{-3}} = 4,35 \text{ Ом.}$$

Возьмем $R_{\text{доб}} = 5 \text{ Ом}$.

Схема показана на рис. 1.14.

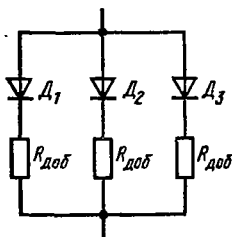


Рис. 1.14

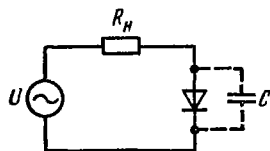


Рис. 1.15

1.19. Сплавной диод работает в простейшей схеме выпрямления с резистором нагрузки $R_n = 10 \text{ кОм}$ (рис. 1,15). Диод имеет $R_{\text{пр}} = 40 \text{ Ом}$, $R_{\text{обр}} = 400 \text{ кОм}$ и $C = 80 \text{ пФ}$. Найти частоту, на которой выпрямленный ток за счет влияния этой емкости уменьшится в два раза.

Решение

Учитывая, что $R_n \gg R_{\text{пр}}$ и $R_n \ll R_{\text{обр}}$, можно считать на низких частотах $I_{\text{пр max}} \approx U_{\text{max}} / (R_n + R_{\text{пр}}) \approx U_{\text{max}} / R_n$ и $I_{\text{обр max}} = U_{\text{max}} / (R_n + R_{\text{обр}}) \approx U_{\text{max}} / R_{\text{обр}} < I_{\text{пр}}$. На высокой частоте по-прежнему $I_{\text{пр}} \approx U / R_n$, $I_{\text{обр}} = U / Z_{\text{обр}}$. При уменьшении тока $I_{\text{выпр}}$ в два раза должно быть $I_{\text{обр}} = 0,5 I_{\text{пр}}$; следовательно, $Z_{\text{обр}} = 2 R_n$. Можно считать, что $Z_{\text{обр}} = \sqrt{R_n^2 + X_C^2}$, так как $X_C \ll R_{\text{обр}}$. Отсюда

$$X_C = \sqrt{Z^2 - R_H^2} = \sqrt{4R_H^2 - R_H^2} = \sqrt{3}R_H = 1,73R_H = 1,73 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Так как $X_C = 1/(2\pi fC)$, то

$$f = \frac{1}{2\pi X_C C} = \frac{10^{12}}{6,28 \cdot 80 \cdot 1,73 \cdot 10^4} = 10^6 / 8,68 = \\ = 115 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 115 \text{ кГц.}$$

1.20. Полупроводниковый диод имеет параметры $R_{пр} = 40 \text{ Ом}$, $R_{обр} = 0,4 \text{ МОм}$, $C = 80 \text{ пФ}$. Определить, на какой частоте емкостное сопротивление станет равно $R_{обр}$ и вследствие этого произойдет заметное увеличение обратного тока.

Ответ: 5 кГц.

1.21. Для стабилизации напряжения на нагрузке (рис. 1.16) используется полупроводниковый стабилитрон, напряжение стабилизации которого $U_{ст} = 10 \text{ В}$. Определить допустимые пределы изменения питающего напряжения, если максимальный ток стабилитрона $I_{ст\max} = 30 \text{ мА}$, минимальный ток стабилитрона $I_{ст\min} = 1 \text{ мА}$, сопротивление нагрузки $R_H = 1 \text{ кОм}$ и сопротивление ограничительного резистора $R_{огр} = 0,5 \text{ кОм}$.

Решение

Напряжение источника питания

$$E = U_{ст} + R_{огр}(I_H + I_{ст}).$$

Ток через нагрузку

$$I_H = U_{ст}/R_H.$$

Таким образом,

$$E = U_{ст}(1 + R_{огр}/R_H) + I_{ст}R_{огр}.$$

Подставляя в эту формулу максимальное и минимальное значения тока через стабилитрон, получим

$$E_{\min} = 10(1 + 0,5) + 1 \cdot 0,5 = 15,5 \text{ В,}$$

$$E_{\max} = 10(1 + 0,5) + 30 \cdot 0,5 = 30 \text{ В.}$$

1.22. Кремниевый стабилитрон типа Д813 включен в схему стабилизатора напряжения параллельно с резистором $R_H = 2,2 \text{ кОм}$ (рис. 1.16). Параметры стабилитрона: напряжение стабилизации $U_{ст} = 13 \text{ В}$, максимальный ток $I_{ст\max} = 20 \text{ мА}$, минимальный ток $I_{ст\min} = 1 \text{ мА}$. Найти сопротивление ограничительного резистора $R_{огр}$, если напряжение источника E меняется от $E_{\min} = 16 \text{ В}$ до $E_{\max} = 24 \text{ В}$. Определить, будет ли

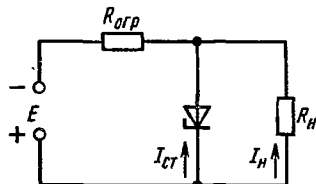


Рис. 1.16

обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения напряжения источника.

Решение

Сопротивление ограничительного резистора определим по формуле

$$R_{огр} = (E_{ср} - U_{ст}) / (I_{ср.ст} + I_{н}),$$

где $E_{ср} = 0,5(E_{мин} + E_{макс}) = 0,5(16 + 24) = 20$ В.

Средний ток через стабилитрон

$$I_{ст.ср} = 0,5(I_{ст мин} + I_{ст макс}) = 0,5(1 + 20) = 10,5 \text{ В.}$$

Ток через нагрузку

$$I_{н} = U_{ст} / R_{н} = 13 / (2,2 \cdot 10^3) = 5,9 \text{ мА.}$$

Следовательно, сопротивление ограничительного резистора

$$R_{огр} = (20 - 13) / [(10,5 + 5,9) \cdot 10^{-3}] = 7 / (16,4 \cdot 10^{-3}) \approx 430 \text{ Ом.}$$

Стабилизация будет обеспечена для изменения E в пределах от

$$E_{мин} = U_{ст} + (I_{ст мин} + I_{н}) R_{огр} = 13 + (10^{-3} + 5,9 \cdot 10^{-3}) \cdot 430 \approx 16 \text{ В}$$

до $E_{макс} = U_{ст} + (I_{ст макс} + I_{н}) R_{огр} =$

$$= 13 + (20 \cdot 10^{-3} + 5,9 \cdot 10^{-3}) \cdot 430 = 24,1 \text{ В.}$$

Таким образом, стабилизация получается во всем диапазоне изменения напряжения источника питания.

1.23. Барьерная емкость полупроводникового диода с резким переходом равна 25 пФ при обратном напряжении 5 В. Определить уменьшение емкости при снижении обратного напряжения до 7 В.

Решение

Пренебрегая контактной разностью потенциалов, используя формулу (1.8), можно записать

$$C_{б1} = k / U_1^{1/2},$$

где k — постоянная; U — обратное напряжение. Отсюда $k = C_{б1} U_1^{1/2}$.

При обратном напряжении 7 В барьерная емкость

$$C_{б2} = k / U_2^{1/2} = C_{б1} U_1^{1/2} / U_2^{1/2} = 25 \sqrt{5 / 7} = 21 \text{ пФ.}$$

Следовательно, емкость уменьшится на величину

$$\Delta C = C_{б1} - C_{б2} = 25 - 21 = 4 \text{ пФ.}$$

1.24. Пользуясь ВАХ туннельного диода ГИ304 (рис. 1.17),

определить напряжение E источника питания и сопротивление нагрузки, обеспечивающие работу туннельного диода в схеме усилителя.

1.25. Решить задачу 1.1 для кремниевого p - n -перехода с такими же концентрациями примеси, если $N = 5 \cdot 10^{22}$, $n_i = 10^{10}$.

Ответ: 0,75 В.

1.26. Решить задачу 1,2 для кремниевого p - n -перехода с такими же значениями удельных сопротивлений p - и n -областей.

Ответ: 0,68 В.

1.27. Рассчитать и построить ВАХ идеального полупроводникового p - n -перехода при $T = 300$ К, если обратный ток насыщения $I_0 = 10$ мкА. Расчет провести в интервале напряжений от 0 до -10 В (через 1 В) и от 0 до 0,2 В (через 0,05 В).

1.28. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, рассчитать и построить ВАХ диода, предположив, что диод имеет омическое сопротивление p - n -областей, равное 25 Ом. Характеристику построить на графике, вычерченном для задачи 1.27.

1.29. Диод имеет обратный ток насыщения $I_0 = 10$ мкА; напряжение, приложенное к диоду, равно 0,5 В. Пользуясь упрощенным уравнением ВАХ диода, найти отношение прямого тока к обратному при $T = 300$ К.

Ответ: $21,8 \cdot 10^7$.

1.30. К несимметричному p - n -переходу с концентрацией $N_d \gg N_a$ приложено обратное напряжение. Указать ту составляющую тока в переходе, которая будет наибольшей при этих условиях.

1.31. Какая область диода (n или p) обладает более высоким удельным сопротивлением, если известно, что число дырок, инжектируемых через p - n -переход в единицу времени, на несколько порядков превышает число инжектируемых электронов?

1.32. В идеальном p - n -переходе при $T = 300$ К прямое напряжение 0,1 В вызывает определенный ток носителей заряда. При каком прямом напряжении этот ток увеличится в два раза?

Ответ: 0,118 В.

1.33. Обратный ток насыщения p - n -перехода $I_0 = 1$ мкА при $T = 27^\circ\text{C}$ и $I_0 = 10$ мкА при $T = 65^\circ\text{C}$. Построить ВАХ этого p - n -перехода при температурах 27 и 65°C в интервале напряжений от -2 до 0,5 В.

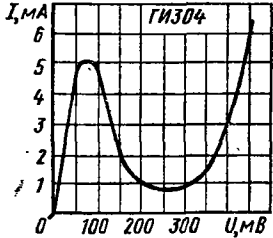


Рис. 1.17

1.34. При $T = 300$ К обратный ток насыщения германиевого p - n -перехода $I_0 = 30$ мкА. Найти дифференциальное сопротивление p - n -перехода при прямом и обратном напряжениях, равных $0,2$ В.

Ответ: $r_{\text{диф.пр}} = 0,4$ Ом; $r_{\text{диф.обр}} = 890$ Ом.

1.35. Емкость обедненного носителями заряда слоя резкого p - n -перехода вычисляются по формуле

$$C = k/\sqrt{U + \varphi_k}$$

где k — постоянный коэффициент; U — обратное напряжение; φ_k — контактная разность потенциалов.

Было обнаружено, что если к такому p - n -переходу приложить переменное напряжение с амплитудой $0,5$ В, то максимальная емкость перехода составит 2 пФ. Определить контактную разность потенциалов и минимальное значение емкости, если емкость перехода при нулевом смещении равна 1 пФ.

Ответ: $0,67$ В; $0,75$ пФ.

1.36. Найти барьерную емкость германиевого p - n -перехода, если удельное сопротивление p -области $\rho_p = 3,5$ Ом·см, контактная разность потенциалов $\varphi_k = 0,35$ В, приложенное обратное напряжение $U_{\text{обр}} = 5$ В и площадь поперечного сечения перехода $\Pi = 1$ мм².

Ответ: $44,7$ пФ.

1.37. Полупроводниковый диод имеет прямой ток $0,8$ А при прямом напряжении $0,3$ В и температуре окружающей среды $T = 35^\circ\text{C}$. Определить: а) обратный ток насыщения; б) дифференциальное сопротивление диода при прямом напряжении $0,2$ В; в) дифференциальное сопротивление диода при обратном напряжении 1 В.

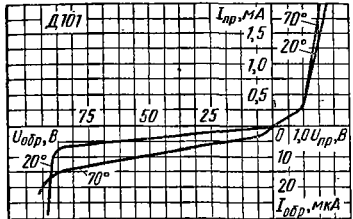
Ответ: а) 10 мкА; б) $1,43$ Ом; в) $6 \cdot 10^{19}$ Ом.

1.38. Определить сопротивление диода постоянному току при прямом и обратном напряжениях, если при прямом напряжении 1 В прямой ток равен 4 мА, а при обратном напряжении 100 В обратный ток равен $0,25$ мА.

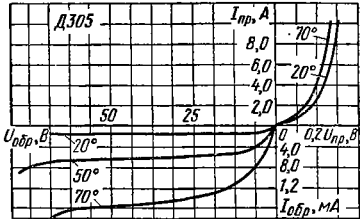
Ответ: 200 Ом; $4 \cdot 10^5$ Ом.

1.39. Пользуясь ВАХ диода типа Д101, изображенной на рис. 1.18, а, определить при $T = 20$ и 70°C : а) дифференциальные сопротивления и сопротивления постоянному прямому току 500 мкА, 1 и $1,5$ мА, а также постоянному обратному току при напряжении 50 В; б) мощности, рассеиваемые диодом при прохождении прямого тока $0,5$ мА и обратного тока при напряжении -50 В.

1.40. В детекторном каскаде, работающем при температурах от $T = 20$ до $T = 70^\circ\text{C}$, используется полупроводниковый диод Д305, ВАХ которого изображена на рис. 1.18, б. Опреде-



а)



б)

Рис. 1.18

лить: а) сопротивление диода постоянному току и его дифференциальное сопротивление $r_{\text{диф.пр}}$ для $T = 20^\circ\text{C}$ при прямом напряжении $0,2\text{ В}$ и сопротивление постоянному току при обратном напряжении 25 В ; б) во сколько раз изменится значение сопротивления диода постоянному току R_0 и его дифференциальное сопротивление $r_{\text{диф.пр}}$ при увеличении температуры от 20 до 70°C .

Ответ: а) $0,08\text{ Ом}$; $0,03\text{ Ом}$; 20 кОм ; б) при $U_{\text{пр}} = 0,2\text{ В}$ уменьшается в $1,66$ раза, $r_{\text{диф}}$ — в $66,66$ раза, при $U_{\text{обр}} = 25\text{ В}$ R_0 уменьшается в $11,3$ раза.

1.41. Определить, во сколько раз изменится сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление полупроводникового диода типа Д305 (рис. 1.18, б): а) с изменением прямого напряжения от $0,4$ до $0,6\text{ В}$ при неизменной температуре окружающей среды $T = 20^\circ\text{C}$; б) с изменением температуры окружающей среды от 20 до 125°C при напряжениях $0,6$ и -50 В .

1.42. Определить диффузионную емкость $C_{\text{д}}$, сопротивление $r_{\text{диф}}$ p - n -перехода и объемное сопротивление R_s в эквивалентной схеме германиевого диода, работающего при $T = 300\text{ К}$ и напряжении $U = 0,25\text{ В}$. Радиус p - n -перехода $r = 0,06\text{ см}$, обратный ток насыщения $I_0 = 10\text{ мкА}$, диффузионная длина электронов $L_n = 0,1\text{ см}$, коэффициент диффузии электронов $D_n = 93\text{ см}^2/\text{с}$, удельное сопротивление материала диода p - и n -областей $\rho = 0,1\text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Ответ: 920 мкФ ; $0,10\text{ Ом}$; 1 Ом .

1.43. Определить основные параметры эквивалентной схемы (рис. 1.19) германиевого диода, если концентрация дырков в p -области $p_p = 10^{15}\text{ см}^{-3}$, а концентрация электронов в n -области $n_n = 10^{16}\text{ см}^{-3}$, обратный ток насыщения $I_0 = 5\text{ мкА}$, прямое напряжение $U_{\text{пр}} = 0,2\text{ В}$, темпе-

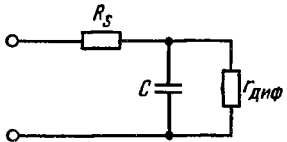


Рис. 1.19

ратура $T = 300 \text{ К}$, объемное сопротивление диода $R_v = 1 \text{ Ом}$.
Время жизни носителей заряда $\tau_p = 10 \text{ мкс}$.

Ответ: $R_{\text{диф}} = 1,7 \text{ Ом}$; $C_d = 6 \text{ мкФ}$.

1.44. Диод Д101 включен в схему, изображенную на рис. 1.7, а. Напряжение источника питания $E = 2 \text{ В}$, сопротивление резистора нагрузки $R_n = 1 \text{ кОм}$. Требуется: определить ток диода, напряжение на диоде и на нагрузке; построить рабочую характеристику диода. Вольт-амперная характеристика диода изображена на рис. 1.18, а.

Ответ: $I_d = 0,7 \text{ мА}$; $U_d = 1,2 \text{ В}$; $U_{R_n} = 0,8 \text{ В}$.

1.45. Пользуясь справочником, определить, во сколько раз уменьшится допустимое обратное напряжение полупроводникового диода типа Д302 при изменении температуры окружающей среды от 20 до 70°С .

1.46. Пользуясь справочником, выбрать тип диода, пригодного для выпрямления переменного синусоидального напряжения с амплитудой $U = 400 \text{ В}$ и рассчитанного на выпрямленный ток 250 мА .

1.47. Обратное напряжение через резистор R подается на диод типа Д101. Определить напряжение на диоде и ток диода при сопротивлении резистора, равном: а) 10 МОм , б) 1 МОм , в) 100 кОм . Вольт-амперная характеристика диода изображена на рис. 1.18, а. Напряжение источника $E = 50 \text{ В}$.

Ответ: а) $U_d = 1 \text{ В}$, $I_d = 2,8 \text{ мкА}$; б) $U_d = 17 \text{ В}$, $I_d = 15 \text{ мкА}$; в) $U_d = 27,8 \text{ В}$, $I_d = 20 \text{ мкА}$.

1.48. При прямом напряжении 1 В максимально допустимый ток диода равен 50 мА . Каково наибольшее значение напряжения источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме, если этот диод соединить последовательно с резистором нагрузки $R_n = 100 \text{ Ом}$?

Ответ: 6 В .

1.49. Пользуясь ВАХ диода типа Д813, определить при $T = 20^\circ\text{С}$: а) напряжение стабилизации; б) максимально допустимый прямой ток, если максимально допустимая рассеиваемая мощность диода равна 125 мВт .

1.50. Как зависит температурный коэффициент напряжения (ТКН) от вида пробоя p - n -перехода в полупроводниковом стабилитроне? Для каких напряжений p - n -перехода ТКН близок к нулю? Каким способом можно уменьшить ТКН полупроводниковых стабилитронов?

1.51. Для стабилизации напряжения в схеме подобрать по справочнику полупроводниковый стабилитрон и рассчитать сопротивление ограничительного резистора, если сопротивление нагрузки $R_n = 500 \text{ Ом}$. Необходимое напряжение стабилизации $U_{\text{ст}} = 10 \text{ В}$, напряжение источника питания $E = 16 \text{ В}$.

Ответ: Д814В; $R_{огр} = 160 \text{ Ом}$.

1.52. Пользуясь вольт-амперной характеристикой полупроводникового стабилизатора Д809 (рис. 1.20), графически определить рабочий режим ($U_{ст}$, $I_{ст}$) стабилизатора, подключенного последовательно с ограничительным резистором $R_{огр} = 500 \text{ Ом}$ к источнику питающего напряжения $E = 13 \text{ В}$ при $T = 20^\circ\text{C}$. Определить параметры R_0 , $r_{диф}$ для указанного выше режима и найти значения ТКН стабилизатора.

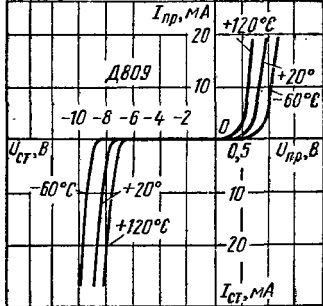


Рис. 1.20

Ответ: $U_{ст} = 8,3 \text{ В}$; $I_{ст} = 9 \text{ мА}$; $R_0 = 920 \text{ Ом}$; $r_{диф} = 50 \text{ Ом}$; ТКН = $0,1\%/K$.

1.53. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, определить пределы изменения сопротивления резистора нагрузки, если напряжение источника питания $E = 30 \text{ В}$.

Ответ: $R_{min} = 256 \text{ Ом}$; $R_{max} = 1 \text{ кОм}$.

1.54. Изобразить полную схему замещения варикапа и пояснить, как определяются ее параметры. Какой величиной характеризуется нелинейность варикапов в рабочем интервале напряжений?

1.55. Пользуясь справочником, определить емкость варикапа типа Д901В при комнатной температуре и максимальном обратном напряжении.

1.56. Пользуясь справочником, определить при номинальном напряжении изменение емкости варикапов Д901В, вызванное изменением температуры окружающей среды от 20 до 100°C .

1.57. Пользуясь справочником, определить добротность варикапа Д901В при температуре окружающей среды, равной 25°C .

1.58. Определить предельную рабочую частоту и добротность, а также диапазон перекрытия по емкости варикапа, максимальное напряжение которого $U = 80 \text{ В}$, номинальная емкость $C_v = 28 \text{ пФ}$ при напряжении 4 В , коэффициент перекрытия $n = 4$, а индуктивность ввода и контактов $L_s = 1 \text{ мкГн}$.

Ответ: $f_{пред} = 62 \text{ МГц}$, $Q = 90$, $\Delta C = 7 \text{ пФ}$.

1.59. По ВАХ туннельного диода типа ГИ304 при $T = 300 \text{ К}$ (рис. 1.17) определить следующие параметры: $r_{диф}$, I_n/I_v , U_n , U_v .

1.60. Начертить график зависимости дифференциального

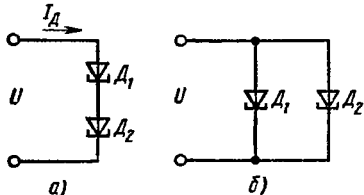


Рис. 1.21

(рис. 1.21, а). Построить эквивалентную вольт-амперную характеристику.

1.62. Два туннельных диода типа ГИ304 включены параллельно (рис. 1.21, б). Построить эквивалентную вольт-амперную характеристику. ВАХ каждого диода изображена на рис. 1.17.

1.63. Два туннельных диода типа ГИ304 (см. рис. 1.17) включены встречно. Построить эквивалентную ВАХ.

1.64. Последовательно с диодом типа ГИ304 (см. рис. 1.17) включен резистор, сопротивление которого $R = 2U_n/I_n$, где U_n и I_n соответственно минимальное напряжение и максимальный ток туннельного диода. Построить ВАХ этого соединения.

1.65. Параллельно с диодом типа ГИ304 (см. рис. 1.17) включен резистор с сопротивлением $R = 2U_n/I_n$, где U_n — максимальное напряжение туннельного диода; I_n — минимальный ток туннельного диода. Построить зависимость общего тока от напряжения на диоде.

1.66. Последовательно с туннельным диодом типа ГИ304 (см. рис. 1.17) включен полупроводниковый диод типа Д305, ВАХ которого изображена на рис. 1.18, б. Построить зависимость тока в этой цепи от подводимого напряжения.

1.67. Параллельно туннельному диоду типа ГИ304 (см. рис. 1.17) включен резистор сопротивлением R . Найти такое значение этого сопротивления, при котором результирующая вольт-амперная характеристика не имеет области с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Построить эту характеристику.

1.68. Определить предельное значение рабочей частоты для туннельного германиевого диода, имеющего следующие параметры: $I_n = 10$ мА; $I_n/I_n = 4,5$; $U_n = 0,06$ В; $U_{pp} = 0,4$ В, емкость $C = 50$ пФ, а также найти среднее значение модуля дифференциального сопротивления на падающем участке характеристики, объемное сопротивление R_s и постоянную времени переключения $\tau_{пер}$, если $U_n = 0,18$ В, радиус p - n -перехода $r =$

сопротивления от подводимого напряжения для туннельного диода. Использовать значения напряжения в интервале от 0 до 0,45 В (рис. 1.17).

1.61. Два туннельных диода типа ГИ304, ВАХ которых изображена на рис. 1.17, соединены последовательно

$= 0,05$ см, а удельная проводимость примесного германия $\sigma = 8$ См/см.

Ответ: $f_{\text{пер}} = 1$ ГГц; $r_{\text{диф}} = 15$ Ом; $R_s = 0,65$ Ом; $r_{\text{пер}} = 1,7 \cdot 10^{-9}$ с.

ГЛАВА 2

ТРАНЗИСТОРЫ. РАСЧЕТ ОДИНОЧНЫХ КАСКАДОВ

Транзисторами называют полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности и имеющие три или более вывода. Различают биполярные и полевые транзисторы.

§ 2.1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Физические процессы в биполярном транзисторе

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя областями чередующейся электропроводности, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Эти транзисторы называют биполярными, потому что их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков. Биполярные транзисторы могут быть типа *p-n-p* и *n-p-n*.

Структуры и условные обозначения данных типов транзисторов показаны на рис. 2.1. Между каждой областью полупроводника и ее выводом имеется омический контакт, который на рис. 2.1 показан жирной чертой. Средний слой транзистора называют базой (Б), один из крайних — эмиттером (Э), другой — коллектором (К).

База — область, в которую инжектируются неосновные для этой области носители заряда. Эмиттер — область, из которой осуществляется инжекция носителей заряда в базу. Коллектор предназначен для экстракции носителей заряда из базы. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называется эмиттерным переходом, между базой и коллектором — коллекторным переходом.

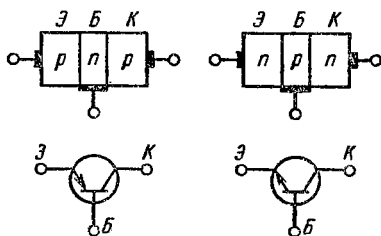


Рис. 2.1

В зависимости от соче-