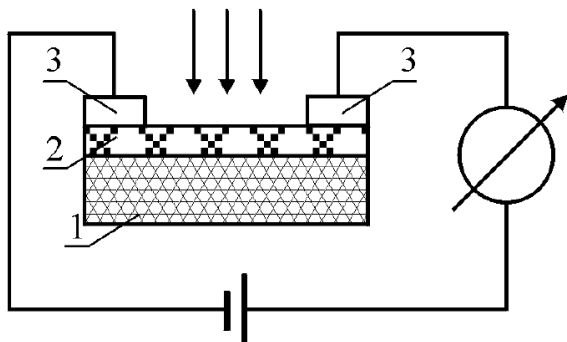




Эффекты взаимодействия электрона и дырки при оптических переходах.

Понятие об экситоне

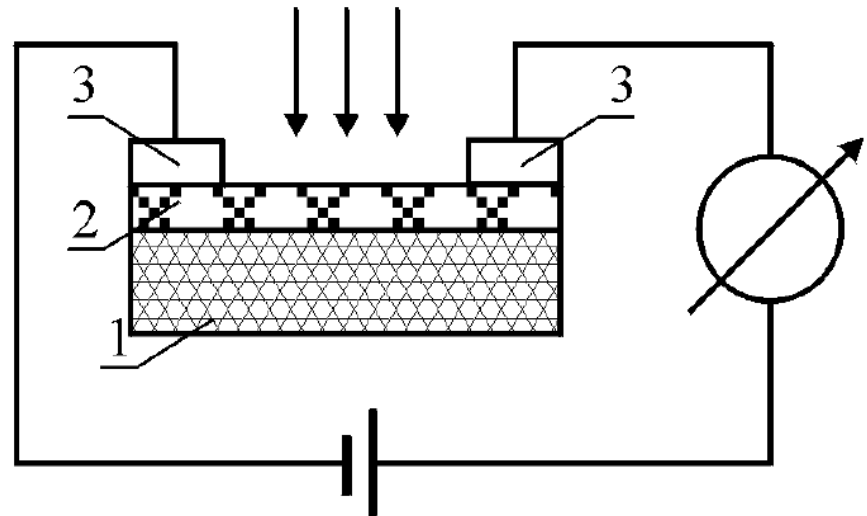
Лекция 7.

Лектор Чернышев А.П.

2019 г.

Фоторезистор

- Схема устройства прибора
1. Подложка изолирующая
 2. Тонкий слой полупроводника
 3. Металлические электроды



Фотопроводимость п/п

- Закон поглощения света

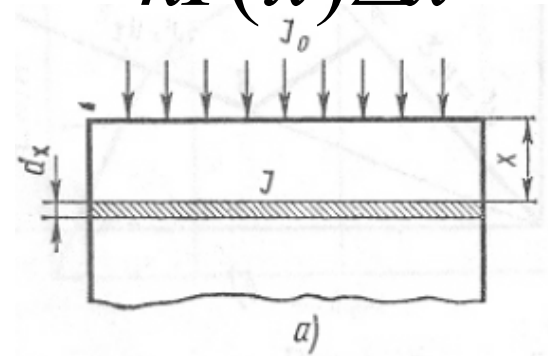
k – коэффициент поглощения света. При $\Delta x = 1\text{ м}$, имеем

$$k \approx -\frac{dI}{I}, [k] = \text{м}^{-1}$$

Коэффициент поглощения численно равен относительному изменению интенсивности света на единице пути.

$$dI = -kI(x)dx$$

$$\Delta I \approx -kI(x)\Delta x$$

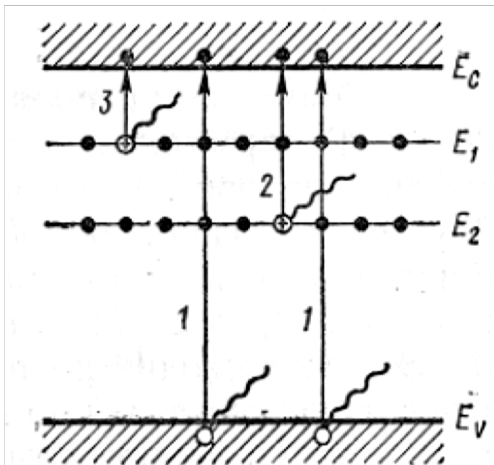


Интегрируя, получим

$$I(x) = I_0 e^{-kx}$$

Особенности поглощения света внутри полупроводника

- Поглощаясь внутри полупроводника, свет может вызывать появление избыточных носителей тока. Стрелки 1 показывают образование электронов проводимости и дырок при собственном поглощении света полупроводником. При этом $\Delta E = h\nu$. Стрелки 2 и 3 показывают переход электронов под воздействием света с примесных уровней в зону проводимости.



$$\Delta E = E_c - E_v$$

$$h\nu_1 = E_c - E_1$$

$$h\nu_2 = E_c - E_2$$

Фотопроводимость и темновая проводимость

Образование свободных электронов внутри полупроводника под действием света называется **внутренним фотоэффектом**. Добавочная проводимость, обусловленная поглощением электромагнитного излучения, называется **фотопроводимостью**.

Проводимость (основная), обусловленная тепловым возбуждением носителей заряда, называется **темновой проводимостью**.

Фотопроводимость делится на **собственную** и **примесную** проводимость.

Красная граница фотопроводимости

- Красная граница фотопроводимости или **край поглощения** света – это максимальная длина волны, при которой еще наблюдается повышение проводимости, обусловленное поглощением света.

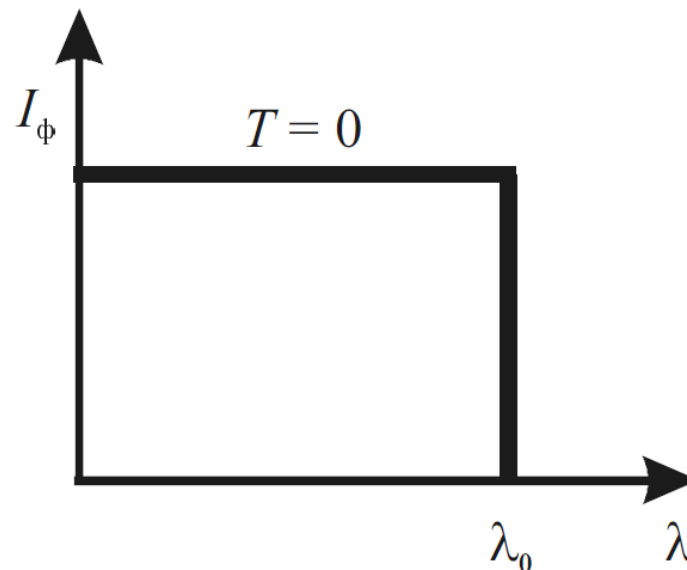
$$h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \Delta E, \quad \text{где } \Delta E \text{ – ширина запрещенной зоны полупроводника, } \lambda_0 \text{ – край собственного поглощения.}$$

$$\frac{hc}{\lambda_1} = \Delta E_a, \quad \text{где } \lambda_1 \text{ – край примесного поглощения, } \Delta E_a \text{ – энергия активации примеси.}$$

- Чем больше энергия активации примеси ΔE_a , тем меньше красная граница примесной фотопроводимости.

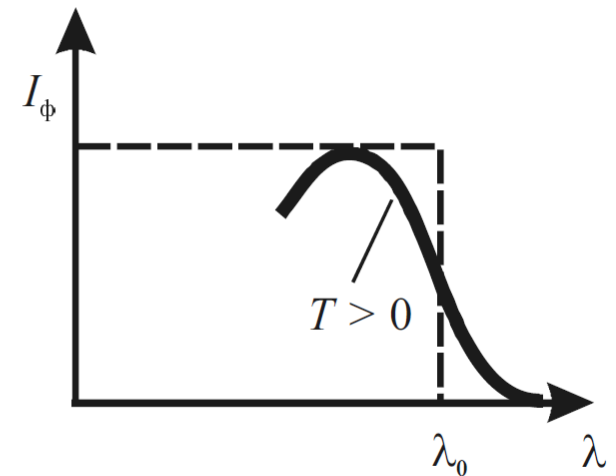
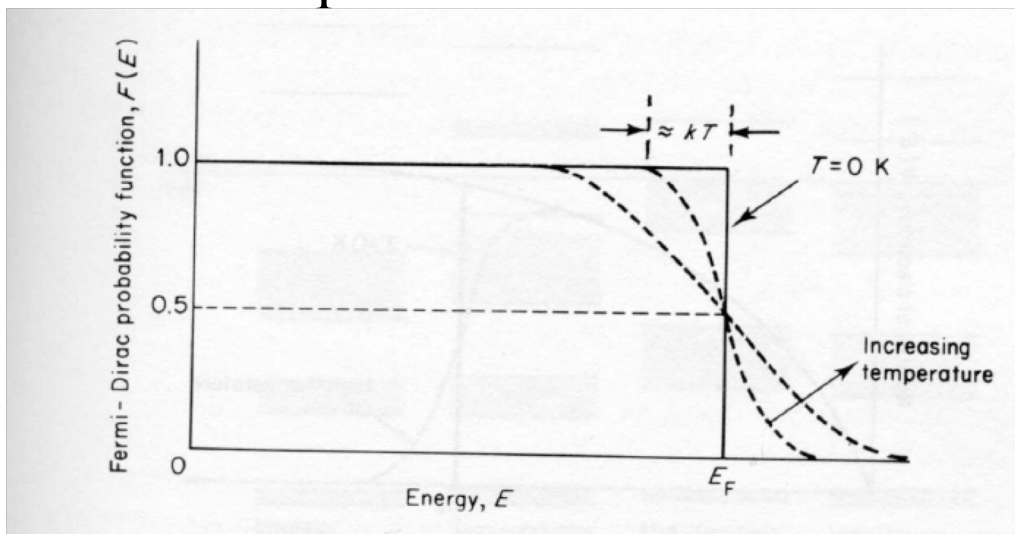
Спектральная характеристика собственного полупроводника при $T = 0\text{K}$

- Спектральной характеристикой называется зависимость фототока I_F от длины волны при постоянном световом потоке Φ . При абсолютном нуле температуры спектральная характеристика соответствует распределению Ферми-Дирака.



Спектральная характеристика собственного полупроводника при $T > 0\text{K}$

- При температуре $T > 0\text{K}$ происходит размытие распределения Ферми-Дирака за счет теплового движения электронов.



- С увеличением энергии фотона фототок быстро достигает максимума, а затем начинает уменьшаться.

Максимум поглощения в спектральной характеристике

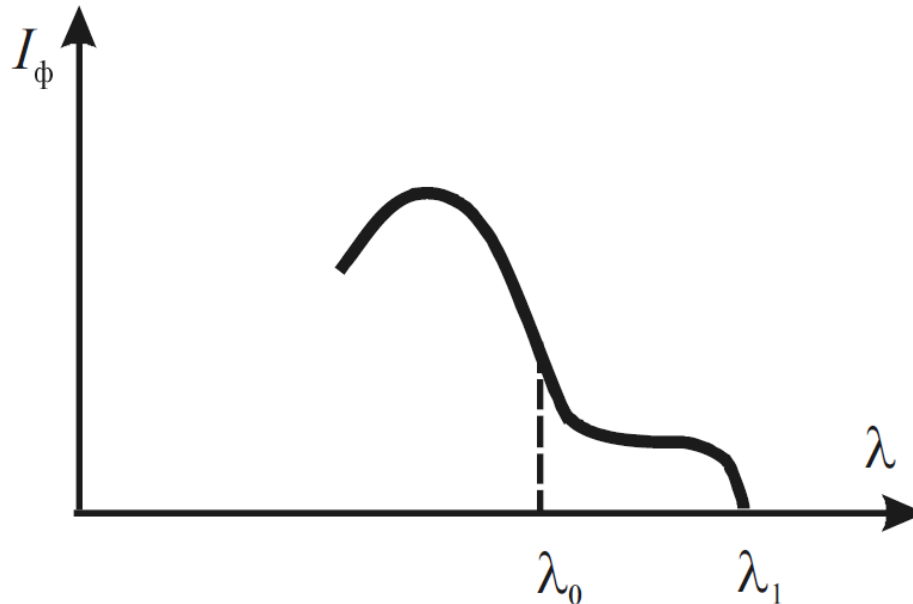
- Наличие максимума объясняется тем, что с уменьшением длины волны λ растет коэффициент оптического поглощения. Это приводит к повышению неравновесной концентрации носителей заряда в тонком поверхностном слое полупроводника. Близость пространственного расположения электронов и дырок приводит к повышенной скорости рекомбинации носителей заряда что и приводит к снижению тока проводимости.

$$e + h \rightarrow ph$$

- Здесь ph – фотон и (или) фонон.

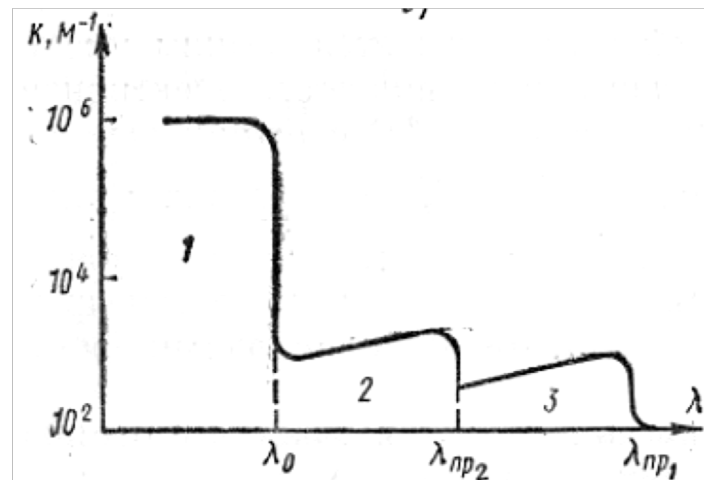
Спектральная характеристика примесного полупроводника при $T > 0\text{K}$

- В примесном полупроводнике есть примесный и собственный фототок.



Примесный полупроводник с двумя примесными уровнями

- Зависимость коэффициента поглощения от длины волны у такого полупроводника имеет вид



- Спектр поглощения в этом случае имеет три полосы поглощения – одну собственную и две примесные. Свет с длиной волны $\lambda < \lambda_0 = \frac{hc}{\Delta E}$ полностью поглощается в слое
- полупроводника толщиной 10^{-6} м.

Стационарное состояние и рекомбинация

- При температуре, отличной от нуля, в полупроводнике происходит процесс возбуждения, или **генерации**, свободных носителей заряда. Если нет рекомбинации, то $n \rightarrow \infty$. Вместе с процессом генерации возникает процесс **рекомбинации** $n \rightarrow 0$. Он состоит в том, что свободный электрон при встрече с вакантным местом (дыркой) занимает его, в результате чего происходит уничтожение пары свободных носителей:
- $e + h = ph$.
- Устанавливается *равновесная концентрация* носителей — стационарное состояние.

Неравновесные носители

- Способы генерации неравновесных носителей заряда:
 1. Тепловое возбуждение
 2. Воздействие света
 3. Воздействие ионизирующего излучения
 4. Инжекция дополнительных носителей заряда через контакт

Избыточные против равновесной концентрации свободные носители заряда называются неравновесными носителями заряда. Пусть n_0 и p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок, а Δn и Δp – их избыточные значения. Тогда полная концентрация равна

$$n = n_0 + \Delta n, \quad p = p_0 + \Delta p.$$

Кинетика рекомбинации

Процесс образования новых носителей заряда (генерации) характеризуют скоростью генерации G , которая равна числу носителей заряда (или пар носителей заряда) ежесекундно образующихся в единице объёма полупроводника.

Обратный процесс рекомбинации характеризуют скоростью рекомбинации R , которая равна числу носителей заряда (или их пар), ежесекундно рекомбинирующих в единице объёма полупроводника. Для электронов имеем
$$R_n = -\frac{dn}{dt} = -\frac{d\Delta n}{dt}$$

Для дырок аналогичное выражение имеет вид

$$R_p = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d\Delta p}{dt}$$

Знак минус показывает, что количество носителей заряда уменьшается с течением времени.

Пусть под действием света в полупроводнике образовались избыточные носители с концентрациями $\Delta n_0 = \Delta p_0$. После выключения света носители будут рекомбинировать и их концентрация начнет уменьшаться. В приближении времени релаксации имеем для скорости рекомбинации соотношения

$$R_n = -\frac{d\Delta n}{dt} = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1)$$

$$R_p = -\frac{d\Delta p}{dt} = \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (2)$$

Интегрируя уравнения (1) и (2), получим

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (3)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (4)$$

Диффузия свободных носителей заряда

- Свободные носители заряда диффундируют в объёме полупроводника. За время своей жизни они перемещаются в среднем на расстояние L , которое называют диффузионной длиной. Как установлено, диффузионная длина следующим образом зависит от τ :

$$L = \sqrt{D\tau}$$

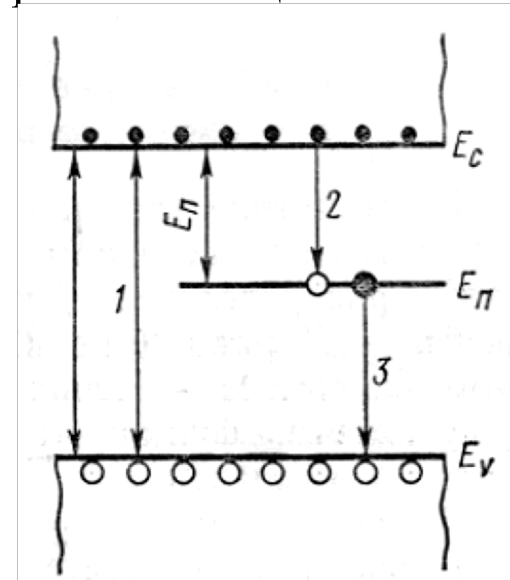
- где D – коэффициент диффузии носителей заряда, связанный с их подвижностью b соотношением Эйнштейна

$$D = \frac{k_B T b}{q}$$

- Здесь q – заряд электрона

Излучательная и безызлучательная рекомбинация

Процесс перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону при рекомбинации может протекать как непосредственно через всю запрещенную зону, так и через примесный уровень. Первый тип рекомбинации называется межзонным, второй – рекомбинацией через примесный уровень. Межзонная излучательная рекомбинация может иметь существенное значение для полупроводников с узкой запрещенной зоной при комнатной температуре и выше. При обоих типах рекомбинации выделяется одна и та же энергия ΔE . Только в одном случае она выделяется по частям, а в другом – сразу.



Выделение энергии может происходить в виде кванта света $h\nu$:

$$e + h = h\nu$$

или в виде тепла – фононов:

$$e + h = Q$$

В первом случае рекомбинацию называют **излучательной**, во втором – **безызлучательной**.

Для полупроводников с широкой запрещенной зоной основным механизмом, ответственным за рекомбинацию, является безызлучательная рекомбинация через примесные уровни. Хотя и в таких полупроводниках можно достичь относительно высокого уровня излучательной рекомбинации (например, в арсениде галлия Ga As).

Квантовый выход и время релаксации

- Пусть интенсивность света равна I , количество поглощаемых в единицу времени фотонов равно kI , то скорость генерации избыточных носителей заряда в единице объема полупроводника в единицу времени равна

$$G = Ik\beta$$

- Здесь β – **квантовый выход**, показывающий количество свободных носителей заряда, образующихся при поглощении одного фотона.

Стационарное состояние и фотопроводимость

- В стационарном состоянии скорость генерации равна скорости рекомбинации носителей заряда:

$$G = R = \frac{\Delta n_0}{\tau}$$

- Этому состоянию соответствует постоянная (стационарная) концентрация избыточных носителей:

$$\Delta n_0 = G\tau = I k \beta \tau$$

- Стационарная фотопроводимость полупроводника будет равна

$$\sigma_F = q \beta k I b \tau$$

- Чем больше время жизни избыточных зарядов, тем выше фотопроводимость.

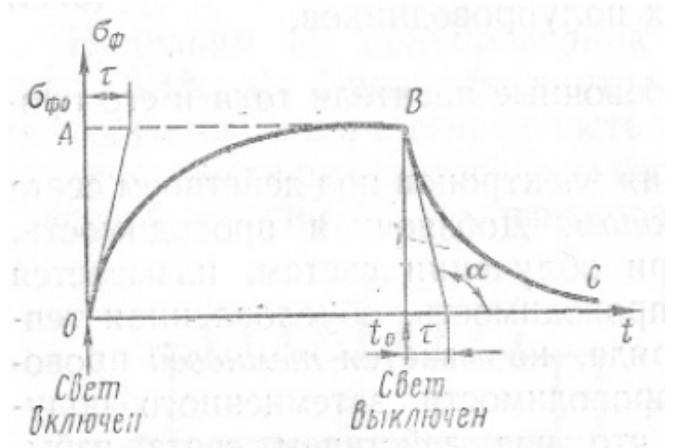
Инерционность фотоприёмников

- Таким образом, выгодно стремиться к максимальным значениям τ , однако при этом может увеличиться инерционность фотоприёмника. Рассмотрим спад фотопроводимости после выключения источника света (см. Рис.).

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Формула соответствует участку ВС

$$\sigma_F = \sigma_{F0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$



Свойства кривой зависимости фотопроводимости от времени

Формула (5) показывает, что чем больше время релаксации, тем медленнее происходит спад фотопроводимости после выключения света и, следовательно, более инерционным будет фоторезистор.

Касательная, проведенная к кривой спада фотопроводимости в точке t_0 , отсекает на оси времени отрезок, численно равный τ . Действительно,

$$\left. \frac{d\sigma_F}{dt} \right|_{t=t_0} = -\frac{\sigma_{F0}}{\tau} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \bigg|_{t=t_0} = -\frac{\sigma_{F0}}{\tau} \quad \quad \quad tg\alpha = -\frac{\sigma_{F0}}{\tau}$$

$$\tau = -\sigma_{F0} ctg\alpha$$

Экситоны

- Понятие «экситон» ввел Я.И. Френкель

29 января (10 февраля) 1894

Место рождения

Ростов-на-Дону, Российская
империя

Дата смерти

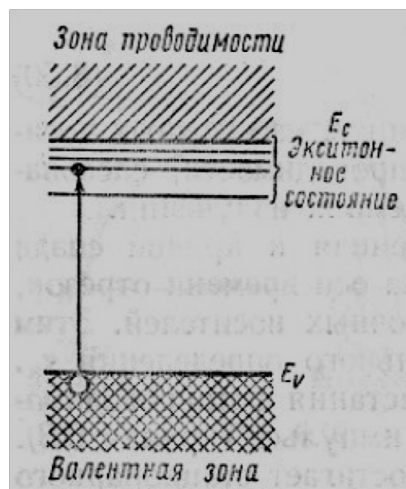
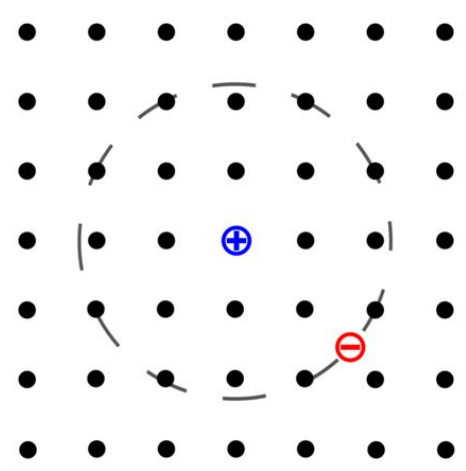
23 января 1952 (57 лет)

Место смерти

Ленинград, СССР



При возбуждении фотопроводимости электроны из валентной зоны перебрасываются в зону проводимости и становятся свободными. Однако возможно и другое течение процесса, когда возбуждённый электрон не разрывает связи с дыркой, возникающей в валентной зоне, а образует с ней единую связанную систему. Экситон может быть представлен в виде связанного состояния электрона проводимости и дырки, расположенных или в одном узле кристаллической решётки (**экситон Френкеля**, $a^* < a_0$, a^* — радиус экситона, a_0 — период решётки), или на расстояниях, значительно больше междоатомных (**экситон Ванье — Мотта**, $a^* \gg a_0$). В полупроводниках, за счёт высокой диэлектрической проницаемости, существуют только экситоны Ванье — Мотта. Экситоны Френкеля применимы, прежде всего, к молекулярным кристаллам.



Уровни энергии экситонов находятся у дна зоны проводимости.

Свойства экситона

- Экситон сходен с возбуждённым атомом водорода: в обоих случаях вокруг положительно заряженного иона движется электрон и энергетический спектр является дискретным.
- Экситоны являются электрически нейтральными системами: их появление в полупроводнике не приводит к появлению дополнительных носителей заряда. Возникнув, экситоны некоторое время блуждают по объёму полупроводника.
- При столкновении с фононами, примесными центрами и другими дефектами решетки экситоны или рекомбинируют, или распадаются. В первом случае возбужденные атомы переходят в нормальное состояние, а энергия возбуждения передается узлам решетки или излучается в виде квантов света, т.е. происходит люминесценция. Во втором случае образуется пара носителей заряда – электрон и дырка.

Понятие о трионе

- **Трион** — квазичастица, представляющая собой тройку связанных кулоновскими силами электронов и дырок. Соответственно может состоять либо из двух дырок и одного электрона (положительный **трион**), либо двух электронов и одной дырки...

Зависимость фотопроводимости от температуры

- На фотопроводимость полупроводников существенное влияние оказывает температура. С понижением температуры уменьшается число темновых носителей заряда. Это приводит к увеличению относительной доли фотопроводимости в общей проводимости полупроводника. Абсолютная величина фотопроводимости также увеличивается из-за того, что с уменьшением концентрации темновых носителей заряда уменьшается вероятность рекомбинации электронов и дырок.

Тепловое излучение

- **Тепловое излучение** — электромагнитное излучение со сплошным спектром, испускаемое веществом и возникающее за счёт его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, возникающей за счёт внешних источников энергии). В физике для корректного расчёта теплового излучения принята модель абсолютно чёрного тела, тепловое излучение которого описывается законом Стефана — Больцмана. Тепловое излучение — один из трёх элементарных видов переноса тепла, которое осуществляется при помощи электромагнитных волн.

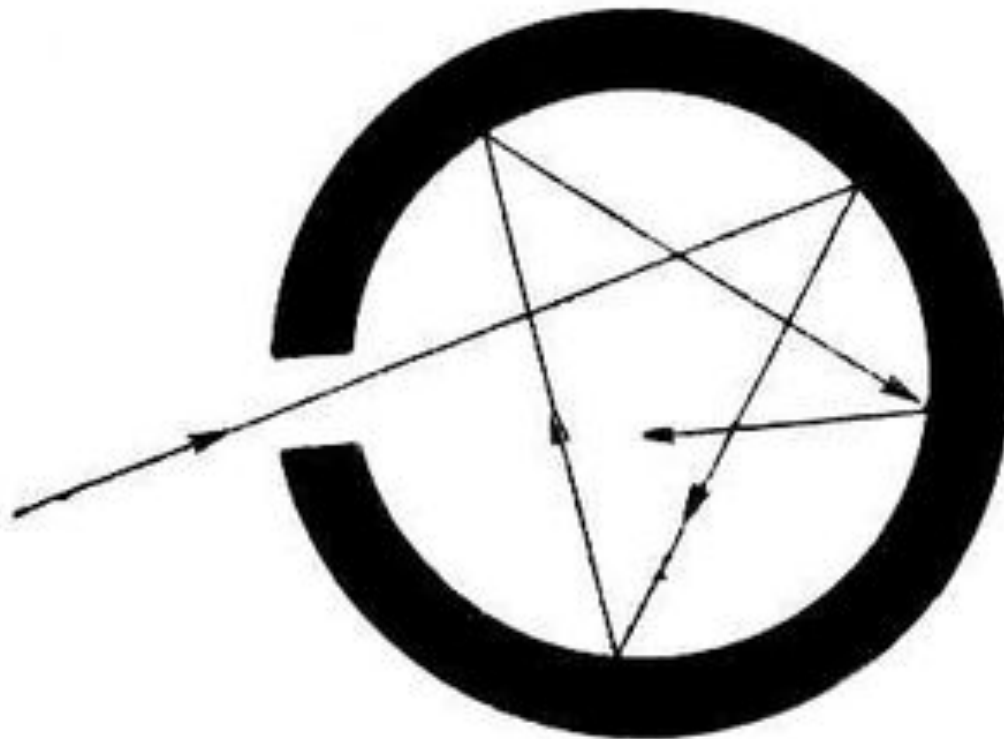
Пример теплового излучения



Абсолютно черное тело

- **Абсолютно чёрное тело** — физическая абстракция, применяемая в термодинамике, тело, поглощающее всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах и ничего не отражающее. Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой.

Модель абсолютно черного тела



Объемная плотность энергии и спектральная плотность

- Энергия ЭМ излучения, приходящаяся на 1 куб. м, это плотность энергии

$$u = \frac{W}{V}$$

- $[u] = \text{Дж/м}^3 = \text{Па}$

Распределение плотности энергии по частотам u_ω и по длинам волн u_λ можно определить интегральным соотношением

$$u = \int_0^{\infty} u_\omega d\omega = \int_0^{\infty} u_\lambda d\lambda$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad d\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} d\lambda$$

$$[u_\omega] = \text{Дж с/м}^3$$

$$[u_\lambda] = \text{Дж /м}^4$$

Первая формула Вина

В 1893 году Вильгельм Вин, воспользовавшись, помимо классической термодинамики, электромагнитной теорией света, вывел следующую формулу:

где:

$$u_{\omega T} = \omega^3 F(\omega/T)$$

$u_{\omega T}$ — спектральная плотность энергии излучения

ω — циклическая частота излучения

T — температура излучающего тела

F — функция, зависящая только от частоты и температуры.

Вид этой функции невозможно установить, исходя только из термодинамических соображений.

Закон Вина

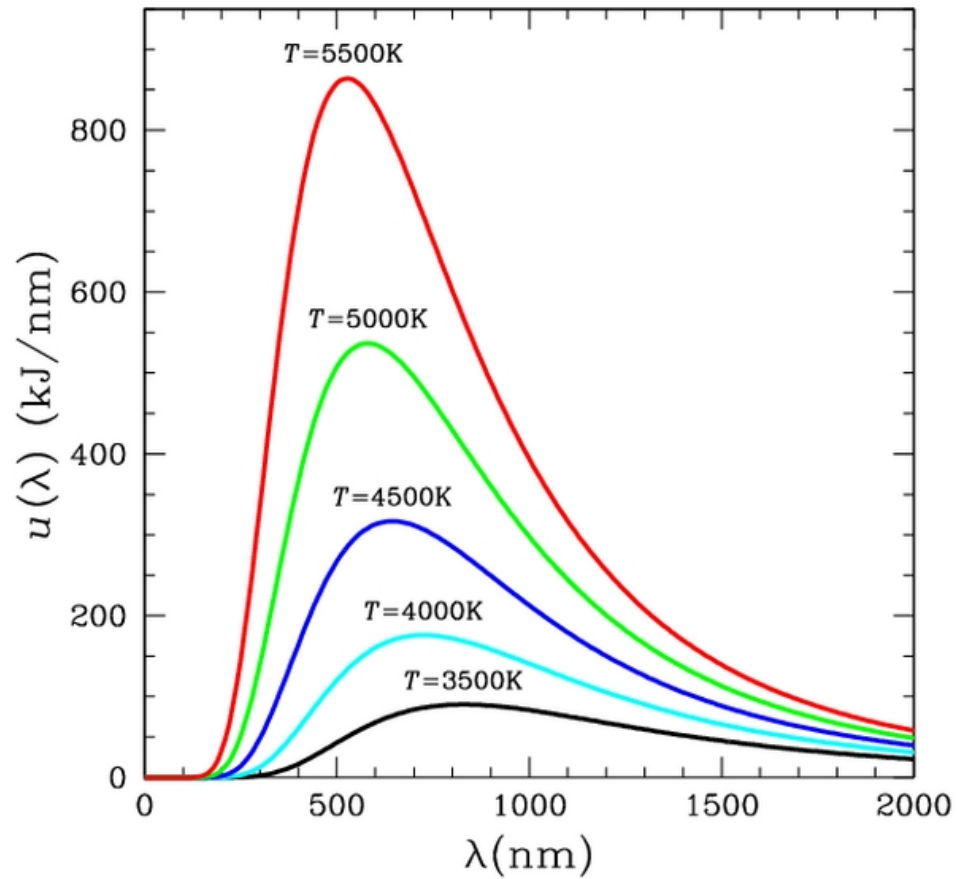
- Вильгельм Карл Вернер Отто Фриц Франц Вин (нем. Wilhelm Wien; 13 января 1864, Фишхаузен (Приморск) — 30 августа 1928, Мюнхен) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1911 г. «за открытия в области законов, управляющих тепловым излучением».

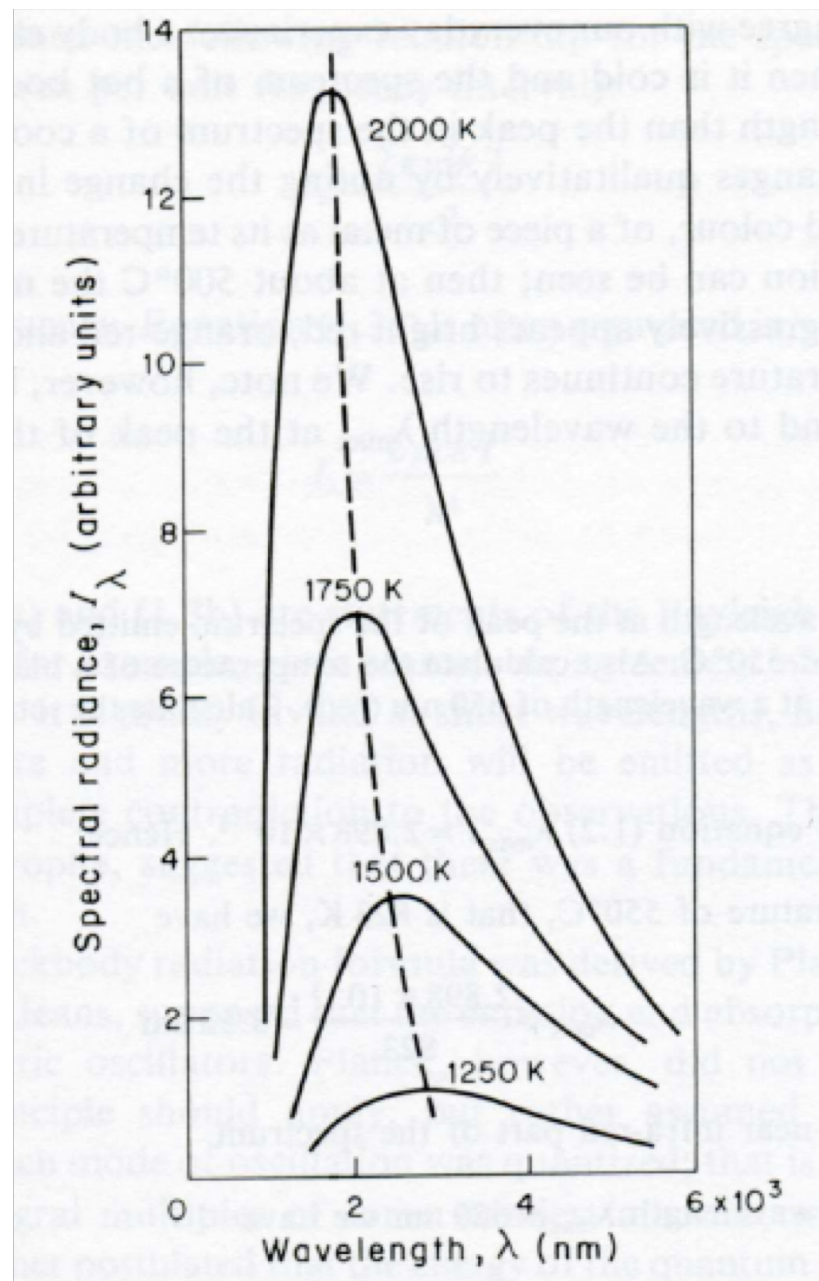
$$\lambda_{\max} T = b$$

- $b = 0.29 \text{ К см}$



Излучение абсолютно черного тела





Формула Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}; \quad b = 2.90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Вторая формула Вина

- В 1896 году Вин на основе дополнительных предположений вывел второй закон:

$$u_{\omega} = C_1 \omega^3 \exp(-C_2 \omega/T)$$

- где u_{ω} — плотность энергии излучения
- ω — частота излучения
- T — температура излучающего тела
- C_1, C_2 — константы.
- Опыт показывает, что вторая формула Вина справедлива лишь в пределе высоких частот (малых длин волн). Она является частным конкретным случаем первого закона Вина.

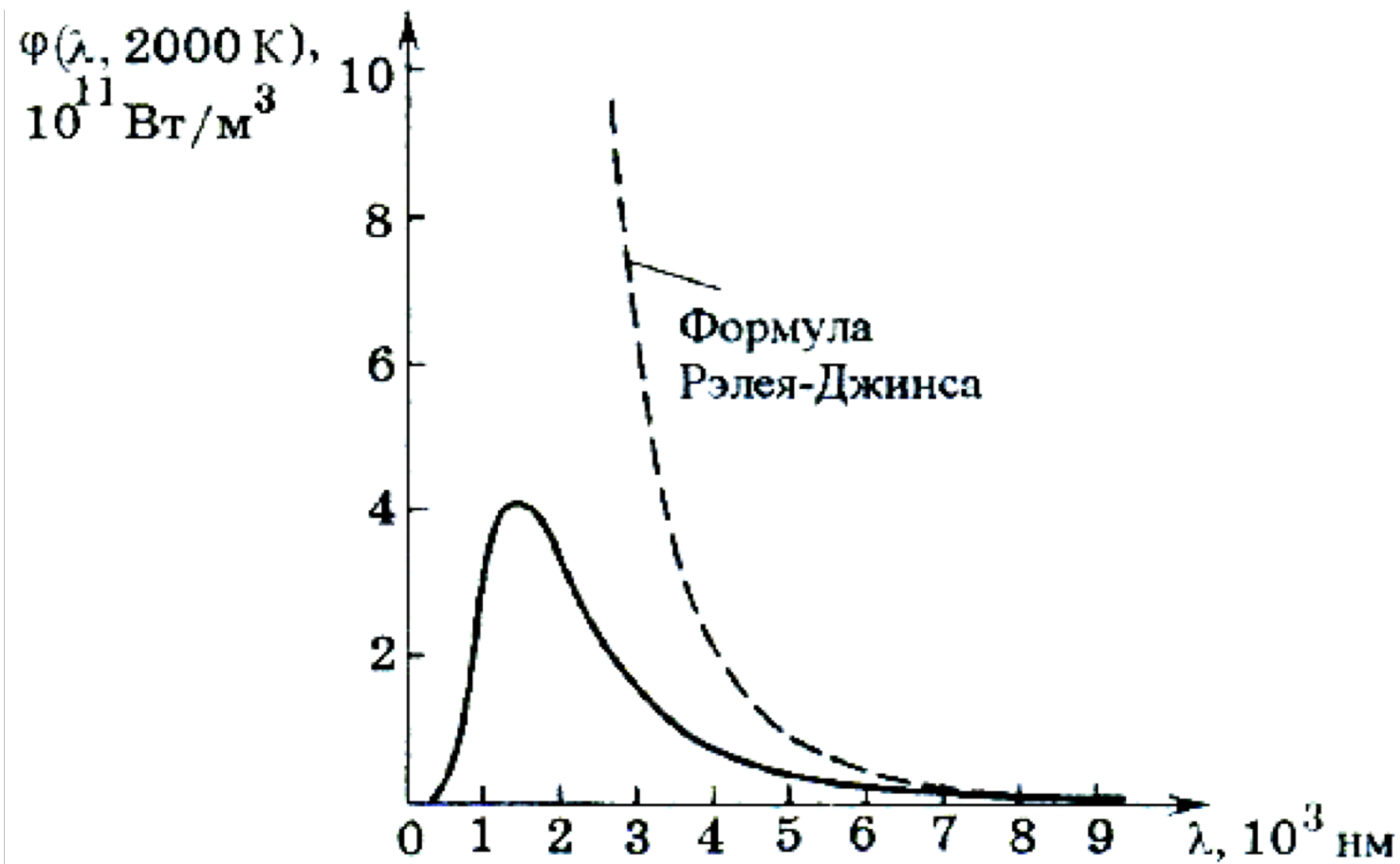
Формула Рэля - Джинса

- Попытка описать **излучение абсолютно чёрного тела** исходя из классических принципов термодинамики и электродинамики приводит к закону Рэля — Джинса:

$$u_{\omega T}^* = \frac{k_B T \omega^2}{\pi^2 c^3}$$

Ультрафиолетовая катастрофа

- Формула Рэля-Джинса предполагает квадратичное возрастание спектральной плотности излучения в зависимости от его частоты. На практике такой закон означал бы невозможность термодинамического равновесия между веществом и излучением, поскольку согласно ему вся тепловая энергия должна была бы перейти в энергию излучения коротковолновой области спектра. Такое гипотетическое явление было названо ультрафиолетовой катастрофой.



Энергетическая светимость и испускающая способность

Поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям за 1 секунду, называют **энергетической светимостью R** .

Энергетическая светимость, приходящаяся на интервал частот $d\omega$, обозначается как dR_ω

- Она определяется соотношением

$$dR_\omega = r_{\omega T} d\omega$$

- Множитель r_ω называется излучательной способностью тела

$$r_{\omega T} = r_\omega(T)$$

Аналогично,

$$dR_{\lambda} = r_{\lambda} d\lambda$$

Поглощательная способность тела:

Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток лучистой энергии $d\Phi_{\omega}$. Часть этого потока $d\Phi'_{\omega}$ поглощается телом. Безразмерная величина

$$a_{\omega T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$$

называется поглощательной способностью тела. По определению $a_{\omega T} \leq 1$. Для абсолютно черного тела

$$a_{\omega T} \equiv 1$$

Закон Кирхгофа

- Г. Кирхгоф (Gustav Robert Kirchhoff) доказал, что отношение испускательной и поглотительной способностей не зависит от природы тела и является для всех тел одной и той же функцией частоты (длины волны) и температуры:

$$\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} = f(\omega, T)$$

- Сами величины $r_{\omega T}$ и $a_{\omega T}$ *могут сильно меняться при переходе от одного тела к другому, но их отношение оказывается одинаковым для всех тел.*

Закон Стефана - Больцмана

- Для абсолютно черного тела

$$R^* = \int r_{\omega T}^* d\omega = \sigma T^4$$

- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана.

$$r_{\omega T}^* \equiv f(\omega, T)$$

Спектральная плотность энергетической светимости

Мощность теплового излучения

- У абсолютно чёрного тела интегральная мощность по всему спектру прямо пропорциональна площади поверхности и четвёртой степени температуры тела:

$$P = S\varepsilon\sigma T^4$$

- где ε - степень черноты (для всех веществ $\varepsilon < 1$, для абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$).

Люминесценция

- Тепловое излучение (повторение).
- Вызвать свечение тел можно не только путем их нагревания. Некоторые вещества способны светиться после облучения их видимым светом, ультрафиолетовыми, рентгеновскими и гамма-лучами, потоком электронов и других частиц, при трении и разламывании, при протекании химических реакций, под действием электрического поля и т.д. При этом тела могут испускать видимый свет, хотя температура их является низкой (комнатная и ниже). Такое холодное свечение тел называют **люминесценцией**. Тела, способные люминесцировать, называют **люминофорами** или **фосфорами**. Свечение, возникающее под действием света, называется **фотолюминесценцией**. В отличие от теплового излучения люминесцентное излучение является неравновесным.

Вторая особенность люминесценции

- Второй особенностью люминесценции является заметная ее длительность по сравнению с периодом световых колебаний. Период световых колебаний по порядку величины равен $10^{-13} - 10^{-15}$ с. Свечение люминесценции продолжается в течение 10^{-10} с и более длительного времени.
- В некоторых случаях свечение может продолжаться в течение секунд или даже месяцев после прекращения воздействия. В зависимости от длительности свечения фотолюминесценцию принято разделять на **фосфоресценцию** и **флуоресценцию**. **Фосфоресценцией** называют свечение длительностью более $10^{-5} - 10^{-6}$ с. **Флуоресценцией** называют свечение длительностью меньше 10^{-6} с.

Правило Стокса

Правило Стокса: при люминесценции возникает свечение, имеющее большую длину волны, чем длина волны возбуждающего света.

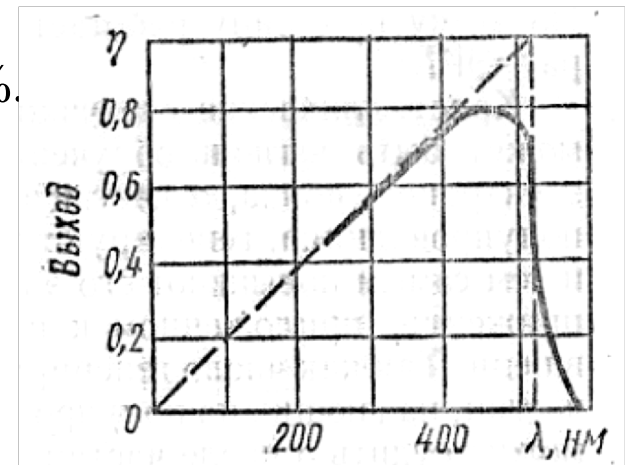
Последующие исследования показали, что могут наблюдаться случаи **антистоксова свечения**, когда длина волны свечения меньше, чем длина волны возбуждающего света.

Фотолюминесценция минералов
под действием ультрафиолетового
света



Характеристика люминесценции – энергетический выход или к.п.д.

- Энергетический выход или к.п.д. люминесценции (η) введены С.И. Вавиловым. Энергетический выход это отношение энергии, излученной люминесцирующим телом, к энергии, поглощенной этим телом при возбуждении люминесценции.
- На рисунке приведена зависимость η от длины волны λ вызывающего люминесценцию света. **Закон Вавилова: в некотором интервале длин волн η растет пропорционально длине волны, а затем резко падает до нуля.**
- Энергетический выход может превышать 80%.



Механизм возникновения люминесценции у твердых кристаллических тел

Опыт показывает, что кристаллы с достаточно совершенной решеткой не подвержены сильной люминесценции. Дефекты кристаллической решетки вызывают люминесценцию. Примесные атомы являются наиболее эффективными. Такие примеси называют **активаторами**. Содержание этих примесей не превышает сотых долей процента. Спектральный состав излучения и энергетический выход люминесценции зависят как от природы основного вещества, так и от природы активатора.