

## СВОЙСТВА $p-n$ ПЕРЕХОДА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

### § 1.1. Основные свойства $p-n$ перехода

$p-n$  переход — это контакт двух одинаковых полупроводников с разным типом проводимости.  $n$ -область легирована донорной примесью с концентрацией доноров  $N_D$ , а  $p$ -область — акцепторной примесью с концентрацией акцепторов  $N_A$ . В равновесии высота потенциального барьера между  $p$ - и  $n$ - областями определяется формулой [1]

$$\varphi_K = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2}. \quad (1.1)$$

Здесь  $n_n$  и  $p_p$  — концентрации основных носителей соответственно в  $n$ - и  $p$ - областях,

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right) \quad (1.2)$$

— собственная концентрация носителей в данном материале,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $e$  — заряд электрона,  $\Delta W$  — ширина запрещенной зоны полупроводника. При комнатной температуре в кремнии, германии и арсениде галлия вся примесь ионизована, а концентрация собственных носителей пренебрежимо мала, поэтому концентрация основных носителей равна концентрации примесей:  $n_n = N_D$ ;  $p_p = N_A$ . Ширина  $p-n$  перехода в равновесии, т.е. при отсутствии внешнего напряжения, равна

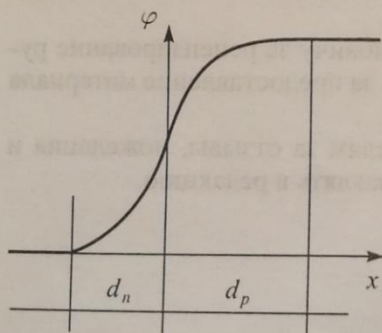


Рис. 1.1. Распределение потенциала вблизи  $p-n$  перехода

$$d = d_n + d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e} \varphi_K \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}, \quad (1.3)$$

где  $d_n$  и  $d_p$  — соответственно ширина  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ -областей, отсчитываемая от металлургической границы (см. рис. 1.1).

Поскольку внутри  $p-n$  перехода общий отрицательный заряд ионизованных акцепторов равен общему положительному заряду ионизованных доноров, то

$$d_n N_D S = d_p N_A S, \quad (1.4)$$

здесь  $S$  — площадь поперечного сечения  $p-n$  перехода. Отсюда следует

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_A}{N_D} = \frac{p_p}{n_n}. \quad (1.5)$$

Напряженность электрического поля в  $p-n$  переходе максимальна на металлургической границе и равна

$$E_{\max} = \frac{2\varphi_K}{d}. \quad (1.6)$$

При приложении к  $p-n$  переходу внешнего напряжения  $U$  высота потенциального барьера изменяется на величину приложенного напряжения:  $\varphi(U) = \varphi_K - U$ .

Величина барьера уменьшается при положительном (прямом) напряжении  $U$ , т. е. когда «+» приложен к  $p$ -области, и увеличивается при отрицательном (обратном) напряжении. Соответственно изменяется и ширина  $p-n$  перехода. При прямых напряжениях  $p-n$  переход сужается:

$$d(U_{\text{пр}} > 0) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e}(\varphi_K - U_{\text{пр}}) \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}, \quad (1.7a)$$

а при обратных напряжениях — расширяется:

$$d(U_{\text{обр}} < 0) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e}(\varphi_K + |U_{\text{обр}}|) \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}. \quad (1.7b)$$

Вольт-амперная характеристика  $p-n$  перехода выражает зависимость между током  $I$  (или плотностью тока  $j$ ) через  $p-n$  переход и приложенным напряжением  $U$  [1]:

$$j = \left( \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) = j_s \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.8)$$

Здесь  $j_s$  — плотность обратного тока насыщения,  $D_n$  и  $D_p$  — коэффициенты диффузии, соответственно, электронов и дырок,  $L_n$  и  $L_p$  — соответствующие диффузионные длины,  $n_p$ ,  $p_n$  — концентрации неосновных носителей. Для невырожденных полупроводников

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1.9a)$$

— концентрация электронов в  $p$ -области;

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1.9b)$$

— концентрация дырок в  $n$ -области.

Формула (1.8) выводится в предположении, что все внешнее напряжение  $U$  приложено только к области  $p-n$  перехода. Проводимость квазинейтральной  $p$ -области

$$\sigma_p = e p_p \mu_p, \quad (1.10)$$

и квазинейтральной  $n$ -области

$$\sigma_n = e n_n \mu_n \quad (1.11)$$

намного больше проводимости обедненной области  $p-n$  перехода. Поэтому падение напряжения на квазинейтральных областях пренебрежимо мало. В формулах (1.10) и (1.11)  $\mu_p$  и  $\mu_n$  — подвижности дырок и электронов соответственно.

$p-n$  переход служит основой полупроводниковых диодов — приборов, обладающих односторонней проводимостью тока.

### ЗАДАЧИ

Задача 1.1.1. Определить:

- 1) контактную разность потенциалов  $\varphi_K$ ,
  - 2) ширину  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ - областей  $d_n$  и  $d_p$ , а также полную ширину перехода  $d = d_n + d_p$ ,
  - 3) максимальную величину напряженности контактного поля  $E_m$ .
- Известны проводимости в  $n$ - и  $p$ - областях  $\sigma_n = 8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и  $\sigma_p = 2,4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а также подвижности электронов и дырок  $\mu_n = 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_p = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Как изменится высота потенциального барьера  $\varphi$ , если к  $p-n$  переходу приложить внешнее напряжение: а)  $U_1 = +0,5 \text{ В}$ ? б)  $U_2 = -5 \text{ В}$ ?

Собственная концентрация примесей в кремнии  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$ ;  $\varepsilon = 12$ ; заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ; постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ ; температура  $T = 300 \text{ К}$ .

Решение. Определим сначала концентрации основных носителей тока в  $n$ - и  $p$ - областях, воспользовавшись выражениями для электронной и дырочной проводимостей

$$\sigma_n = e \cdot n_n \mu_n,$$

$$\sigma_p = e \cdot p_p \mu_p.$$

Отсюда получим

$$n_n = \frac{\sigma_n}{e \mu_n} = \frac{8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 500} = 10^{17} \text{ см}^{-3},$$

$$p_p = \frac{\sigma_p}{e \mu_p} = \frac{2,4}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 300} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Высота потенциального барьера при отсутствии внешнего напряжения  $\varphi_K$  определяется по формуле (1.1):

$$\varphi_K = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2} = 0,026 \ln \frac{10^{17} \cdot 5 \cdot 10^{16}}{(1,4 \cdot 10^{10})^2} = 0,803 \text{ В}.$$

Ширину  $p-n$  перехода можно определить, воспользовавшись выражением (1.3):

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e} \varphi_K \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 0,803 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{17}}{5 \cdot 10^{33}}} = 0,179 \text{ мкм}.$$

Из формулы (1.4) следует

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_A}{N_D} = \frac{p_p}{n_n} = \frac{5 \cdot 10^{16}}{10^{17}} = 0,5.$$

Воспользовавшись равенством  $d = d_n + d_p$ , получим

$$d_p = \frac{d}{1 + d_n/d_p} = \frac{0,179 \text{ мкм}}{1 + 0,5} \approx 0,119 \text{ мкм.}$$

Далее,  $d_n = d - d_p = 0,179 - 0,119 = 0,06 \text{ мкм.}$

Максимальная напряженность электрического поля равна (1.6)

$$E_m = \frac{2\varphi_K}{d} = \frac{2 \cdot 0,803 \text{ В}}{0,179 \cdot 10^{-4} \text{ см}} = 89720 \text{ В/см.}$$

Если к  $p-n$  переходу приложено прямое напряжение  $U_1 = 0,5 \text{ В}$ , то потенциальный барьер уменьшится на  $0,5 \text{ В}$ :  $\varphi = \varphi_K - U_1 = 0,803 - 0,5 = 0,303 \text{ В.}$

Если к  $p-n$  переходу приложено обратное напряжение  $U_2 = -5 \text{ В}$ , то потенциальный барьер увеличится на  $5 \text{ В}$ :  $\varphi = \varphi_K - U_1 = 0,803 + 5 = 5,803 \text{ В.}$

Ответ:  $\varphi_K = 0,803 \text{ В}$ ;  $d = 0,179 \text{ мкм}$ ;  $d_p = 0,119 \text{ мкм}$ ;  $d_n = 0,06 \text{ мкм}$ ;  $E_m = 89720 \text{ В/см}$ ;  $\varphi_1 = 0,303 \text{ В}$ ;  $\varphi_2 = 5,803 \text{ В.}$

Задача 1.1.2. Определить:

1) контактную разность потенциалов  $\varphi_K$   $p-n$  перехода кремниевого диода,

2) ширину  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ - областей  $d_n$  и  $d_p$ , а также полную ширину перехода  $d = d_n + d_p$ ,

3) максимальную величину напряженности контактного поля  $E_m$ .

Известны величины:  $\sigma_n = 3,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и  $\sigma_p = 4,8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $\mu_n = 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_p = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ . Как изменится высота потенциального барьера  $\varphi$ , если к  $p-n$  переходу приложить внешнее напряжение: а)  $U_1 = +0,3 \text{ В}$ ? б)  $U_2 = -2 \text{ В}$ ?

Задача 1.1.3. Определить:

1) контактную разность потенциалов  $\varphi_K$   $p-n$  перехода кремниевого диода,

2) ширину  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ - областей —  $d_n$  и  $d_p$ , а также полную ширину перехода  $d = d_n + d_p$ ,

3) максимальную величину напряженности контактного поля  $E_m$ .

Известны величины:  $\sigma_n = 3,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и  $\sigma_p = 0,64 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $\mu_n = 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_p = 400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ . Как изменится высота потенциального барьера  $\varphi$ , если к  $p-n$  переходу приложить внешнее напряжение: а)  $U_1 = +0,4 \text{ В}$ ? б)  $U_2 = -4 \text{ В}$ ?

Задача 1.1.4. Определить:

- 1) контактную разность потенциалов  $\varphi_K$   $p-n$  перехода кремниевого диода,
  - 2) ширину  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ - областей  $d_n$  и  $d_p$ , а также полную ширину перехода  $d = d_n + d_p$ ,
  - 3) максимальную величину напряженности контактного поля  $E_M$ .
- Известны величины:  $\sigma_n = 1,6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и  $\sigma_p = 2,4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_p = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ . Как изменится высота потенциального барьера  $\varphi$ , если к  $p-n$  переходу приложить внешнее напряжение: а)  $U_1 = +0,1 \text{ В}$ ? б)  $U_2 = -1,5 \text{ В}$ ?

Задача 1.1.5. Определить:

- 1) контактную разность потенциалов  $\varphi_K$   $p-n$  перехода кремниевого диода,
  - 2) ширину  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ - областей  $d_n$  и  $d_p$ , а также полную ширину перехода  $d = d_n + d_p$ ,
  - 3) максимальную величину напряженности контактного поля  $E_M$ .
- Известны величины:  $\sigma_n = 8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и  $\sigma_p = 0,008 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $\mu_n = 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_p = 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ . Как изменится высота потенциального барьера  $\varphi$ , если к  $p-n$  переходу приложить внешнее напряжение: а)  $U_1 = +0,3 \text{ В}$ ? б)  $U_2 = -3 \text{ В}$ ?

Задача 1.1.6. Определить:

- 1) контактную разность потенциалов  $\varphi_K$   $p-n$  перехода кремниевого диода,
  - 2) ширину  $p-n$  перехода со стороны  $n$ - и  $p$ - областей  $d_n$  и  $d_p$ , а также полную ширину перехода  $d = d_n + d_p$ ,
  - 3) максимальную величину напряженности контактного поля  $E_M$ .
- Известны величины:  $\sigma_n = 0,024 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и  $\sigma_p = 4,8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_p = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ . Как изменится высота потенциального барьера  $\varphi$ , если к  $p-n$  переходу приложить внешнее напряжение: а)  $U_1 = +0,6 \text{ В}$ ? б)  $U_2 = -7 \text{ В}$ ?

Задача 1.1.7. Определить плотность тока насыщения  $j_s$  в идеальном кремниевом переходе, если  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ;  $D_n = 40 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $D_p = 15 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $L_n = 100 \text{ мкм}$ ;  $L_p = 60 \text{ мкм}$ ;  $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

Решение. Определим сначала концентрации неосновных носителей в  $n$ - и  $p$ - областях:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{1,4^2 \cdot 10^{20}}{10^{15}} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3},$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{1,4^2 \cdot 10^{20}}{10^{17}} = 1,96 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}.$$

Плотность ток

$$j_s = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ ($$

Ответ:  $j_s =$

Задача 1.1.3 германиевом  $p-n$   $D_p = 50 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $= 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Задача 1.1.1 наковую геомет концентрации и Определить от напряжении  $U$  и  $D_p$ , а также

Решение формул (1.9 а)

Отсюда

Из (1.13

Отве

Зада  $p-n$  пере плотност в 5 раз? I при изме

Зада некоторо концент

Плотность тока  $j_s$  определяется согласно формуле (1.8):

$$j_s = 1,6 \cdot 10^{-10} \left( \frac{15 \cdot 1,96 \cdot 10^5}{6 \cdot 10^{-3}} + \frac{40 \cdot 1,96 \cdot 10^3}{10^{-2}} \right) \frac{A}{\text{см}^2} = 7,96 \cdot 10^{-11} A / \text{см}^2.$$

Ответ:  $j_s = 7,96 \cdot 10^{-11} A / \text{см}^2$ .

Задача 1.1.8. Определить плотность тока насыщения  $j_s$  в идеальном германиевом p-n переходе, если  $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $D_n = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $D_p = 50 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $L_n = 300 \text{ мкм}$ ;  $L_p = 200 \text{ мкм}$ ;  $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Задача 1.1.9. Два диода с идеальными p-n переходами имеют одинаковую геометрию и сделаны из одного материала. Но в первом диоде концентрации примесей  $N_A$  и  $N_D$  в 10 раз меньше, чем во втором диоде. Определить отношение плотностей токов  $j_1/j_2$  при одинаковом внешнем напряжении  $U$ . Предположить, что коэффициенты диффузии носителей  $D_n$  и  $D_p$ , а также диффузионные длины  $L_n$  и  $L_p$  одинаковы для обоих диодов.

Решение. Перепишем формулу (1.8), подставив в нее  $n_p$  и  $p_n$  из формул (1.9a) и (1.9б). Тогда

$$j = en_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.12)$$

Отсюда

$$j_1 = en_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_{A1}} + \frac{D_p}{L_p N_{D1}} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (1.13)$$

$$j_2 = en_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_{A2}} + \frac{D_p}{L_p N_{D2}} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.14)$$

Из (1.13) и (1.14) имеем:

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{\left( \frac{D_n}{L_n N_{A1}} + \frac{D_p}{L_p N_{D1}} \right)}{\left( \frac{D_n}{L_n \cdot 10 \cdot N_{A1}} + \frac{D_p}{L_p \cdot 10 \cdot N_{D1}} \right)} = 10.$$

Ответ:  $j_1/j_2 = 10$ .

Задача 1.1.10. Концентрация доноров в n-области диода с идеальным p-n переходом равна концентрации акцепторов в p-области. Как изменится плотность тока через такой переход, если концентрацию доноров увеличить в 5 раз? Принять, что отношения  $D_n/D_p = 3$ ,  $L_n/L_p = 1,5$  не изменились при изменении уровня легирования.

Задача 1.1.11. Плотность тока через идеальный p-n переход при некотором внешнем напряжении  $U$  равна  $j_1 = 0,2 A/\text{см}^2$ . Известно, что концентрация акцепторов в p-области в 10 раз больше, чем концентрация

доноров в  $n$ -области. Найти плотность тока  $j_2$  через аналогичный переход, но с меньшей в 2 раза концентрацией акцепторов, если внешнее напряжение осталось равным  $U$ . Принять, что отношения  $D_n/D_p = 2$ ,  $L_n/L_p = 1,2$  не изменились при изменении уровня легирования.

Задача 1.1.12. В полупроводниковом идеальном диоде  $D_n \approx D_p$ ,  $L_n \approx L_p$ ,  $N_A = 20N_D$ . Определить соотношение между дырочной и электронной компонентами тока через  $p-n$  переход, то есть отношение  $j_p/j_n$ .

Решение. Воспользуемся формулой (1.12). Общая плотность тока есть сумма электронной и дырочной компонент:  $j = j_n + j_p$ , причем

$$j_n = en_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (1.15)$$

$$j_p = en_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.16)$$

Учитывая равенство коэффициентов диффузии и диффузионных длин, имеем

$$\frac{j_p}{j_n} = \frac{N_A}{N_D} = 20.$$

Ответ:  $j_p/j_n = 20$ .

Задача 1.1.13. В полупроводниковом диоде коэффициент диффузии электронов вдвое больше коэффициента диффузии дырок. Время жизни электронов вдвое меньше времени жизни дырок. Концентрация доноров в  $n$ -области в 10 раз меньше концентрации акцепторов в  $p$ -области. Определить соотношение между дырочной и электронной компонентами плотностей тока через  $p-n$  переход.

Решение. Дырочная и электронная компоненты плотностей тока через переход определяются согласно формулам (1.15) и (1.16).

Учтем, что диффузионная длина носителей связана с коэффициентом диффузии и временем жизни формулой

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (1.17)$$

Согласно (1.17)  $L_p = \sqrt{D_p\tau_p}$ , а условия задачи позволяют выразить  $L_n$  через  $L_p$ :

$$L_n = \sqrt{D_n\tau_n} = \sqrt{2D_p \frac{\tau_p}{2}} = L_p.$$

Учитывая равенство диффузионных длин, получим согласно (1.15) и (1.16)

$$j_n = en_i^2 \frac{2D_p}{L_p N_A} \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right),$$

$$j_p = en_i^2 \frac{10D_p}{L_p N_A} \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right).$$

Искомое соот

Ответ:  $j_p/$

Задача 1.1  
электронов в 4 р  
электронов и д  
больше концен

Задача 1.  
электронов в 2  
электронов в 8  
в  $n$ -области в  
делить отноше

Задача 1  
наковую геом  
тронов и дыр  
В первом ди  
Концентраци  
во втором. О  
напряжении.

Решени  
одного матер  
фузии носит  
диффузион  
ше, чем во в

$$j_2 = en_i^2 \left( \right.$$

Окончател

Отве

Зада  
наковую  
носители  
диффузи

Искомое соотношение

$$\frac{j_p}{j_n} = \frac{10}{2} = 5.$$

Ответ:  $j_p/j_n = 5$ .

Задача 1.1.14. В полупроводниковом диоде коэффициент диффузии электронов в 4 раза больше коэффициента диффузии дырок. Времена жизни электронов и дырок равны. Концентрация акцепторов в  $p$ -области в 5 раз больше концентрации доноров в  $n$ -области. Определить отношение  $j_p/j_n$ .

Задача 1.1.15. В полупроводниковом диоде коэффициент диффузии электронов в 2 раза больше коэффициента диффузии дырок. Времена жизни электронов в 8 раз больше времени жизни дырок. Концентрация доноров в  $n$ -области в 10 раз больше концентрации акцепторов в  $p$ -области. Определить отношение  $j_p/j_n$ .

Задача 1.1.16. Два диода с идеальными  $p-n$  переходами имеют одинаковую геометрию и сделаны из одного материала. Времена жизни электронов и дырок в каждом диоде одинаковы:  $\tau_{n1} = \tau_{p1} = \tau_1$ ;  $\tau_{n2} = \tau_{p2} = \tau_2$ . В первом диоде время жизни ( $\tau_1$ ) в 4 раза меньше, чем во втором ( $\tau_2$ ). Концентрации примесей  $N_A$  и  $N_D$  в первом диоде в 10 раз больше, чем во втором. Определить отношение плотностей токов  $j_1/j_2$  при одинаковом напряжении.

Решение. Воспользуемся формулой (1.12). Если диоды сделаны из одного материала, то приближенно можно считать, что коэффициенты диффузии носителей в них одинаковые. Однако из-за разных времен жизни диффузионные длины носителей  $L = \sqrt{D\tau}$  в первом диоде в 2 раза меньше, чем во втором. Отсюда, с учетом разницы в концентрациях

$$j_1 = en_i^2 \left( \frac{D_n}{L_{n1}N_{A1}} + \frac{D_p}{L_{p1}N_{D1}} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right),$$

$$j_2 = en_i^2 \left( \frac{D_n}{L_{n2}N_{A2}} + \frac{D_p}{L_{p2}N_{D2}} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) = \\ = en_i^2 \left( \frac{D_n}{20L_{n1}N_{A1}} + \frac{D_p}{20L_{p1}N_{D1}} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right).$$

Окончательно получим

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{1}{20} = 0,05.$$

Ответ:  $j_1/j_2 = 0,05$ .

Задача 1.1.17. Два диода с идеальными  $p-n$  переходами имеют одинаковую геометрию и сделаны из одного материала. Диффузионные длины носителей в первом диоде в 2 раза больше, чем во втором; коэффициенты диффузии в обоих диодах одинаковые. Определить отношение обратных



токов  $j_{s1}/j_{s2}$ , если концентрация примесей в первом диоде в 4 раза меньше, чем во втором.

Задача 1.1.18. Определить, как изменится плотность обратного тока  $j_s$  через идеальный кремниевый  $p-n$  переход при уменьшении температуры от  $T_1 = 300$  К до  $T_2 = 250$  К. Ширина запрещенной зоны кремния при 300 К  $\Delta W = 1,12$  эВ. При изменении температуры ширина запрещенной зоны кремния изменяется по закону  $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \alpha(T - 300 \text{ К})$ , где  $\alpha = 2,84 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

Решение. Подставим в формулу (1.12) выражение (1.2) для собственной концентрации  $n_i$ . Получим:

$$j = eN_C N_V \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1.18)$$

плотность обратного тока  $j_s$  равна

$$j_s = eN_C N_V \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right).$$

Параметры  $N_C$ ,  $N_V$ ,  $D_n$ ,  $D_p$ ,  $L_n$  и  $L_p$  слабо зависят от температуры. Поэтому основная температурная зависимость обратного тока определяется экспоненциальным множителем  $\exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right)$ . При  $T_1 = 300$  К этот множитель равен  $\exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{1,12 \text{ эВ}}{0,026 \text{ эВ}}\right) = 1,96 \cdot 10^{-19}$ .

При  $T_2 = 250$  К ширина запрещенной зоны

$$\Delta W(T_2) = \Delta W(T_1) + \alpha \cdot 50 \text{ К} = 1,1342 \text{ эВ},$$

а тепловая энергия  $kT = 0,0216$  эВ.

Отсюда  $\exp\left(-\frac{\Delta W(T_2)}{kT_2}\right) = 1,84 \cdot 10^{-23}$ . Отношение обратных токов в основном определяется отношением этих экспонент, то есть

$$\frac{j_1}{j_2} \approx \frac{1,96 \cdot 10^{-19}}{1,84 \cdot 10^{-23}} \approx 10^4.$$

Ответ:  $j_1/j_2 \approx 10^4$ .

Задача 1.1.19. Определить, как изменится плотность обратного тока  $j_s$  через идеальный  $p-n$  переход из арсенида галлия при уменьшении температуры с  $T_1 = 300$  К до  $T_2 = 250$  К. Ширина запрещенной зоны GaAs меняется по закону  $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \alpha(T - 300 \text{ К})$ , где  $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$  эВ/К,  $\Delta W(300 \text{ К}) = 1,42$  эВ.

Задача 1.1.20. Определить, как изменится плотность обратного тока  $j_s$  через идеальный германиевый  $p-n$  переход при увеличении температуры с  $T_1 = 300$  К до  $T_2 = 350$  К. Ширина запрещенной зоны германия при  $T = 300$  К  $\Delta W = 0,665$  эВ. При изменении температуры ширина запрещенной зоны германия изменяется по закону  $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \alpha(T - 300 \text{ К})$ , где  $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

Задача 1.1.21. Ширина запрещенной зоны полупроводника PbSe равна 0,26 эВ при 300 К и изменяется с температурой по закону  $\Delta(T) = \Delta W(300 \text{ К}) + 4 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}(T - 300 \text{ К})$ . Определить, как изменится плотность тока через  $p$ - $n$  переход, сделанный из этого материала, если температура увеличивается с 300 К до 350 К. Считать, что остальные параметры не зависят от температуры, а напряжение на  $p$ - $n$  переходе равно 0,1 В.

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулой (1.18). Поскольку по условию задачи параметры полупроводника не меняются с температурой, то зависимость плотности тока от температуры для прямого напряжения определяется выражением

$$j \propto \exp\left(-\frac{\Delta W - eU}{kT}\right). \quad (1.19)$$

Тогда для  $T_1 = 300 \text{ К}$ :

$$j_1 \propto \exp\left(-\frac{0,26 - 0,1}{0,026}\right) = 2,1 \cdot 10^{-3},$$

а для  $T_2 = 350 \text{ К}$

$$j_2 \propto \exp\left(-\frac{0,28 - 0,1}{0,03}\right) = 2,48 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда  $\frac{j_2}{j_1} = 1,18$ .

Ответ: плотность тока увеличится в 1,18 раза.

Задача 1.1.22. Ширина запрещенной зоны полупроводника равна 0,62 эВ и не меняется с температурой. Определить, как изменится плотность тока через  $p$ - $n$  переход, сделанный из этого материала, если температура изменяется с  $T_1 = 300 \text{ К}$  до  $T_2 = 250 \text{ К}$ ? Считать, что параметры полупроводника не зависят от температуры, а напряжение на  $p$ - $n$  переходе равно 0,36 В.

Задача 1.1.23. Как изменится плотность тока через германиевый идеальный  $p$ - $n$  переход при изменении температуры от  $T_1 = 300 \text{ К}$  до  $T_2 = 350 \text{ К}$ , если напряжение на  $p$ - $n$  переходе равно 0,4 В?

Ширина запрещенной зоны германия равна 0,665 эВ при 300 К и изменяется с температурой по закону  $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \beta(T - 300 \text{ К})$ , где  $\beta = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ . Температурным изменением остальных параметров полупроводника пренебречь.

Задача 1.1.24. Два  $p$ - $n$  перехода имеют одинаковые концентрации примесей, но сделаны из разных материалов. Коэффициенты диффузии

и времена жизни носителей в обоих материалах примерно одинаковы. Ширина запрещенной зоны первого материала  $\Delta W_1 = 1,0$  эВ, ширина запрещенной зоны второго  $\Delta W_2 = 0,75$  эВ. Оценить отношение плотностей обратных токов  $j_{s1}/j_{s2}$  при комнатной температуре.

Решение. Для решения задачи используем формулу (1.18). Как следует из этого выражения, основная зависимость плотности тока от материала определяется величиной ширины запрещенной зоны  $\Delta W$ , т. к. она стоит в экспоненте. Поэтому для оценки отношения плотностей токов достаточно вычислить отношение экспоненциальных множителей:

$$\frac{j_{s1}}{j_{s2}} \approx \frac{\exp\left(-\frac{\Delta W_1}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\Delta W_2}{kT}\right)} = \frac{1,98 \cdot 10^{-17}}{2,97 \cdot 10^{-13}} = 6,66 \cdot 10^{-5}.$$

Ответ:  $j_{s1}/j_{s2} = 6,66 \cdot 10^{-5}$ .

Задача 1.1.25. Два  $p-n$  перехода имеют одинаковые концентрации примесей, но сделаны из разного материала. Коэффициенты диффузии и времена жизни носителей в обоих материалах примерно одинаковы. Ширина запрещенной зоны первого материала  $\Delta W_1 = 1,2$  эВ, второго —  $\Delta W_2 = 0,67$  эВ. Оценить отношение плотностей токов при комнатной температуре и внешнем напряжении  $U = 0,4$  В.

## § 1.2. Полупроводниковые диоды

Основой полупроводниковых диодов служит  $p-n$  переход. Поэтому свойства диода и его вольт-амперная характеристика отражают особенности прохождения тока через  $p-n$  переход.

Выражение (1.8) описывает вольт-амперную характеристику идеального  $p-n$  перехода. Вольт-амперные характеристики реальных кремниевых диодов отличаются от характеристики идеального перехода. Типичная ВАХ кремниевого диода представлена на рис. 1.2.

Характерная особенность ВАХ реальных диодов — отсутствие на рисунках токов через диод при отрицательных и малых положительных напряжениях, т. е. при  $U < U_{\text{пор}}$  (см. рис. 1.2). Обратные токи в этих диодах малы, поэтому в инженерных расчетах их полагают равными нулю; заметный ток появляется только при  $U > U_{\text{пор}}$ . Область напряжений  $0 < U < U_{\text{пор}}$  называется зоной умолчания. Иногда при анализе кремниевых интегральных схем ВАХ диода изображают в виде ступеньки (рис. 1.3), то есть представляют диод в виде идеального ключа.

К основным параметрам диода относятся сопротивление диода постоянному току  $R_{\text{п}}$  и дифференциальное сопротивление  $R_{\text{диф}}$ . Величина  $R_{\text{п}}$  определяется как отношение постоянного напряжения на диоде к току через него. Дифференциальное сопротивление характеризует наклон к оси абсцисс вольт-амперной характеристики.

$R_{\text{диф}} =$   
Отл  
рехода

$I \uparrow$

0

Рис. 1.  
тика к

напря  
ются п  
реальн  
Суть э

Пр  
рис. 1.

Д

динаковы. Ши-  
рина запре-  
ие плотностей

1.18). Как сле-  
ка от материа-  
т. к. она стоит  
ов достаточно

концентрации  
ты диффузии  
одинаковые.  
В, второго —  
мнатной тем-

код. Поэтому  
от особенно-

ку идеально-  
кремниевых  
шпичная ВАХ

гствие на ри-  
льных напря-  
диодах малы,  
аметный ток  
 $I < U_{пор}$  на-  
нтегральных  
сть представ-

диода посто-  
величина  $R_n$   
е к току че-  
аклон к оси  
ни на диоде:

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI}$$

Отличие характеристик реальных диодов от ВАХ идеального  $p-n$  перехода делает практически невозможным аналитический расчет токов и

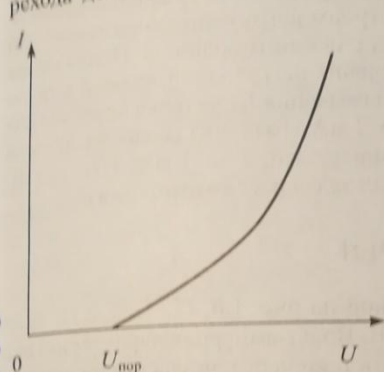


Рис. 1.2. Вольт-амперная характеристика кремниевого диода

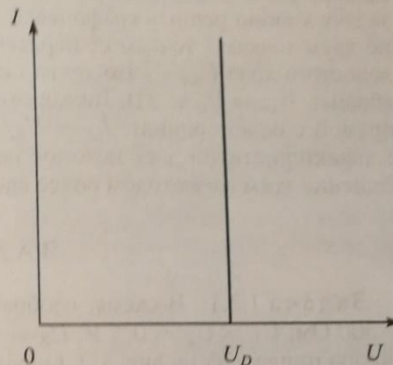


Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика идеального ключа

напряжений в реальных схемах с диодами. Поэтому на практике пользуются графоаналитическим методом решения задач. При этом используют реальные характеристики диодов, например приведенные в справочниках. Суть этого метода поясним на простом примере.

Пример. Определить ток, текущий в схеме, представленной на рис. 1.4. Известна ВАХ диода (рис. 1.5),  $U_n = 2$  В,  $R = 1$  кОм.

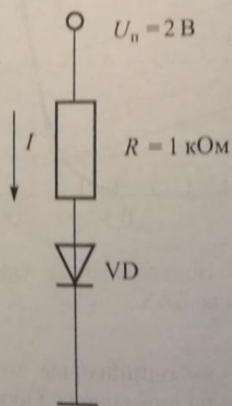


Рис. 1.4. Схема включения диода

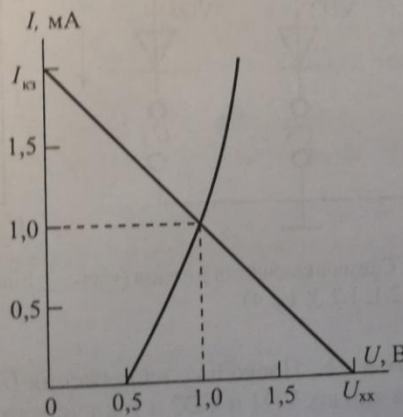


Рис. 1.5. Иллюстрация графического метода определения тока через диод и напряжения на нем

Для решения запишем 2-ой закон Кирхгофа для цепи (рис. 1.4):

$$U_n = IR + U_D, \tag{1.20}$$

Библиотека  
КГЭУ

где  $U_D$  — падение напряжения на диоде.

Это уравнение содержит две неизвестные величины:  $I$  и  $U_D$ . Чтобы их определить, нужно еще одно уравнение. Его роль выполняет ВАХ диода, дающая связь между  $I$  и  $U_D$ . Учтя, что (1.20) — это уравнение прямой, задачу удобно решить графически. Построим нагрузочную прямую (1.20) по двум точкам (точкам ее пересечения с осями координат). Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  — это точка пересечения нагрузочной прямой с осью абсцисс;  $U_{xx} = U_n = 2$  В. Ток короткого замыкания  $I_{кз}$  — точка пересечения прямой с осью ординат;  $I_{кз} = U_n/R = 2$  мА. Точка пересечения прямой с характеристикой дает искомое решение задачи:  $I = 1$  мА;  $U_D = 1$  В. Решение этим же методом более сложных задач рассмотрено ниже.

### ЗАДАЧИ

Задача 1.2.1. В схеме, изображенной на рис. 1.6,  $U_n = 2,2$  В;  $R = 500$  Ом;  $U_1 = U_2 = 0,2$  В;  $U_3 = 1,2$  В. Вольт-амперная характеристика диодов приведена на рис. 1.7. Определить токи через диоды и напряжение на выходе  $U_{вых}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{диф}$  и сопротивление по постоянному току  $R_n$ .

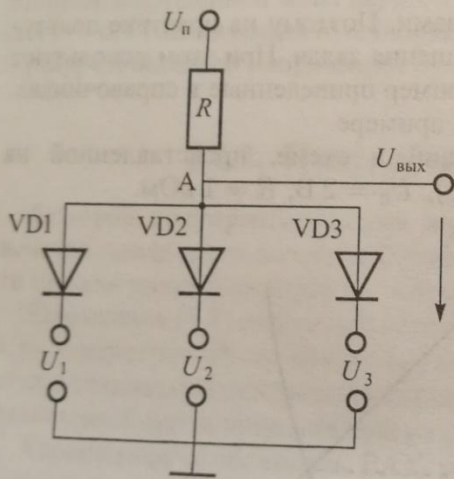


Рис. 1.6 Схема включения диодов (к задачам 1.2.1, 1.2.3, 1.2.4)

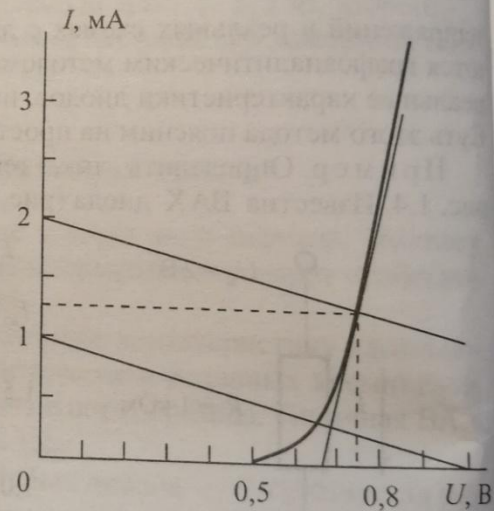


Рис. 1.7. Вольт-амперная характеристика диода ВАХ

Решение. Поскольку напряжения  $U_1$  и  $U_2$  — одинаковые, то напряжения на диодах VD1 и VD2 и токи через эти диоды одинаковы. Обозначим их через  $U_D$  и  $I_D$  соответственно. Предположим, что диод VD3 открыт, т. е. ток через этот диод отличен от нуля. Из рис. 1.7 видно, что это возможно, если потенциал точки А (рис. 1.6) превышает величину  $U = U_3 + U_{пор} = 1,2 + 0,5 = 1,7$  В. Здесь через  $U_{пор}$  обозначено пороговое напряжение диода, отвечающее границе «зоны умолчания» на вольт-амперной характеристике. Если это так, то напряжение на диодах VD1 и VD2 окажется

равным 1  
нии задач  
Ток  $I$  че  
вен удво  
Кирхгоф

Урав  
бы их о  
рое ура  
предста  
прямую  
но опре  
Положи  
 $U_{xx}$  (на

Пол  
мой с о

Пос  
постро  
прямой  
 $U = 1$   
(токов  
прямую  
прямая  
От  
в пло  
строе  
По  
ток че  
 $= 1,2$   
На  
Д  
нем р  
С

ч  
касат  
ник,  
Отно  
Пол

равным  $1,7 - 0,2 = 1,5$  В, что противоречит рис. 1.7. Поэтому при решении задачи будем считать, что диод VD3 закрыт, т. е. ток через него не течет. Ток  $I$  через сопротивление  $R$  в соответствии с 1-м законом Кирхгофа равен удвоенному току через открытый диод:  $I = 2I_D$ . Согласно 2-му закону Кирхгофа

$$U_n = U_1 + U_D + 2I_D R. \quad (1.21)$$

Уравнение (1.21) содержит две неизвестные величины:  $U_D$  и  $I_D$ . Чтобы их определить, необходимо еще одно уравнение, в данном случае второе уравнение задано графически в виде ВАХ диода. Уравнение (1.21) представляет собой уравнение нагрузочной прямой. Чтобы построить эту прямую в плоскости вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода, нужно определить точки пересечения этой характеристики с осями координат. Положив  $I_D = 0$ , получим точку пересечения прямой с осью напряжений  $U_{xx}$  (напряжение холостого хода):

$$U_{xx} = U_n - U_1 = 2,2 - 0,2 = 2 \text{ В.}$$

Положив далее  $U_D = 0$ , получим точку пересечения нагрузочной прямой с осью ординат —  $I_{кз}$  (ток короткого замыкания):

$$I_{кз} = \frac{U_n - U_1}{2R} = \frac{(2,2 - 0,2) \text{ В}}{2 \cdot 0,5 \text{ кОм}} = 2 \text{ мА.}$$

Поскольку значение  $U_{xx} = 2$  В не помещается на графике рис. 1.7, построим сначала вспомогательную прямую, параллельную нагрузочной прямой. Пусть вспомогательная прямая пересекает ось напряжений в точке  $U = 1$  В, т. е.  $U = U_{xx}/2$ ; тогда эта прямая должна пересечь ось ординат (токов) в точке  $I = I_{кз}/2 = 2 \text{ мА}/2 = 1 \text{ мА}$ . Проведем вспомогательную прямую через точки (0; 1 мА) и (1 В; 0) на графике рис. 1.7. Нагрузочная прямая пройдет через точку (0; 2 мА) параллельно вспомогательной.

Отметим, что прямая (1.21), вообще говоря, может быть построена в плоскости ( $U$ ,  $I$ ) по любым двум точкам; описанный выше способ построения этой прямой — один из возможных.

По точке пересечения нагрузочной прямой и ВАХ диода определяется ток через открытые диоды  $I_D$  и напряжение на этих диодах  $U_D$ :  $I_D = 1,25$  мА;  $U_D = 0,75$  В.

$$\text{Напряжение } U_{\text{вых}} = U_1 + U_D = U_n - 2I_D R = 0,2 + 0,75 = 0,95 \text{ В.}$$

Диод VD3 в этом случае закрыт, как и полагалось ранее; напряжение на нем равно  $U_{\text{вых}} - U_3 = 0,95 - 1,2 = -0,25$  В.

Сопротивление постоянному току  $R_n$  равно

$$R_n = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0,75 \text{ В}}{1,25 \text{ мА}} = 600 \text{ Ом.}$$

Чтобы определить дифференциальное сопротивление, нужно провести касательную к ВАХ в рабочей точке и построить прямоугольный треугольник, гипотенуза которого — часть касательной, а катеты параллельны осям. Отношение катетов  $\Delta U/\Delta I$  равно дифференциальному сопротивлению. Пользуясь построением на рис. 1.7, определим:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,1 \text{ В}}{1,25 \text{ мА}} = 80 \text{ Ом.}$$

Ответ:  $I_{VD1} = I_{VD2} = 1,25 \text{ mA}$ ;  $I_{VD3} = 0$ ;  $U_{\text{вых}} = 0,95 \text{ В}$ ;  $R_{\text{диф}} = 80 \text{ Ом}$ ;  $R_{\text{п}} = 600 \text{ Ом}$ .

Задача 1.2.2. В схеме, изображенной на рис. 1.8,  $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$ ;  $R = 1,6 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ . Определить ток через диоды и напряжение на каждом диоде. Определить дифференциальное сопротивление по постоянному току  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рис. 1.7.

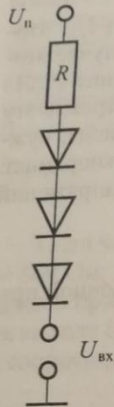


Рис. 1.8. Схема включения диодов (к задаче 1.2.2)

Задача 1.2.3. В схеме, изображенной на рис. 1.6,  $U_{\text{п}} = 6,2 \text{ В}$ ;  $R = 2 \text{ кОм}$ ;  $U_1 = U_2 = U_3 = 0,2 \text{ В}$ . Определить токи через диоды и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рис. 1.7.

Задача 1.2.4. В схеме, изображенной на рис. 1.6,  $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$ ;  $R = 2 \text{ кОм}$ ;  $U_1 = 0,5 \text{ В}$ ;  $U_2 = U_3 = 3 \text{ В}$ . Определить токи через диоды и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рис. 1.7.

Задача 1.2.5. В схеме, изображенной на рис. 1.9,  $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$ ;  $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$ . Определить токи через диоды, напряжение на диодах и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рис. 1.7.

Решение. Согласно законам Кирхгофа токи и напряжения (рис. 1.9), связаны уравнениями

$$2I_D + I_2 = I_1,$$

$$I_2 R_2 = U_D + U_{\text{вх}},$$

$$U_{\text{п}} = I_1 R_1 + U_D + U_{\text{вх}}.$$

Исключая токи  $I_1$  и  $I_2$ , получим уравнение нагрузочной прямой в виде

$$U_{\text{п}} = 2I_D R_1 + U_D \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + U_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right).$$

Полагая  $I_D = 0$ , получим  $U_{\text{хх}} = 1,5 \text{ В}$ ; полагая далее  $U_D = 0$ , получим  $I_{\text{кз}} = 1,5 \text{ mA}$ . После построения нагрузочной прямой находим графическое решение:  $U_D = 0,7 \text{ В}$ ;  $I_D = 0,8 \text{ mA}$ . Далее, используя приведенные выше уравнения, можно найти все токи и напряжения в схеме:  $I_2 = 1,7 \text{ mA}$ ;  $I_1 = 3,3 \text{ mA}$ ;  $U_{\text{вых}} = 1,7 \text{ В}$ . Сопротивление диода по постоянному току и дифференциальное сопротивление определяются аналогично задаче 1.2.1.

Ответ:  $U_D$   
 $U_{\text{вых}} = 1,7 \text{ В}$ ;  $R_{\text{п}}$

Задача 1.2.  
 $= 2 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 1$

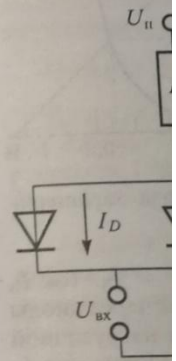


Рис. 1.9. Сх (к задаче 1.2.5)

и напряжени  
 $R_{\text{диф}}$  и сопро  
стика диодов

Задача  
на рис. 1.11.  
стика приве  
 $U_{\text{вх}} = 2,4 \text{ В}$

Решен  
каким он пр

Допуст  
от нуля ток  
 $U_{\text{вх}} + U_{\text{пор}}$

Здесь  $U$   
Однако, по  
 $3U_{\text{пор}} = 1$   
При откр  
в диапазон  
диоды VD

Ответ:  $U_D = 0,7 \text{ В}$ ;  $I_D = 0,8 \text{ мА}$ ;  $I_1 = 3,3 \text{ мА}$ ;  $I_2 = 1,7 \text{ мА}$ ;  $U_{\text{вых}} = 1,7 \text{ В}$ ;  $R_{\text{н}} = 875 \text{ Ом}$ ;  $R_{\text{диф}} \approx 100 \text{ Ом}$ .

Задача 1.2.6. В схеме, изображенной на рис. 1.10,  $U_{\text{п}} = 6 \text{ В}$ ;  $R_1 = 2 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ . Определить токи через диоды, напряжение на диодах

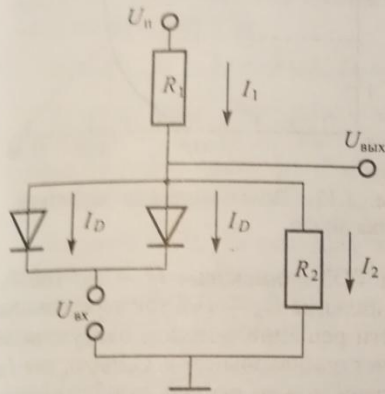


Рис. 1.9. Схема включения диодов (к задаче 1.2.5)

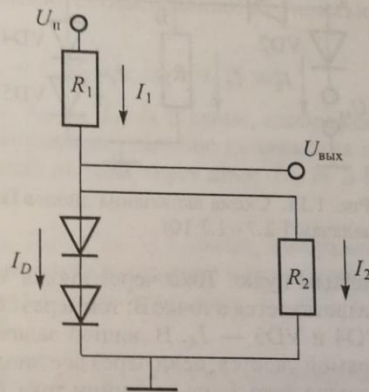


Рис. 1.10. Схема включения диодов (к задаче 1.2.6)

и напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рис. 1.7.

Задача 1.2.7. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.11. Диоды VD1 – VD5 одинаковые, их вольт-амперная характеристика приведена на рис. 1.12.  $U_{\text{п}} = 4,2 \text{ В}$ ;  $R_1 = 0,6 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 2,4 \text{ В}$ .

Решение. Сначала определим, по каким ветвям протекает ток, а по каким он протекать не может. Для этого оценим потенциал в точке А.

Допустим, что ток  $I_2 \neq 0$ , т. е. через левую ветвь протекает отличный от нуля ток. В этом случае потенциал точки А должен быть не менее, чем  $U_{\text{вх}} + U_{\text{пор}} = 2,4 + 0,5 = 2,9 \text{ В}$ .

Здесь  $U_{\text{пор}}$  — пороговое напряжение включения диода, равное  $0,5 \text{ В}$ . Однако, потенциал  $2,9 \text{ В}$  в точке А установиться не может, т. к. напряжения  $3U_{\text{пор}} = 1,5 \text{ В}$  будет достаточно, чтобы открыть диоды VD3, VD4 и VD5. При открытых диодах VD3 – VD5 значение напряжения в точке А лежит в диапазоне от  $1,5 \text{ В}$  до  $3 \times 0,8 = 2,4 \text{ В}$ . Таким образом следует ожидать, что диоды VD3 – VD5 будут открыты, а диод VD2 — закрыт, и ток  $I_2$  окажется



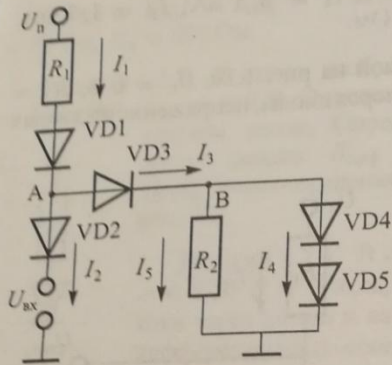


Рис. 1.11. Схема включения диодов (к задачам 1.2.7–1.2.10)

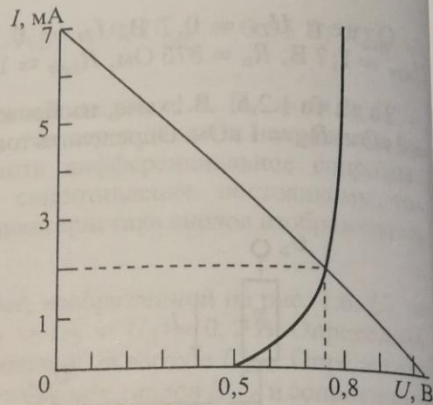


Рис. 1.12. Вольт-амперная характеристика диода

равным нулю. Токи через диоды VD1 и VD3 одинаковы:  $I_1 = I_3$ . Ток  $I_3$  разветвляется в точке В: ток через сопротивление  $R_2$  —  $I_5$  и ток через диоды VD4 и VD5 —  $I_4$ . В данной задаче найти решение методом нагрузочной прямой удастся, если через все диоды течет одинаковый ток. Однако, ток  $I_3$  больше тока  $I_4$  на величину тока  $I_5$ . Задачу можно решить приближенно, если  $I_5 \ll I_3$ . Оценим эти токи. Потенциал точки В при открытых диодах VD4, VD5 может принимать значения от  $2U_{пор} = 1$  В до  $2 \times 0,8 = 1,6$  В. Следовательно,  $I_5$  не превышает величины  $(1,6 \text{ В} / R_2) = 0,16$  мА. С другой стороны, ток  $I_1$  (и равный ему  $I_3$ ) не могут быть меньше значения

$$I_{1 \min} = \frac{U_n - U_{A \max} - U_{D \text{VD1 max}}}{R_1} = \frac{4,2 - 2,4 - 0,8}{0,6} = 1,67 \text{ мА.}$$

Поскольку  $I_{1 \min} \gg I_{5 \max}$ , можно сделать вывод, что при решении задачи графоаналитическим методом током  $I_5$  можно пренебречь, и считать, что через диоды VD1, VD3, VD4 и VD5 течет одинаковый ток  $I_1$  и, следовательно, падение напряжения на этих диодах тоже одинаково. Считая  $I_4 = I_1$ , запишем уравнение Кирхгофа для цепи  $U_n - R_1 - \text{VD1} - \text{VD3} - \text{VD4} - \text{VD5} - \perp$ :

$$U_n = 4U_D + I_1 R_1.$$

Последнее уравнение представляет собой уравнение нагрузочной прямой. Находим напряжение холостого хода  $U_{xx}$  и ток короткого замыкания  $I_{кз}$ :

$$U_{xx} = \frac{U_n}{4} = 1,05 \text{ В,}$$

$$I_{кз} = \frac{U_n}{R_1} = 7 \text{ мА.}$$

Нагрузочная прямая (см. рис. 1.12) пересекает ВАХ диода в точке  $I_1 = 2$  мА,  $U_D = 0,75$  В. Таким образом,  $I_1 = I_3 = 2$  мА. Потенциалы точек А и В равны соответственно  $U_A = 3 \times 0,75 = 2,25$  В;  $U_B = 2 \times 0,75 = 1,5$  В.

Ток  $I_5$  через уточнить:

Полученные итераций, окончательные значения амперные характеристики не превышать

Ответ:

Задача 1.11 на рис. 1.11. Открытом диоде  $R_1 = 1 \text{ кОм}$

Задача 1.12 на рис. 1.12. Открытом диоде  $R_1 = 2 \text{ кОм}$

Задача 1.13 на рис. 1.13. Накальные, их характеристика привода  $R_1 = 2 \text{ кОм}$

Задача 1.14 на рис. 1.14. Открытом диоде VD1 — VD5  $R_1 = 1 \text{ кОм}$   $= 1,6 \text{ В.}$

Решение  $I_2 \neq 0$ . Ток ветвления  $+2U_D =$   $I_5 \neq 0$ . В каждой разветвлении  $= 3,2 \text{ В.}$  можно сделать вывод, что потенциал точки В ниже 3,2 В.  $U_n - R_1$   $= 3,2 \text{ В.}$

Ток  $I_5$  через сопротивление  $R_2$  равен  $1,5 / 10 = 0,15$  мА. Ток  $I_4$  теперь можно уточнить:

$$I_4 = I_3 - I_5 = 2 - 0,15 = 1,85 \text{ мА.}$$

Полученное решение — приближенное, его можно уточнить методом итераций, однако в этом нет необходимости, т.к. в реальных схемах номинальные значения сопротивлений, напряжений источников питания и вольт-амперные характеристики диодов определяются (как правило) с точностью, не превышающей 5%.

Ответ:  $I_1 = I_3 = 2$  мА;  $I_2 = 0$ ;  $I_4 = 1,85$  мА;  $I_5 = 0,15$  мА.

Задача 1.2.8. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.11. Диоды VD1–VD5 одинаковые, падение напряжения на открытом диоде равно 0,8 В и не зависит от тока через диод.  $U_n = 5$  В;  $R_1 = 1$  кОм;  $R_2 = 0,2$  кОм;  $U_{вх} = 0,2$  В.

Задача 1.2.9. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.11. Диоды VD1–VD5 одинаковые, падение напряжения на открытом диоде равно 0,8 В и не зависит от тока через диод.  $U_n = 5,8$  В;  $R_1 = 2$  кОм;  $R_2 = 100$  Ом;  $U_{вх} = 0,4$  В.

Задача 1.2.10. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.11. Диоды VD1–VD5 одинаковые, их вольт-амперная характеристика приведена на рис. 1.7.  $U_n = 6$  В;  $R_1 = 2$  кОм;  $R_2 = 20$  кОм;  $U_{вх} = 3$  В.

Задача 1.2.11. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.13, если падение напряжения на открытом диоде равно 0,8 В. Диоды VD1–VD6 одинаковые.  $U_n = 5$  В;  $R_1 = 1$  кОм;  $R_2 = 0,6$  кОм;  $U_{вх} = 1,6$  В.

Решение. Предположим, что ток  $I_2 \neq 0$ . Тогда потенциал в точке разветвления будет равен  $U_A = U_{вх} + 2U_D = 3,2$  В. Предположим, что ток  $I_5 \neq 0$ . В этом случае потенциал точки разветвления равен  $U_A = 4U_D = 3,2$  В. На основании этих оценок

можно сделать вывод, что либо потенциал точки А действительно равен 3,2 В и тогда открыты все ветви (все токи отличны от нуля), либо в действительности потенциал  $U_A$  окажется ниже 3,2 В, что означает, что ток течет по одной единственной ветви:  $U_n - R_1 - VD3 - VD4 - R_2 - \perp$ . Чтобы выяснить, какой из этих случаев реализуется, оценим токи через сопротивления в предположении, что

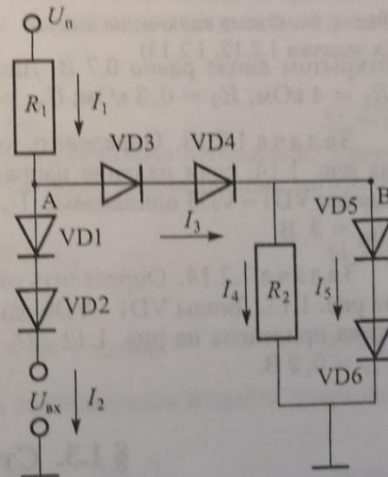


Рис. 1.13. Схема включения диодов (к задачам 1.2.11, 1.2.14)

8 U, В  
рактири-

. Ток  $I_3$   
з диоды  
узочной  
о, ток  $I_3$   
иженно,  
диолах  
= 1,6 В.  
другой

нии за-  
считать,  
и, сле-  
Считая  
VD3 -

рямой.  
ния  $I_{кз}$ :

$I_1 =$   
чек А  
1,5 В.

$U_A = 3,2 \text{ В}$ :

$$I_1 = \frac{U_n - U_A}{R_1} = \frac{1,8 \text{ В}}{1 \text{ кОм}} = 1,8 \text{ мА},$$

$$I_4 = \frac{U_n}{R_2} = \frac{1,6 \text{ В}}{0,6 \text{ кОм}} = 2,67 \text{ мА}.$$

Однако согласно схеме, изображенной на рис. 1.13, ток  $I_4$  не может быть больше тока  $I_1$ . Это противоречит первому закону Кирхгофа для узлов А и В. Отсюда можно сделать вывод, что предположение о том, что  $U_A = 3,2 \text{ В}$ , неверно. На самом деле потенциал точки А окажется ниже  $3,2 \text{ В}$ , что означает, что  $I_2 = I_5 = 0$ . Далее запишем второй закон Кирхгофа для контура  $U_n - R_1 - \text{VD3} - \text{VD4} - R_2 - \dots$

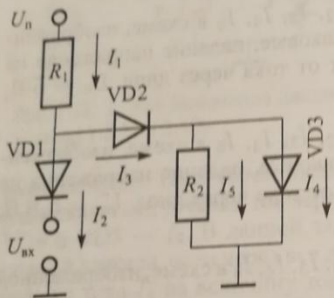


Рис. 1.14. Схема включения диодов (к задачам 1.2.12, 1.2.13) открытым диоде равно  $0,7 \text{ В}$ . Диоды  $\text{VD1} - \text{VD3}$  одинаковые.  $U_n = 5 \text{ В}$ ;  $R_1 = 4 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 0,3 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 0,7 \text{ В}$ .

Задача 1.2.13. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.14, если падение напряжения на открытом диоде равно  $0,7 \text{ В}$ . Диоды  $\text{VD1} - \text{VD3}$  одинаковые.  $U_n = 5 \text{ В}$ ;  $R_1 = 1,2 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 0,35 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 3 \text{ В}$ .

Задача 1.2.14. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рис. 1.13. Диоды  $\text{VD1} - \text{VD6}$  одинаковые, их вольт-амперная характеристика приведена на рис. 1.12.  $U_n = 5 \text{ В}$ ;  $R_1 = 1,2 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ .

### § 1.3. Стабилитроны

Стабилитрон служит для стабилизации напряжения. Его действие основано на использовании электрического пробоя в p-n переходе при обратных напряжениях.

Напряжение стабилитрона в рабочем режиме слабо зависит от тока, что является основой применения этих приборов. Зависимость напряжения от тока характеризуется дифференциальным сопротивлением стабилитрона

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{dU_{\text{ст}}}{dI_{\text{ст}}}$$

Оно составляет несколько вольт. Схема включения стабилитрона представлена соответствующим образом.

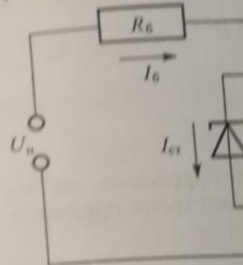


Рис. 1.15. Простейшая схема стабилизации напряжения

параллельно нагрузке включают ограничитель тока, который должен быть выбран так, чтобы ток через стабилитрон не превышал допустимый.

Рассмотрим рис. 1.14, если падение напряжения на нагрузке  $\Delta U_n$ , если  $\Delta U_n$ .

Токи в схеме свя

Учитывая, что  $I_{\text{ст}}$  — это ток через стабилитрон, то согласно закону Ома

или

Для того, чтобы  $I_{\text{ст}}$  в уравнении (1.3.1)

откуда

Задача 1.3.1. В схеме, изображенной на рис. 1.15,  $R_n = 1 \text{ кОм}$ ; ди

Оно составляет несколько десятков и даже единиц Ом.  
 Схема включения стабилитрона и его вольт-амперная характеристика представлены соответственно на рис. 1.15. и 1.16. Стабилитрон включают

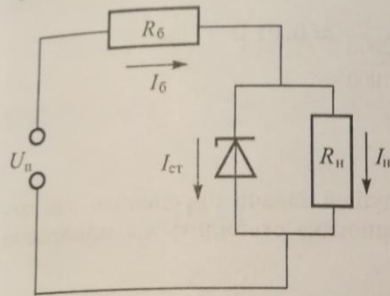


Рис. 1.15. Простейшая схема стабилизации напряжения

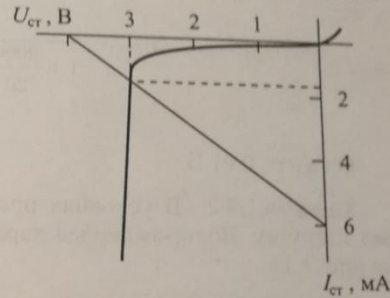


Рис. 1.16. Вольт-амперная характеристика стабилитрона (к задаче 1.3.2)

параллельно нагрузке  $R_n$ . Последовательно с этим параллельным участком включают ограничительный («балластный») резистор  $R_6$ , сопротивление которого должно быть значительно больше дифференциального сопротивления стабилитрона.

Рассмотрим рис. 1.15 и вычислим точность стабилизации напряжения на нагрузке  $\Delta U_n$ , если известна точность стабилизации напряжения питания  $\Delta U_p$ .

Токи в схеме связаны соотношением:

$$I_6 = I_n + I_{ст}. \quad (1.22)$$

Учитывая, что  $U_n = U_{ст}$ , выражение (1.22) можно переписать, выразив токи через балластное сопротивление и через сопротивление нагрузки согласно закону Ома:

$$\frac{U_p - U_{ст}}{R_6} = \frac{U_{ст}}{R_n} + I_{ст} \quad (1.23)$$

или

$$U_p = U_{ст} \left( \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_6} \right) R_6 + I_{ст} R_6. \quad (1.24)$$

Для того, чтобы вычислить точность стабилизации, возьмем приращения в уравнении (1.24):

$$\Delta U_p = \Delta U_{ст} + R_6 \left( \frac{\Delta U_{ст}}{r_d} + \frac{\Delta U_{ст}}{R_n} \right), \quad (1.25)$$

откуда

$$\Delta U_{ст} = \frac{\Delta U_p}{1 + R_6/r_d + R_6/R_n}. \quad (1.26)$$

Задача 1.3.1. Определить точность стабилизации напряжения  $\Delta U_{ст}$  в схеме, изображенной на рис. 1.15, если:  $U_p = 12 \text{ В} \pm 1 \text{ В}$ ;  $R_6 = 2 \text{ кОм}$ ;  $R_n = 1 \text{ кОм}$ ; дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_d = 20 \text{ Ом}$ .

Решение. Подставляя численные значения в формулу (1.26), получим:

$$\Delta U_{\text{ст}} = \frac{1}{1 + \frac{2000}{20} + \frac{2000}{1000}} \approx 0,01 \text{ В.}$$

Ответ: 0,01 В.

Задача 1.3.2. В условиях предыдущей задачи определить ток через нагрузку. Вольт-амперная характеристика стабилитрона приведена на рис. 1.16.

Решение. Прежде чем определять ток через нагрузку, определим ток через стабилитрон. Проще всего сделать это графически, построив нагрузочную прямую. Из уравнения (1.24) следует, что

$$I_{\text{кз}} (U_{\text{ст}} = 0) = \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{б}}}, \quad (1.27)$$

$$U_{\text{хх}} (I_{\text{ст}} = 0) = \frac{U_{\text{п}} R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{б}}}. \quad (1.28)$$

Из рисунка 1.16 следует, что ток стабилитрона  $I_{\text{ст}} = 1,5 \text{ мА}$ , напряжение  $U_{\text{ст}} = 3 \text{ В}$ . Тогда ток через балластное сопротивление равен

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{ст}}}{R_{\text{б}}} = \frac{12 - 3}{2} = 4,5 \text{ мА},$$

а ток через нагрузку  $I_{\text{н}} = I_{\text{б}} - I_{\text{ст}} = 3 \text{ мА}$ .

Ответ: 3 мА.

Задача 1.3.3. Определить ток через нагрузку и относительную точность стабилизации  $\Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст}}$  в схеме рис. 1.15.  $U_{\text{п}} = 20 \text{ В} \pm 2 \text{ В}$ ,  $R_{\text{б}} = R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ , дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{\text{д}} = 20 \text{ Ом}$ . Вольт-амперная характеристика стабилитрона представлена на рис. 1.17.

Задача 1.3.4. Определить сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  и балластное сопротивление  $R_{\text{б}}$  в схеме на рис. 1.15, если известна ВАХ стабилитрона (рис. 1.17). Нагрузочная прямая задана в плоскости  $(U_{\text{ст}}, I_{\text{ст}})$  координатами  $[8 \text{ В}, 20 \text{ мА}]$ , как показано на рис. 1.17. Напряжение питания  $U_{\text{п}} = 10 \text{ В}$ .

Решение. Воспользуемся выражениями (1.27) и (1.28). Из выражения (1.27) определяем балластное сопротивление  $R_6$ :

$$R_6 = \frac{U_{\text{п}}}{I_{\text{кз}}} = \frac{10}{20} = 0,5 \text{ кОм},$$

из (1.28) — сопротивление нагрузки:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{хх}} R_6}{U_{\text{п}} - U_{\text{хх}}} = 2 \text{ кОм}.$$

Ответ:  $R_6 = 0,5 \text{ кОм}$ ;  
 $R_{\text{н}} = 2 \text{ кОм}$ .

Задача 1.3.5. В условии предыдущей задачи известно сопротивление  $R_6 = 1 \text{ кОм}$ . Определить  $U_{\text{п}}$  и  $R_{\text{н}}$ .

Задача 1.3.6. Нагрузочная прямая на ВАХ стабилитрона имеет координаты [20 В, 30 мА]. Определить  $U_{\text{п}}$  и  $R_6$ , если  $R_{\text{н}} = 2 \text{ кОм}$ .

Задача 1.3.7. Нагрузочная прямая на ВАХ стабилитрона имеет координаты [20 В, 25 мА]. Определить  $R_{\text{н}}$  и  $R_6$ , если  $U_{\text{п}} = 25 \text{ В}$ .

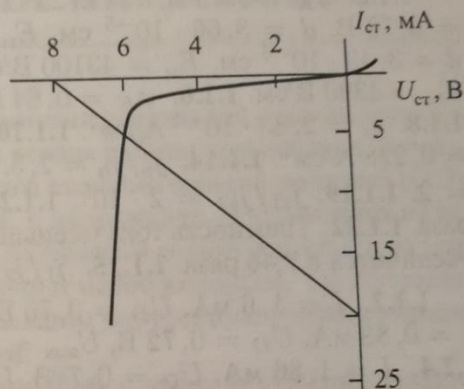


Рис. 1.17. Вольт-амперная характеристика стабилитрона (к задачам 1.3.3–1.3.5)

(1.27)

(1.28)

ожение