

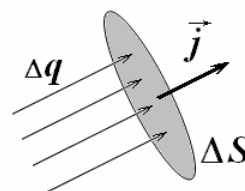
## Условие

### Задание 3. Полупроводник.

В данном задании вам предстоит теоретически описать электрическую проводимость чистого (без примесей) полупроводника и ее зависимость от температуры и освещенности. Рассматриваемые ниже явления находят широчайшее применение в современных электронных приборах, в частности терморезисторах и фоторезисторах. В качестве примера полупроводника используется кристаллический кремний (с-Si), модель его кристаллической решетки показана на рисунке. Для численных расчетов используются характеристики именно этого вещества. В задаче используются традиционные обозначения, принятые в физике полупроводников.

#### 1. Введение – напоминание.

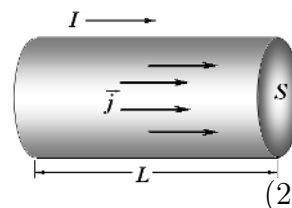
Для описания протекания электрического тока внутри вещества удобно пользоваться такой характеристикой, как плотность электрического тока  $\vec{j}$ . Плотность тока определяется как количество электрического заряда, протекающего через площадку единичной площади, перпендикулярной направлению движения зарядов в единицу времени (или как сила электрического тока, протекающего через площадку единичной площади):



$$j = \frac{\Delta q}{\Delta S \cdot \Delta t} = \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (1)$$

Плотность тока является векторной величиной, ее направление совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

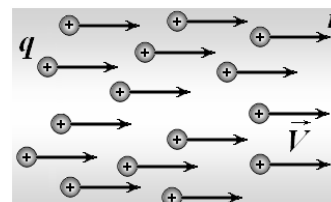
**1.1** Пусть электрический ток равномерно протекает вдоль однородного цилиндра. Используя закон Ома для участка цепи, покажите, что плотность электрического тока внутри цилиндра рассчитывается по формуле



$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

где  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля внутри цилиндра,  $\sigma$  - удельная проводимость материала цилиндра (величина обратная удельному электрическому сопротивлению  $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ).

**1.2** Пусть одинаковые частицы (заряд каждой равен  $q$ ) движутся с одинаковыми скоростями  $\vec{v}$ . Концентрация частиц в потоке равна  $n$ . Чему равна плотность электрического тока в данном потоке частиц?



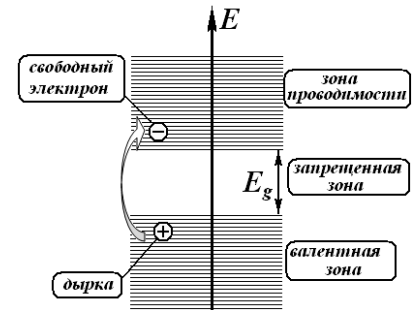
**1.3** Покажите, что средняя скорость направленного движения электронов в металле при протекании постоянного электрического тока пропорциональна напряженности электрического поля в металле

$$\langle v \rangle = \mu E. \quad (3)$$

где коэффициент пропорциональности  $\mu$  называется *подвижностью* электронов. Выразите удельную проводимость металла через подвижность электронов и их концентрацию в металле.

## 2. Терморезистор.

Энергетические состояния электронов в кристалле состоят из нескольких зон. Верхняя заполненная зона называется валентной зоной, а следующая за ней зона возможных состояний – зоной проводимости. Между ними располагается запрещенная зона – электроны в кристалле не могут иметь такие значения энергии! Разность энергий между верхним краем валентной зоны и нижним краем зоны проводимости называется шириной запрещенной зоны и обозначается  $E_g$ .



Электроны, находящиеся в валентной зоне, «привязаны» к своим атомам и не могут перемещаться по кристаллу, следовательно, не могут быть носителями электрического тока. Электроны, находящиеся в зоне проводимости являются свободными, поэтому служат носителями электрического тока.

В рассматриваемом кристаллическом кремнии при температуре абсолютного нуля все электроны находятся в валентной зоне, зона проводимости пуста, поэтому в этом состоянии полупроводник является изолятором. При повышении температуры вследствие теплового движения некоторые электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости. В этом случае в зоне проводимости появляется свободный электрон, а в валентной зоне дырка. Скорость генерации  $G_T$  электронно-дырочных пар (число рождающихся в единице объема в единицу времени электронно-дырочных пар) в заданном полупроводнике зависит только от температуры.

Таким образом, носителями электрического тока в полупроводниках являются свободные электроны и дырки. Причем дырки можно рассматривать как частицы с положительным зарядом равным элементарному заряду. Концентрация свободных электронов в полупроводнике обозначается  $n_i$ , концентрация дырок  $p_i$ . Однако в чистом полупроводнике (таком, как рассматривается в данной задаче) концентрации электронов и дырок одинаковы, поэтому используйте единое обозначение для их концентрации  $n_i = p_i = n$ . Возможен и процесс, обратный рождению электронно-дырочной пары – электрон может перейти из зоны проводимости в валентную зону, при этом пара электрон-дырка исчезает. Такой процесс называется рекомбинацией. Очевидно, что скорость рекомбинации  $R$  (число исчезающих в единице объема в единицу времени электронно-дырочных пар) пропорциональна произведению концентраций электронов и дырок.

При постоянной температуре полупроводника устанавливается динамическое равновесие – среднее число рождающихся электронно-дырочных пар становится равным числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации:  $G_T = R$ .

Концентрация свободных электронов в этом случае называется равновесной концентрацией, ее обозначим  $\bar{n}$ . Равновесная концентрация свободных электронов зависит только от абсолютной температуры  $T$  и определяется формулой

$$\bar{n}(T) = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (4)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  $A$  - постоянная для данного вещества величина;  $\exp(x) = e^x$  - экспоненциальная функция.

**2.1** Используя физические характеристики кристаллического кремния, вычислите его удельную электрическую проводимость при комнатной температуре  $\sigma_0$ .

**2.2** При малом изменении температуры  $\Delta T$  можно считать, что проводимость кремния изменяется по линейному закону

$$\sigma = \sigma_0(1 + \gamma\Delta T). \quad (5)$$

Рассчитайте температурный коэффициент проводимости  $\gamma$  для кристаллического кремния при комнатной температуре. Изменением подвижностей электронов и дырок при изменении температуры можно пренебречь.

### 3. Фоторезистор.

Электроны могут переходить в зону проводимости и при поглощении кванта света, в этом случае также образуется пара носителей тока «свободный электрон – дырка». Это явление называется внутренним фотоэффектом. На этом принципе работают полупроводниковые приборы для измерения интенсивности света (в том числе инфракрасного диапазона) – фоторезисторы.

Если энергия фотона превышает энергетическую ширину запрещенной зоны, то он может поглотиться, в некоторых случаях поглощения фотона образуется электронно-дырочная пара. Отношение числа рожденных пар к числу поглощенных фотонов называется квантовым выходом фотоэффекта (обозначим эту величину  $\eta$ ).

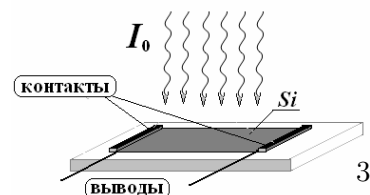
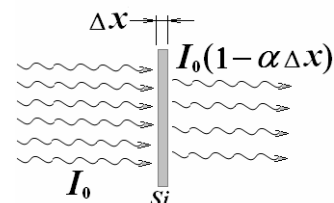
Поглощение света характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ . Величина  $\alpha\Delta x$  (при  $\alpha\Delta x \ll 1$ ) равна отношению числа фотонов, поглощенных в тонком слое вещества толщиной  $\Delta x$ , к числу фотонов падающих на этот слой.

Для кристаллического кремния зависимость коэффициента поглощения от частоты падающего света описывается приближенной формулой

$$\alpha(\nu) = B(h\nu - E_g)^2, \quad (6)$$

где  $h\nu$  - энергия фотона (в электрон-вольтах),  $B = 3,9 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-2}$  - эмпирическая постоянная.

Фоторезистор представляет собой тонкий кристаллический кремниевый слой. К краям слоя подведены металлические токопроводящие контакты с внешними выводами. Пластина полностью



освещается светом, падающим на нее нормально сверху. Толщина полупроводникового слоя  $h$  достаточно мала, так что в рассматриваемом далее спектральном диапазоне выполняется условие  $\alpha h \ll 1$ . Температуру пластинки с полупроводниковым слоем можно считать постоянной и равной комнатной.

**3.1.1** Вычислите длину волны красной границы фотоэффекта  $\lambda_{кр.}$ .

**3.1.2** Для упрощения дальнейших расчетов выразите коэффициент поглощения кремния как функцию от величины  $\lambda/\lambda_{кр.}$  (где  $\lambda$  - длина волны падающего света):  $\alpha = F(\lambda/\lambda_{кр.})$ .

**3.1.3** Вычислите скорость генерации электронно-дырочных пар посредством фотоэффекта  $G_r$ . Выразите данную величину через характеристики падающего света (длину волны  $\lambda$ , интенсивность  $I_0$  - энергию, падающую в единицу времени на площадку единичной площади) и необходимые вам характеристики кремния, приведенные в справочной таблице.

**3.2.1** Запишите уравнение, описывающее скорость изменения концентрации свободных электронов  $\frac{\Delta n}{\Delta t}$  в полупроводнике, освещаемом светом. Учтите, что электронно-дырочные пары появляются не только под действием теплового движения, но и вследствие фотоэффекта.

**3.2.2** Пусть в результате кратковременного светового импульса концентрация свободных электронов превысила термодинамическую равновесную концентрацию  $\bar{n}$  на малую величину  $n_1$  (то есть  $n = \bar{n} + n_1$ , причём  $\bar{n} \gg n_1$ ). Покажите, что изменение этого отклонения  $\Delta n_1$  за малый промежуток времени  $\Delta t$  подчиняется уравнению

$$\Delta n_1 = -\frac{n_1}{\tau} \Delta t, \quad (7)$$

где  $\tau$  - некоторая постоянная, называемая временем жизни электронно-дырочной пары (ее численное значение для кристаллического кремния приведено в Справочной таблице).

**3.2.3** Выразите скорость тепловой генерации  $G_T$  и скорость рекомбинации  $R$  через концентрацию носителей тока и известные параметры кремния, приведенные в Справочной таблице.

**3.2.4** Пусть фоторезистор непрерывно освещается светом, в этом случае концентрация носителей достигает некоторого стационарного значения. Найдите отношение этой концентрации к равновесной концентрации  $\frac{n}{\bar{n}}$ , как функцию длины волны (лучше  $\lambda/\lambda_{кр.}$ ) и интенсивности падающего излучения  $I_0$ .

**3.3 Измерение интенсивности света.** Фоторезистор подключают к источнику постоянного напряжения и измеряют силу тока через него. При отсутствии освещения сила тока в цепи равна  $i_0$  (темновой ток).

**3.3.1** Найдите зависимость силы тока в цепи от характеристик падающего излучения (длины волны и интенсивности).

**3.3.2** Постройте примерный график зависимости отношения силы тока в цепи к темновому току  $i/i_0$  от интенсивности падающего света (в диапазоне от нуля до  $0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ ) с длиной волны  $\lambda = 0,90\lambda_{кр.}$ .

**3.3.3.** Постройте примерный график зависимости  $i/i_0$  от длины волны падающего света в диапазоне от  $\lambda_1 = 0,8\text{мкм}$  до  $\lambda_2 = 1,1\text{мкм}$ . Считайте, что интенсивность падающего излучения постоянна и равна  $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ .

### Справочная таблица.

|                                                                         |                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Комнатная температура                                                   | $T_0 = 300\text{K}$                                                          |
| Заряд электрона                                                         | $e = 1,60 \cdot 10^{-19}\text{Кл}$                                           |
| Скорость света в вакууме                                                | $c = 3,00 \cdot 10^8\text{м/с}$                                              |
| Постоянная Больцмана                                                    | $k = 1,38 \cdot 10^{-23}\text{Дж} \cdot \text{K}^{-1}$                       |
| Постоянная Планка                                                       | $h = 6,63 \cdot 10^{-34}\text{Дж} \cdot \text{с}$                            |
| <b>Характеристики кристаллического кремния</b>                          |                                                                              |
| Ширина запрещенной зоны                                                 | $E_g = 1,12\text{эВ}$                                                        |
| Равновесная концентрация свободных электронов при комнатной температуре | $\bar{n} = 1,0 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$                                  |
| Подвижность свободных электронов                                        | $\mu_n = 1,4 \cdot 10^3\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  |
| Подвижность дырок                                                       | $\mu_p = 0,45 \cdot 10^3\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ |
| Квантовый выход внутреннего фотоэффекта                                 | $\eta = 0,10$                                                                |
| Время жизни электронно-дырочной пары                                    | $\tau = 3,0 \cdot 10^{-3}\text{с}$                                           |

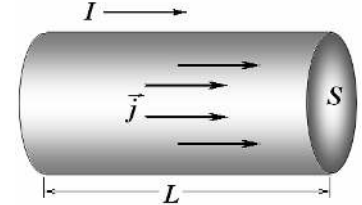
## Решение

### Задание 3. Полупроводник.

1.1 По закону Ома для участка цепи сила тока равна

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

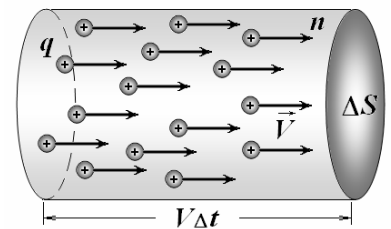
Подставляя известные формулы: - сопротивления проводника  $R = \rho \frac{L}{S}$ ; - связи напряжения и напряженности  $U = EL$ ; - связи силы и плотности тока  $I = jS$



в уравнение (1), получим  $jS = \frac{EL}{\rho \frac{L}{S}}$ , откуда следует, что  $j = \frac{1}{\rho}E = \sigma E$ . Очевидно, что направление движения заряженных частиц совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля, поэтому

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (2)$$

1.2 За время  $\Delta t$  площадку площадью  $\Delta S$ , расположенную перпендикулярно векторам скоростей частиц, пересекут частицы, находящиеся от площадки на расстоянии  $v\Delta t$ . Объем области, опирающейся на выделенную площадку, частицы в котором пересекут площадку равен  $\Delta V = v\Delta t \cdot \Delta S$ , число частиц в нем  $N = n\Delta V = nv\Delta t \cdot \Delta S$ , они переносят заряд  $\Delta Q = qN = qnv\Delta t \cdot \Delta S$ . По определению плотности тока, получим



$$j = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S} = qnv. \quad (3)$$

**1.3** Приравнявая выражения для плотности тока (2) и (3), получим

$$env = \sigma E. \quad (4)$$

Из этой формулы выразим среднюю скорость движения частиц  $v = \frac{\sigma}{en} E$ . Сравнивая это выражение с определением подвижности  $\langle v \rangle = \mu E$ , находим, что проводимость металла находится по формуле

$$\sigma = en\mu. \quad (5)$$

**2.1** Для вычисления удельной проводимости полупроводника необходимо учесть, что ток обусловлен движением как свободных электронов, так и дырок. Не смотря на то, что электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, электрические токи, обусловленные их движением, направлены в одну сторону (в сторону движения положительно заряженных дырок). С помощью формулы (5) находим

$$\sigma_0 = e(n_i\mu_n + p_i\mu_p) = e\bar{n}(\mu_n + \mu_p). \quad (6)$$

При подстановке численных значений из Таблицы справочных материалов их необходимо перевести в единицы системы СИ:

$$\begin{aligned} \sigma_0 = e\bar{n}(\mu_n + \mu_p) &= 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,0 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} (1,4 \cdot 10^3 + 0,45 \cdot 10^3) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \approx (7) \\ &\approx 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \end{aligned}$$

**2.2** Из приведенной в условии формулы

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \gamma \Delta T)$$

Следует, что температурный коэффициент равен

$$\gamma = \frac{1}{\sigma_0} \frac{\Delta \sigma}{\Delta T},$$

При малых изменениях температуры отношение приращений следует заменить соответствующей производной<sup>1</sup>  $\gamma = \frac{1}{\sigma_0} \frac{\Delta \sigma}{\Delta T} = \frac{\sigma'}{\sigma_0}$ .

При повышении температуры увеличивается концентрация носителей тока, что и приводит к увеличению проводимости. Так проводимость пропорциональна концентрации носителей, то

$$\frac{1}{\sigma_0} \frac{\Delta \sigma}{\Delta T} = \frac{\sigma'}{\sigma_0} = \frac{1}{\bar{n}} \frac{\Delta \bar{n}}{\Delta T} = \frac{\bar{n}'}{\bar{n}}. \quad (8)$$

Выражение для равновесной концентрации приведено в условии задачи. Указанное отношение проще вычислить с помощью известного математического приема (хотя можно пользоваться и простыми правилами вычисления производных):

$$\bar{n} = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \Rightarrow \ln \bar{n} = \ln A + \frac{3}{2} \ln T - \frac{E_g}{kT} \Rightarrow$$

$$\frac{\bar{n}'}{\bar{n}} = \frac{3}{2} \frac{1}{T} + \frac{E_g}{kT^2} = \frac{1}{T} \left( \frac{3}{2} + \frac{E_g}{kT} \right) \quad (9)$$

При расчетах необходимо правильно перевести электрон-вольты в джоули с помощью соотношения  $E_g [\text{Дж}] = eE_g [\text{эВ}]$ :

$$\gamma = \frac{1}{T} \left( \frac{3}{2} + \frac{E_g}{kT} \right) = \frac{1}{300\text{K}} \left( \frac{3}{2} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,12}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) \approx 0,15 \text{ K}^{-1}. \quad (10)$$

**3.1.1** Красной границе фотоэффекта соответствуют фотоны, энергия которых равна ширине энергетической зоны

$$h\nu_{\text{кр.}} = E_g. \quad (11)$$

Расчет длины волны не представляет труда  $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 0,3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} = E_g \Rightarrow \lambda = \approx 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,1 \text{ мкм}$   
(12)  $\lambda_{\text{кр.}} = 190 \text{ нм} = 0,19 \text{ мкм}$

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{кр.}}} = E_g \Rightarrow \lambda_{\text{кр.}} = \frac{hc}{E_g} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,12 \text{ эВ}} \approx 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,0 \text{ мкм} \quad (12)$$

**3.1.2** Преобразуем выражение для коэффициента поглощения к виду, удобному для дальнейших расчетов:

<sup>1</sup> Для тех, кто не знаком с производными: можно также воспользоваться приближенными формулами для расчета изменения функций.

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^2 = BE_g^2 \left( \frac{hc}{E_g \lambda} - 1 \right)^2 = b \left( \frac{\lambda_{\text{кр.}}}{\lambda} - 1 \right)^2, \quad (13)$$

Здесь  $b = BE_g^2 = 3,9 \cdot 10^3 \frac{\text{сМ}^{-1}}{\text{эВ}^2} (1,12 \text{ эВ})^2 = 4,9 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$  - постоянная величина;  $\lambda_{\text{кр.}} = 1,0 \text{ мкм}$  - длина волны красной границы фотоэффекта.

**3.1.3** В единицу времени на пластинку падает  $\frac{I_0}{h\nu} S$  фотонов ( $S$  - площадь поверхности), из них  $\frac{I_0}{h\nu} S \cdot \alpha h$  поглощается, что приводит к появлению  $\frac{I_0}{h\nu} S \cdot \alpha h \cdot \eta$  электронно-дырочных пар. Следовательно, в единицу объема в единицу времени появляется  $G_r = \frac{1}{V} \left( \frac{I_0}{h\nu} S h \alpha \eta \right) = \frac{I_0 \lambda}{hc} \alpha \eta$  пар электронов (это есть скорость генерации).

**3.2.1** Концентрация электронов в проводнике изменяется в ходе генерации и регенерации, поэтому уравнение изменения концентрации может быть записано в виде

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = G_T + G_r - R \quad (14)$$

**3.2.2** При отсутствии освещения скорость изменения концентрации носителей тока можно представить в форме уравнения

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = G_T - R, \quad (15)$$

Представим концентрации носителей тока в виде  $n = \bar{n} + n_1$ . Скорость рекомбинации пропорциональна квадрату концентрации свободных электронов, поэтому запишем  $R = rn^2 = r(\bar{n} + n_1)^2$ , где  $r$  - некоторый коэффициент пропорциональности. Теперь уравнение (11) принимает вид

$$\frac{\Delta(\bar{n} + n_1)}{\Delta t} = G_T - r(\bar{n} + n_1)^2 = G_T - r\bar{n}^2 - 2r\bar{n} \cdot n_1 - rn_1^2. \quad (16)$$

При  $\bar{n} \gg n_1$  можно пренебречь слагаемым пропорциональным  $n_1^2$ . Кроме того, равновесная концентрация носителей удовлетворяет условию  $G_T = r\bar{n}^2$ . Таким образом, уравнение (12) приобретает требуемый вид

$$\frac{\Delta n_1}{\Delta t} = -2r\bar{n} \cdot n_1. \quad (17)$$

Введенный коэффициент рекомбинации выражается через время жизни электронно-дырочной пары

$$2r\bar{n} = \frac{1}{\tau} \Rightarrow r = \frac{1}{2\bar{n}\tau}. \quad (18)$$

Таким образом, скорость тепловой генерации выражается формулой

$$G_T = r\bar{n}^2 = \frac{1}{2\tau}\bar{n}, \quad (19)$$

а скорость рекомбинации

$$R = rn^2 = \frac{n^2}{2\bar{n}\tau}. \quad (20)$$

**3.2.4** В стационарном режиме концентрация свободных электронов не изменяется, следовательно, в этом случае выполняется соотношение

$$G_T + G_r - R = 0. \quad (21)$$

Подставим в это уравнение полученные ранее выражения для скоростей потоков и коэффициента поглощения

$$\frac{1}{2\tau}\bar{n} + \frac{I_0\lambda}{hc}\alpha\eta - \frac{n^2}{2\bar{n}\tau} = 0.$$

Из этого уравнения получаем

$$\frac{n^2}{\bar{n}^2} = 1 + 2\frac{I_0\lambda}{hc\bar{n}}\alpha\eta\tau = 1 + 2\frac{I_0\lambda}{hc\bar{n}}\eta\tau b \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2.$$

Для упрощения расчетов перепишем данное выражение в виде

$$\begin{aligned} \frac{n^2}{\bar{n}^2} &= 1 + 2\frac{I_0\lambda}{hc\bar{n}}\eta\tau b \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2 = \\ &= 1 + 2\frac{I_{00}\lambda_{кр.}}{hc\bar{n}}\eta\tau b \frac{I_0}{I_{00}} \frac{\lambda}{\lambda_{кр.}} \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2 = 1 + W \frac{I_0}{I_{00}} \frac{\lambda}{\lambda_{кр.}} \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2 \end{aligned} \quad (22)$$

где в одном безразмерном коэффициенте объединились все параметры кремния

$$\begin{aligned} W &= 2\frac{I_{00}\lambda_{кр.}}{hc\bar{n}}\eta\tau b = 2\frac{10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,0 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}} 0,1 \cdot 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot 4,9 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1} = \\ &= 1,5 \cdot 10^9 \end{aligned}$$

(здесь  $I_{00} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} = 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  - единица измерения интенсивности). Окончательно получаем искомую формулу

$$\frac{n}{\bar{n}} = \sqrt{1 + W \frac{I_0}{I_{00}} \frac{\lambda}{\lambda_{кр.}} \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2}. \quad (23)$$

**3.3.1** Сила тока через фоторезистор при постоянном напряжении на нем пропорциональна проводимости фоторезистора, которая в свою очередь пропорциональна концентрации носителей тока. Следовательно, формула (19) также описывает изменение силы тока

$$\frac{i}{i_0} = \sqrt{1 + W \frac{I_0}{I_{00}} \frac{\lambda}{\lambda_{кр.}} \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2}. \quad (24)$$

**3.3.2** Подставляя значение длины волны в выражение (20), вычислим значение коэффициента при интенсивности

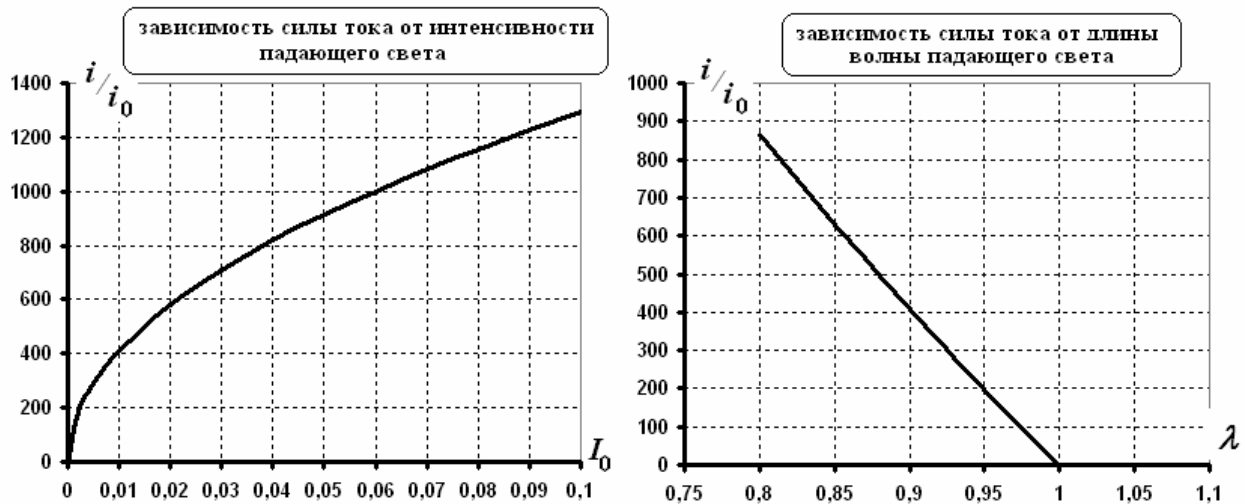
$$W \frac{\lambda}{\lambda_{кр.}} \left(\frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1\right)^2 = 1,5 \cdot 10^9 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{1}{0,9} - 1\right)^2 \approx 1,67 \cdot 10^7.$$

Такое большое значение этого коэффициента позволяет пренебречь 1 под корнем, то есть сила тока пропорциональна корню квадратному из интенсивности падающего света. График этой зависимости показан на рисунке.

**3.3.3** В данном случае требуется построить график функции

$$\frac{i}{i_0} = \sqrt{1 + 1,5 \cdot 10^7 \frac{\lambda}{\lambda_{кр.}} \left( \frac{\lambda_{кр.}}{\lambda} - 1 \right)^2}. \quad (25)$$

При построении следует учесть, что при  $\lambda > \lambda_{кр.}$  фотоэффект отсутствует, поэтому в этой



области  $i = i_0$ . При  $\lambda < \lambda_{кр.}$  искомая зависимость практически линейна (см. рисунок).