

3.1

1. Дать определение теплового излучения.

Тепловым излучением называют электромагнитное излучение, испускаемое телами за счет их внутренней энергии (энергии теплового движения их атомов и молекул).

2. Дать определение излучательной способности. От чего зависит эта величина?

Излучательная способность тела $r_{\nu,T}$ (спектральная излучательная способность тела) – спектральная характеристика теплового излучения, равная

$$r_{\nu,T} = \frac{d\Phi_{\nu}}{dS d\nu}, \quad (1)$$

где $d\Phi_{\nu}$ – поток электромагнитной энергии, излучаемый элементом поверхности тела площадью dS в узком интервале частот от ν до $\nu + d\nu$.
В СИ $[r_{\nu,T}] = \text{Дж}/\text{м}^2$.

Излучательная способность тела зависит от частоты излучения, температуры этого тела, его химического состава и состояния излучающей поверхности.

3. Дать определение энергетической светимости.

Энергетическая светимость тела R (интегральная излучательная способность тела) – поток энергии электромагнитных волн всех частот, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям:

4. Дать определение поглощательной способности. От чего зависит эта величина?

Поглощательная способность тела показывает, какая доля потока электромагнитной энергии, падающего на единицу площади поверхности тела в узком интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, им поглощается.

Поглощательная способность любого реального тела, зависит от частоты излучения, температуры этого тела, его химического состава, состояния поверхности.

5. Дать определение абсолютно черного тела.

Абсолютно черным телом называется тело, которое при любой температуре T полностью поглощает все падающее на него излучение.

6. Сформулировать теорему Кирхгофа.

Закон (теорема) Кирхгофа: отношение излучательной способности $r_{\nu,T}$ тела к его поглотительной способности $a_{\nu,T}$ не зависит от природы, геометрической формы и свойств тела, а является *одинаковой* для всех тел (т. е. *универсальной*) функцией частоты ν и температуры T :

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = f(\nu, T), \quad (4)$$

где $f(\nu, T)$ – универсальная функция Кирхгофа.

7. Сформулировать закон Стефана – Больцмана.

Закон Стефана – Больцмана (1879 г. и 1884 г.): энергетическая светимость R абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры T :

8. Сформулировать закон смещения Вина.

Закон смещения Вина (1893 г.): при повышении температуры T абсолютно черного тела максимум его излучательной способности (спектральной плотности излучения) смещается в сторону коротких длин волн так, что выполняется соотношение

$$\lambda_m \cdot T = b = \text{const}, \quad (9)$$

где λ_m – длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности; $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

9. В чем заключается гипотеза Планка. Записать закон излучения (формулу) Планка для равновесного теплового излучения.

В 1900 г. Макс Планк теоретически получил вид функции $f(\nu, T)$ ($\varphi(\lambda, T)$), хорошо согласующийся с экспериментальными данными. Для этого ему пришлось ввести гипотезу, коренным образом противоречащую классическим представлениям, а именно: допустить, что электромагнитное излучение испускается не непрерывно, а в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых пропорциональна частоте ν излучения:

$$\varepsilon_0 = h\nu,$$

где коэффициент $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ впоследствии получил название постоянной Планка.

Закон излучения (формула) Планка:

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1} \quad \text{или} \\ \varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(kT\lambda)} - 1}, \quad (7)$$

где $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана.

1. Дать определение внешнего фотоэффекта.

Внешний фотоэффект (*фотоэлектронная эмиссия*) – явление испускания электронов с поверхности твердых или жидких тел под действием электромагнитного излучения (света).

2. Сформулировать основные закономерности внешнего фотоэффекта.

Экспериментально были установлены следующие *основные закономерности внешнего фотоэффекта*:

1. Сила тока насыщения I_n (количество вырываемых фотоэлектронов в единицу времени) прямо пропорционально интенсивности падающего излучения (световому потоку Φ) и не зависит от его частоты ν (рис. 3, а и б).

2. Величина задерживающего напряжения U_3 (максимальная кинетическая энергия W_{\max}^k фотоэлектронов) прямо пропорциональна частоте ν падающего излучения и не зависит от его интенсивности (светового потока) (рис. 3, а и б).

3. Для каждого вещества существует своя наименьшая частота $\nu_{\text{кр}}$ (соответствующая ей наибольшая длина волны $\lambda_{\text{кр}}$), называемая *красной границей фотоэффекта*, при которой фотоэффект еще возможен.

4. Фотоэффект практически безинерционен, т. е. в интервале до 10^{-10} с запаздывание появления фототока (фотоэлектронов) после начала освещения катода не обнаруживается.

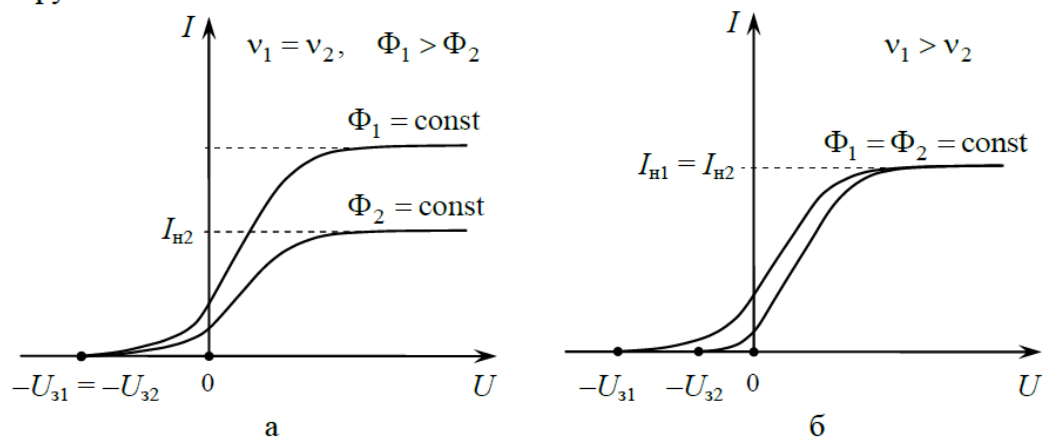


Рис. 3

3. В чем заключается гипотеза Эйнштейна? Объяснить с квантовой точки зрения возникновение внешнего фотоэффекта.

В 1905 г. А. Эйнштейн, развивая идеи Планка о дискретном характере испускания веществом электромагнитного излучения, выдвинул гипотезу о том, что и поглощение света веществом также происходит отдельными порциями – квантами (позже названных фотонами), энергия ε каждого из которых равна

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (или $\hbar = h/(2\pi)$) – постоянная Планка; ν , ω и λ – частота, циклическая частота и длина волны монохроматического света соответственно.

С квантовой точки зрения внешний фотоэффект возникает в результате неупругого столкновения одного фотона с одним электроном (ограничимся рассмотрением однофотонного процесса). При таком столкновении фотон поглощается, а вся его энергия передается электрону.

4. Записать уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

При единичном акте поглощения электроном вещества одного фотона с энергией ε можно записать закон сохранения энергии в виде (уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта):

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} + W_{\text{max}}^k, \quad (2)$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода; W_{max}^k – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

5. Дать определение работы выхода.

Работа выхода $A_{\text{вых}}$ – это минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону для его освобождения из вещества в вакуум. Она зависит от рода вещества.

6. Получить соотношение между работой выхода и красной границей фотоэффекта.

Из уравнения Эйнштейна (2) следует, что минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ (и соответствующая ей максимальная длина волны $\lambda_{\text{кр}}$) света, при которой еще возможен фотоэффект, связана с работой выхода $A_{\text{вых}}$:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}, \quad (3)$$

что объясняет отличия ее значений для разных веществ.

7. Получить соотношение между задерживающим напряжением и максимальной кинетической энергией фотоэлектронов.

$$: W_{\text{max}}^k = e \cdot U_{\text{з}}.$$

8. На основе квантовой гипотезы Эйнштейна дать объяснение основных закономерностей внешнего фотоэффекта.

3.5

1. Какие предположения сделаны при исследовании особенностей движения электронов в кристаллах.

2. Какие волновые функции описывают свободные электроны?

Волновые функции свободных электронов для стационарных состояний имеют вид пространственной части плоской волны $\psi(\vec{r}) = Ae^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}$ с амплитудой A и волновым вектором \vec{k} . Тогда векторная величина $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ называется импульсом электрона, а его энергия равна: $E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m}(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$.

3. Какие значения принимает модуль волнового вектора свободного электрона и почему?

В приближении свободных электронов роль кристаллической решетки без ионов сводится к удержанию электронов внутри кристалла, который можно представить в виде куба с ребром $L = |\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = |\vec{a}_3|$. Решая стационарное уравнение Шредингера

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0,$$

при условии периодичности волновой функции, получаем, что как модуль волнового вектора принимает дискретные значения $k^2 = n^2 \frac{\pi^2}{L^2}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, так и величина энергии электрона принимает дискретный ряд значений:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right) n^2,$$

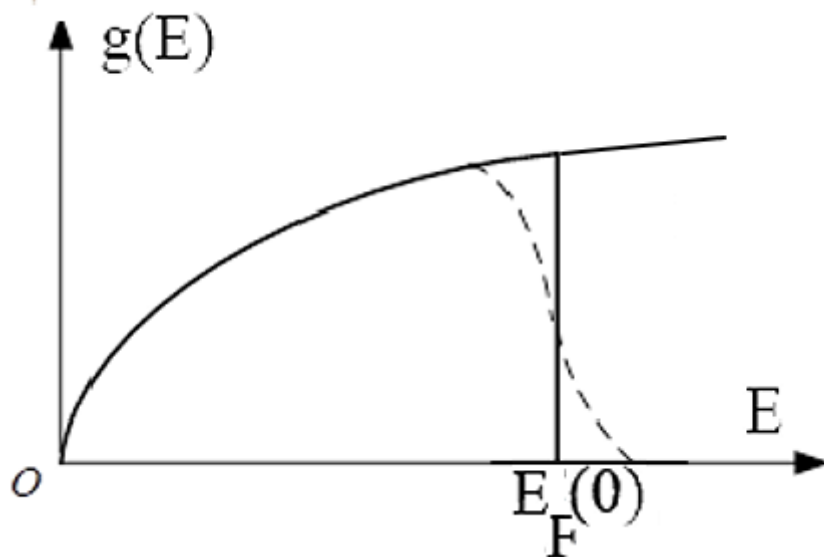
4. Сформулируйте принцип Паули.

В квантовой системе не может быть более одной частицы в каждом квантовом состоянии, которое характеризуется одной совокупностью квантовых чисел.

5. Объясните, почему уровни энергии свободного электрона являются вырожденными.

Одному и тому же значению суммы $n^2 = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2$ соответствует несколько возможных комбинаций чисел n_1, n_2, n_3 . Следовательно, определенному значению энергии электрона соответствует, несколько возможных состояний. Иначе говоря, уровни энергии свободного электрона являются вырожденными. Например, если

6. Дайте определение функции плотности состояний. Постройте ее график. Плотностью состояний называется количество разрешенных состояний в единице объема кристалла, приходящихся на единичный энергетический интервал. Пусть dv_E – число электронных состояний в интервале энергий от E до $E + dE$, то функцией плотности состояний называется следующая величина $g(E) = \frac{dv_E}{dE}$, определяющая число состояний, приходящееся на единичный интервал энергии. Можно

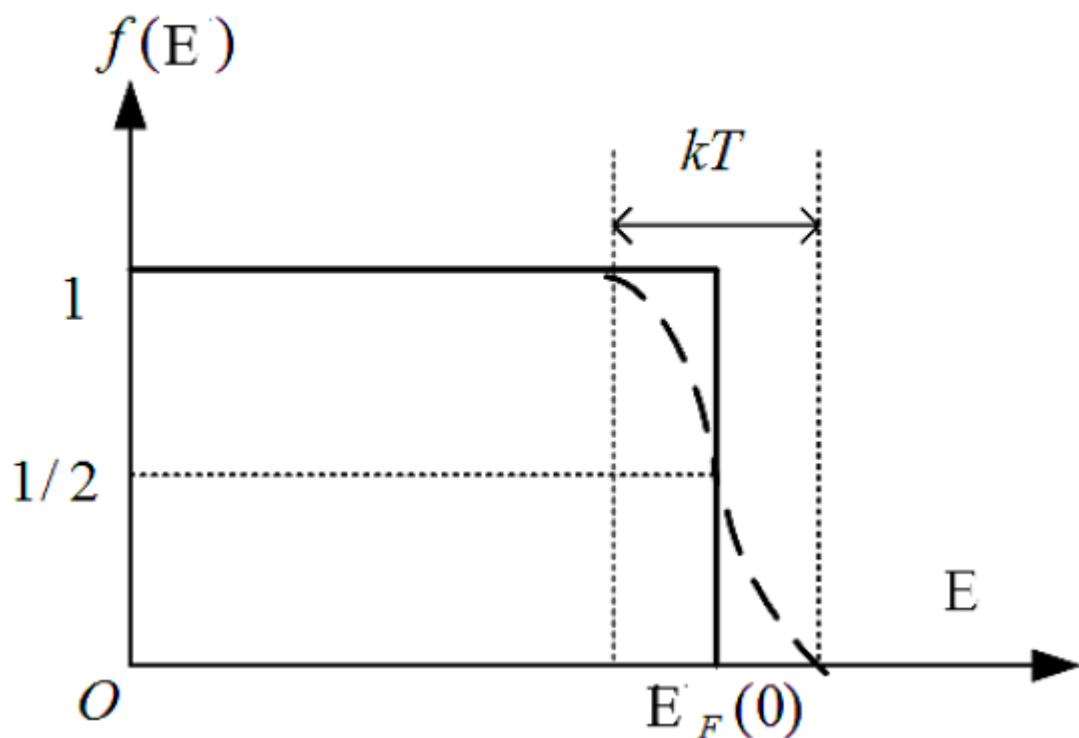


7. Дайте определение закону распределения Ферми – Дирака. Что такое уровень Ферми.

Показывает, какую часть от общего числа свободных электронов составляют электроны с заданной энергией E

Уровень Ферми – энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 0,5 при температурах, отличных от температуры абсолютного нуля

8. Дайте объяснение графику функции Ферми – Дирака.



9. Каким свойством обладает потенциальная энергия электрона в кристалле?
Свойством периодичности

10. Запишите выражение для стационарного уравнения Шредингера в периодической решетке и для волновой функции электрона.

$U(x) = U(x + na)$. Решение стационарного уравнения Шредингера для этого случая дает волновую функцию следующего вида: $\psi(x) = e^{ikx} u_k(x)$. В приближении свобод-

тор $(\vec{k} \cdot \vec{a}_n - \text{скалярное произведение векторов})$. В итоге волновая функция электрона в поле кристаллической решетки имеет следующий вид: $\psi(\vec{r}) = e^{i\vec{k} \cdot \vec{a}_n} u_{\vec{k}}(\vec{r})$ – функция Блоха, где $u_{\vec{k}}(\vec{r}) = u_{\vec{k}}(\vec{r} + \vec{a}_n)$ – некоторая периодическая функция.

11. Какую особенность имеет график энергии электрона в кристалле?

На графике $E(k)$ в промежутке между R и A нет ни одного собственного значения энергии электрона, т.е. область между R и A представляет собой *запрещенную* для электронов *зону* энергии шириной ΔE .

12. Дайте определение зоны Бриллюэна.

БРИЛЛЮЭНА ЗОНА - ячейка обратной решетки кристалла, содержащая все трансляционно-неэквивалентные точки.

13. Что такое эффективная масса электрона в кристалле, какие она принимает значения?

Это знакопеременная величина, что связано с кривизной линии графика $E(k)$: ее величина положительна в нижней части зоны вблизи дна (точка A), и отрицательна в верхней, вблизи потолка зоны (точка B).

14. Дайте классификацию энергетических зон в кристалле.

В этом случае верхняя полностью заполненная зона называется *валентной* (V -зона), а следующая за ней пустая зона разрешенных энергий называется *зоной проводимости* (C -зона). Промежуток запрещенных энергий, который разделяет валентную зону и зону проводимости называется *запрещенной зоной*.

15. Как описывается кваномеханический процесс движения и рассеяния электронов в металле?

В рамках квантово-механической теории движение электронов в металле можно рассматривать как распространение их дебройлевских волн. Чем ниже температура и совершеннее кристалл, тем меньше рассеяние волн, тем ниже его электрическое сопротивление.

16. Запишите и объясните квантовое выражение для удельной электропроводности в металлах.

Способность тела пропускать электрический ток под действием электрического поля.

Расчет, основанный на квантовой статистике Ферми-Дирака, приводит к выражению: $\sigma_{\kappa s} = \frac{ne^2 \langle \lambda_F \rangle}{m^* \langle v_F \rangle}$, вид которого совпадает с классическим, однако по-

другому определяются величины $\langle \lambda \rangle$, $\langle v \rangle$, m . Здесь m^* – эффективная масса электрона, $\langle v_F \rangle$ – скорость теплового движения электрона с энергией Ферми, слабо зависящая от температуры, n – концентрация электронов с энергиями вблизи уровня Ферми.

17. Какие электроны участвуют в обеспечении электропроводности в собственном полупроводнике?

18. С какой статистической характеристикой связана величина концентрации носителей в полупроводнике?

С температурой

19. Запишите выражение для величины концентрации электронов вблизи дна зоны проводимости. Объясните его происхождение.

потолок валентной зоны. Тогда, в соответствии с распределением Больцмана концентрация электронов вблизи дна зоны *проводимости* задаётся выражением $n_e(E_c) = n_0 \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$.

20. Какие основные предположения сделаны для получения формулы для температурной зависимости сопротивления собственного полупроводника

1. Объясните принцип формирования энергетических зон в кристалле.

Согласно зонной теории твердого тела, когда атомы объединяются в кристалл, энергетические уровни атома расщепляются на ряд близко расположенных уровней. В случае объединения большого числа атомов эти энергетические уровни образуют почти непрерывные *зоны* разрешенной энергии, которую может иметь электрон в кристалле. Ширина зон зависит от расстояния между атомами. Именно эти энергетические зоны определяют электрические свойства твердого тела.

2. Перечислите характерные зоны в кристалле и дайте им определения.

Валентная зона – это область разрешённых значений энергий, заполненная валентными электронами атомов твердого тела. Энергетический интервал, непосредственно примыкающий к валентной зоне сверху, называется **запрещенной зоной**, потому что электроны не могут существовать в кристалле с такими энергиями. Зона разрешенных энергетических состояний, непосредственно выше запрещенной зоны, называется **зоной проводимости (свободной зоной)**. В полупроводниках при температуре 0 К зона проводимости полностью свободна.

3. Сформулируйте принцип Паули

Принцип Паули: *в одном и том же квантовом состоянии может находиться не более одной частицы с определенным набором квантовых чисел.*

4. Что такое функция распределения $f(E)$? Определите уровень Ферми.

Функция распределения $f(E)$ определяет отношение концентрации электронов $n_0(E)$, занимающих энергетический уровень E в равновесном состоянии при температуре T , к их максимальной концентрации $n_{\max}(E)$, на данном уровне. Аналитическое выражение функции распределения электронов, имеет вид

$$f(E) = \left(\exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right)^{-1},$$

где параметр E_F – уровень Ферми.

Уровнем Ферми E_F называется такой энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 0,5 и не зависит от величины температуры.

5. Какими видами электропроводности обладают полупроводники?

Таким образом, полупроводники обладают двумя видами электропроводности: *электронной*, обусловленной движением свободных электронов в зоне проводимости (*n*-тип), и *дырочной*, обусловленной движением дырок в валентной зоне (*p*-тип).

6. Какие носители заряда называются неравновесными?

Электроны или дырки проводимости (свободные носители заряда), не находящиеся в термодинамическом равновесии (как по концентрации, так и по энергетическому распределению), называются **неравновесными** носителями заряда.

7. Какова подвижность неравновесных носителей заряда?

Однако, в результате взаимодействия с фононами и дефектами кристаллической решетки энергия неравновесных носителей заряда за время около $10^{-10} - 10^{-12}$ с приобретает такое же распределение по энергиям, как и равновесные носители. В результате, подвижность неравновесных носителей заряда не будет отличаться от подвижности равновесных носителей.

8. Как может быть получена величина концентрации равновесных носителей заряда?

Если считать, что электроны находятся в зоне проводимости, то единицей в знаменателе функции распределения Ферми можно пренебречь. В этом случае происходит переход к величине концентрации равновесных носителей заряда в виде функции распределения Больцмана:

$$n_0 = n_{\max} \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right).$$

9. Запишите и объясните выражение для проводимости полупроводника со всеми типами носителей.

Возникновение неравновесных носителей заряда приводит к изменению проводимости полупроводника:

$$\sigma = \sigma_T + \Delta\sigma = e(n_0 \cdot \mu_n + p_0 \cdot \mu_p) + e(\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p), \quad (4)$$

где σ_T – темновая проводимость (в отсутствие освещенности); $\Delta\sigma$ – неравновесная проводимость (фотопроводимость):

$$\Delta\sigma = e(\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p), \quad (5)$$

где μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно.

10. Что такое внутренний фотоэффект?

Изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное исключительно действием электромагнитного излучения и не связанное с его нагреванием, называется **фоторезистивным эффектом**, или **внутренним фотоэффектом**.

11. По какой причине происходит изменение подвижности свободных носителей зарядов при поглощении ими света?

Однако при поглощении света свободными носителями заряда изменение их подвижности может иметь место в результате следующих причин:

- 1) перехода дырок из одной зоны в другую;
- 2) перехода электронов из одной зоны в другую;
- 3) повышения уровня энергии электронов вследствие рекомбинационного излучения.

12. Как изменяется понятие уровня Ферми для неравновесных состояний носителей.

при увеличении концентрации дырок он должен опускаться вниз. Выход состоит в том, чтобы обобщить соотношения статистики на неравновесные состояния и вместо единого уровня Ферми формально ввести квази-уровень Ферми E_{Fn} для электронов и отдельный квази-уровень Ферми для дырок E_{Fp} . Тогда уже через квази-уровни Ферми соотношения для неравновесных концентраций, например, электронов будут иметь такой же вид, как и в случае равновесия:

$$n = n_i \exp\left(-\frac{E - E_{Fn}}{kT}\right).$$

Здесь n_i – собственная концентрация, как параметр полупроводникового материала, при данной температуре зависит только от ширины запрещённой зоны полупроводника ΔE .

13. Дайте определение основных характеристик фоторезистора.

Квантовым выходом, рассчитанным на поглощённый световой поток, называется отношение числа неравновесных носителей заряда к числу поглощенных квантов света: $\beta = \Delta n / N$.

Вольтамперная характеристика фотосопротивления имеет линейный характер при постоянном световом потоке и выражает зависимость фототока от приложенного напряжения.

Световая (*люкс-амперная*) характеристика фоторезистора – зависимость фототока или фотопроводимости от величины светового потока Φ или освещенности E при неизменном напряжении, приложенном к фоторезистору. Применяется также *люкс-омическая* характеристика: зависимость сопротивления фоторезистора от потока излучения или энергетической освещённости $R(E)$.

14. Что такое фототок и темновое сопротивление фоторезистора?

Фототоком I_{Φ} фотосопротивления при данном напряжении называется разность тока при освещении полупроводника $I_{св}$ и темнового тока I_T :

$$I_{\Phi} = I_{св} - I_T. \quad (7)$$

Учитываем, что R_T – темновое сопротивление фоторезистора в отсутствие падающего на него потока излучения в диапазоне его спектральной чувствительности.

15. Получите формулу (11) для сопротивления фоторезистора.