

Раздел 8

Элементы физики

конденсированных состояний

8.5. Элементы квантовой электроники и инфракрасной техники

Курс лекций по общей физики

Доцент Петренко Л.Г.



*Кафедра общей и
экспериментальной физики*

НТУ «ХПИ»

Харьков - 2012 год

8.5. Элементы квантовой электроники и инфракрасной техники.

8.5.1. Элементарная квантовая теория излучения. Люминесценция.

В природе существует несколько видов излучения – тепловое, излучение отражающих и рассеивающих поверхностей, люминесценция, электромагнитное, рентгеновское излучение и др.

В классической электродинамике электромагнитное излучение - это образование электромагнитных волн ускоренно движущимися заряженными частицами.

В квантовой теории электромагнитное излучение – это *рождение фотонов* при изменении состояния квантовой системы.

Переход таких квантовых систем, как молекулы и атомы, из одного состояния в другое сопровождается излучением или поглощением кванта энергии - фотона.

Энергия фотона равна: $\varepsilon_{\text{ф}} = \hbar \omega = h\nu$.

Фотон обладает и корпускулярными, и волновыми свойствами. В этом проявляется его корпускулярно-волновой дуализм.

Излучение может возникать самопроизвольно - тепловое, а может быть вынужденным – люминесценция и свечение жидких кристаллов.



Люминесценция – это неравновесное излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела при данной температуре и имеющее длительность, значительно превышающую период световых волн.

Длительность люминесценции после прекращения возбуждения составляет $\sim 10^{-8} \div 10^{-10}$ с, а период световых колебаний $\sim 10^{-14}$ с.
В этом состоит отличие люминесценции от процессов отражения и рассеяния света.

Тепловое излучение в видимой области спектра заметно только при температуре в несколько сотен или тысяч градусов.
Люминесценция может наблюдаться при любой температуре.
Поэтому люминесценцию называют **холодным свечением.**

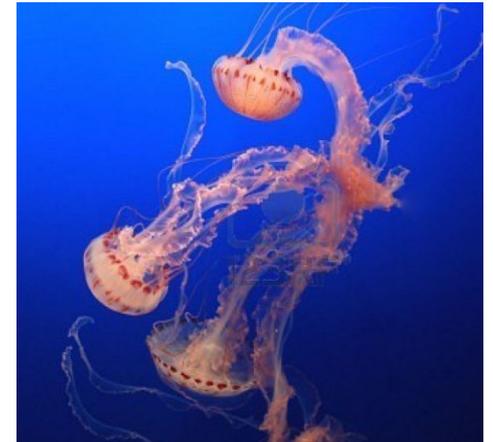
Люминесцентное излучение лежит в видимой, ИК и ближней УФ областях спектра.

В природе люминесценция наблюдается в виде северного сияния, свечения некоторых минералов, насекомых, гниющего дерева.



В зависимости от способа возбуждения различают: фото-, рентгено-, катодо-, электро-, хеми-, радио-, триболюминесценцию.

По длительности люминесценции различают флуоресценцию (короткое свечение) и фосфоресценцию (длительное свечение).



Твёрдые тела, представляющие собой люминесцирующие искусственно приготовленные кристаллы с чужеродными примесями, называются кристаллофосфорами. На их примере рассмотрим *механизмы возникновения флуоресценции и фосфоресценции с точки зрения зонной теории*.

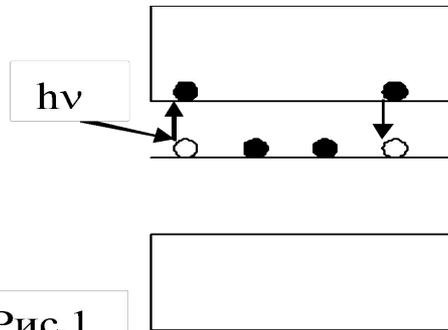


Рис.1



Флуоресценция.

В запрещённой зоне располагаются примесные уровни активатора (рис.1). При поглощении атомом активатора фотона с энергией $h\nu$ электрон с примесного уровня переходит в зону проводимости и свободно перемещается по кристаллу до тех пор, пока не встретит ион активатора и не *рекомбинирует* с ним, перейдя вновь на примесный уровень. Рекомбинация сопровождается излучением кванта люминесцентного свечения.

Время свечения $\leq 10^{-9}$ с.

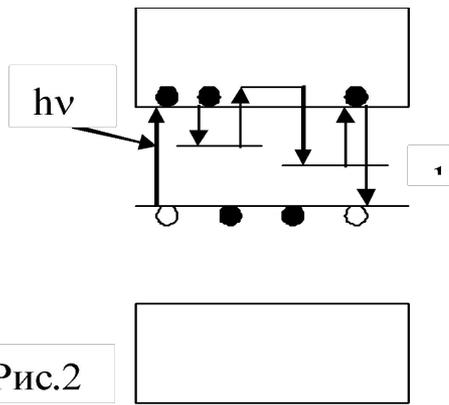
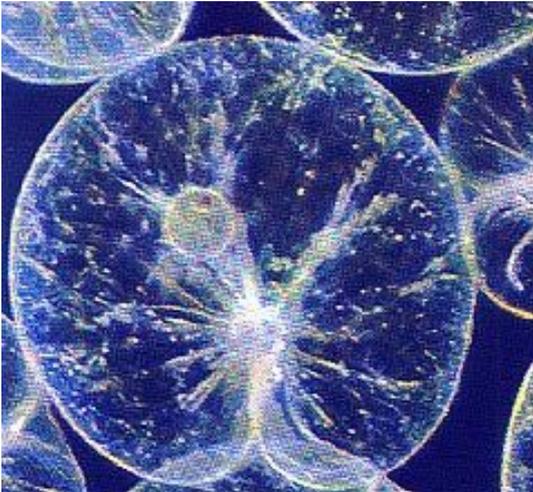


Рис.2

Фосфоресценция.

Для возникновения *длительного свечения* кристалл должен содержать *центры захвата* или **ЛОВУШКИ** для электронов (рис.2), лежащие вблизи дна зоны проводимости. Их образуют *атомы примеси* и *междоузлия*.

Под действием света электроны с примесных уровней переходят в зону проводимости и становятся свободными, но затем захватываются **ловушками**, **теряют подвижность** и не могут рекомбинировать с ионами активатора.

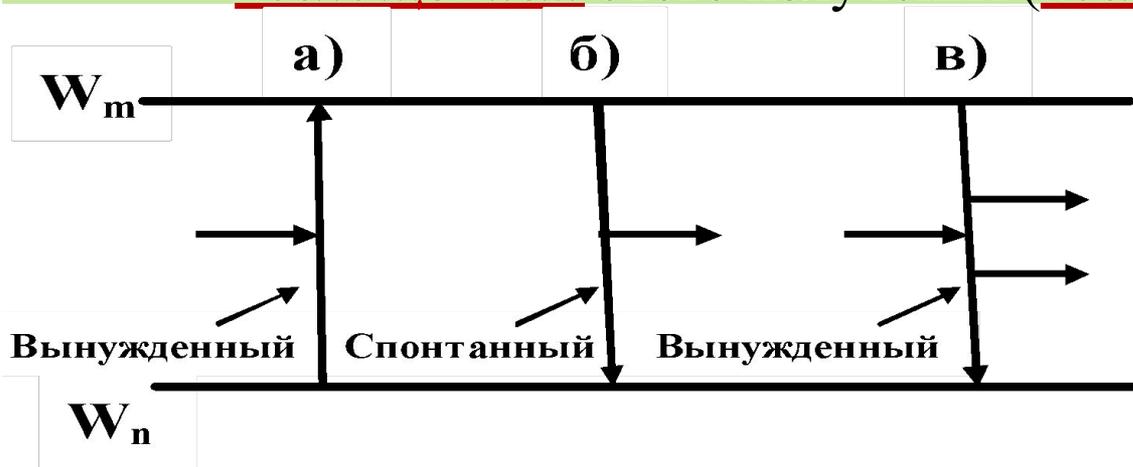


Поглотив фотон, электрон освобождается из ловушки, переходит в зону проводимости и движется по кристаллу до тех пор, пока его не захватит другая ловушка или он не рекомбинирует с ионом активатора. В последнем случае возникает **квант люминесцентного излучения**.

8.5.2. Вынужденное и спонтанное излучение фотонов. Коэффициенты Эйнштейна для индуцированных переходов двухуровневой системы.

До сих пор рассматривались два вида переходов электронов между энергетическими уровнями:

а) вынужденные переходы с более низких энергетических уровней на более высокие под действием излучения и сопровождающиеся **поглощением** этого излучения (**поглощение фотонов**);



б) спонтанные переходы
(самопроизвольные)
с более высоких
энергетических уровней
на более низкие,
сопровождающиеся
излучением фотонов.

В 1918 году А.Эйнштейн показал, что может существовать ещё один вид переходов - **вынужденные переходы с высоких энергетических уровней на низкие,** сопровождающиеся **излучением фотонов - В).**

**Вероятности переходов в этом случае
в обоих направлениях одинаковы: $P_{mn} = P_{nm}$.**

Вероятности вынужденных переходов пропорциональны плотности энергии U_ω вынуждающего этот переход электромагнитного поля, приходящейся на частоту $\omega = (W_m - W_n)/\hbar$, соответствующую данному переходу.

Таким образом, $P_{mn} = B_{mn} U_\omega$; $P_{nm} = B_{nm} U_\omega$,

где B_{mn} и B_{nm} – **коэффициенты Эйнштейна**.

Поскольку $P_{mn} = P_{nm}$, то равны и коэффициенты Эйнштейна: $B_{mn} = B_{nm}$.

**Число переходов между двумя уровнями
пропорционально “населённости” исходного уровня.**

Для осуществления вынужденных переходов с более высоких уровней на низкие необходимо **“обратить населённость энергетических уровней”** – в состоянии с большей энергией должно быть больше атомов, чем в состоянии с меньшей энергией.

При *поглощении* света его интенсивность изменяется в соответствии

с **законом Бугера-Ламберта**: $I=I_0e^{-\chi d}$,

где χ - коэффициент поглощения, d - толщина поглощающего слоя.

В веществах с инверсной населённостью коэффициент поглощения отрицательный ($\chi < 0$).

Впервые о возможности получения инверсных сред в 1939 году указал советский физик **В.А.Фабрикант**.

Он экспериментально обнаружил вынужденное излучение паров ртути, возбуждаемых в электрическом разряде.

Вынужденное и вынуждающее излучения строго когерентны - их направление, частота, фаза, поляризация совпадают.



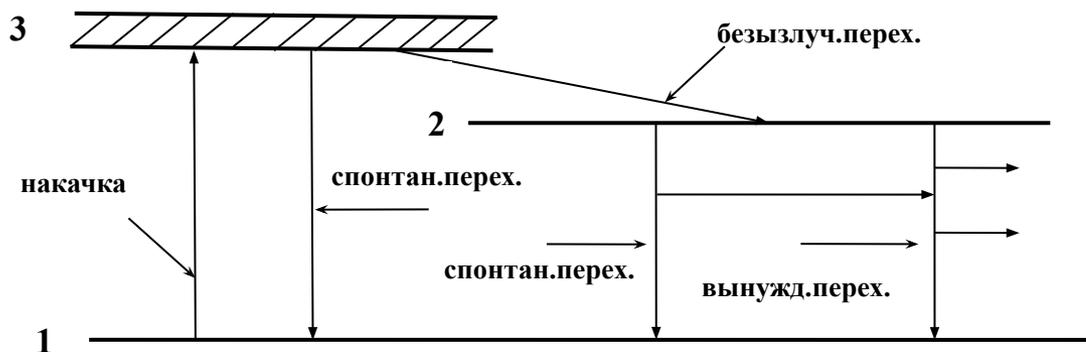
8.5.3. Принцип работы квантового генератора. Метод трёх уровней. Основные этапы развития квантовой электроники.

Практически инверсное состояние среды осуществлено в 50-е годы XX века в принципиально новых источниках излучения – **оптических квантовых генераторах** или **лазерах** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света с помощью вынужденного излучения).



В 1953 году советские физики Н.Г.Басов и А.М.Прохоров и независимо от них американские физики Ч.Таунс и Д.Вебер высказали идею, а уже в 1954 году были созданы первые **молекулярные генераторы (мазеры)**, работающие ***в сантиметровом диапазоне.***

В 1960 году **Т.Мейман** (США) создал аналогичный мазеру прибор, работающий *в оптическом диапазоне - лазер*.



В рубиновом лазере Меймана ($\lambda=0,6943\text{мкм}$) инверсная населённость уровней осуществляется по так называемой трёхуровневой схеме, предложенной в 1955 году Басовым и Прохоровым.

В кристалле рубина (Al_2O_3) часть атомов Al замещена ионами хрома Cr^{+++} . При облучении рубина светом мощной газоразрядной импульсной лампы происходит оптическая накачка лазера - ионы хрома переходят с 1 на уровни широкой полосы 3.

Время жизни ионов хрома в возбуждённом состоянии мало - $\sim 10^{-7}\text{с}$.

Поэтому происходят либо спонтанные переходы $3 \rightarrow 1$,

либо безызлучательные переходы $3 \rightarrow 2$ на метастабильный уровень 2.

Переходы $2 \rightarrow 1$ запрещены правилами отбора. Это приводит к накоплению ионов хрома на уровне 2, то есть возникает инверсная населённость уровней 1 и 2.

Каждый фотон, родившийся при спонтанном переходе $2 \rightarrow 1$, может инициировать множество вынужденных переходов $2 \rightarrow 1$.

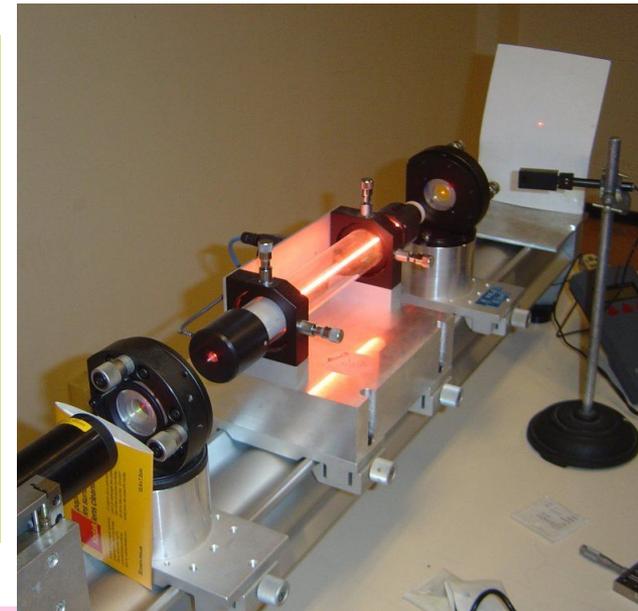
Возникает лавина вторичных фотонов, являющихся копией первичных.

Так происходит лазерная генерация.

8.5.4. Твёрдотельные и газоразрядные лазеры. Полупроводниковые лазеры. Химические лазеры. Применения квантовой электроники.

Лазерное излучение имеет
характерные особенности:

временную и пространственную когерентность;
строгую монохроматичность ($\Delta\lambda < 10^{-11}\text{м}$);
большую плотность потока энергии
(20кВт/мм^2);
очень малое угловое расхождение в пучке.



В настоящее время созданы *несколько десятков разных типов лазеров*,
которые можно классифицировать по:
типу активной среды - твёрдотельные, жидкостные, газовые,
полупроводниковые;
методу накачки - оптические, тепловые, химические, электроионизационные;
режиму генерации - непрерывные, импульсные.

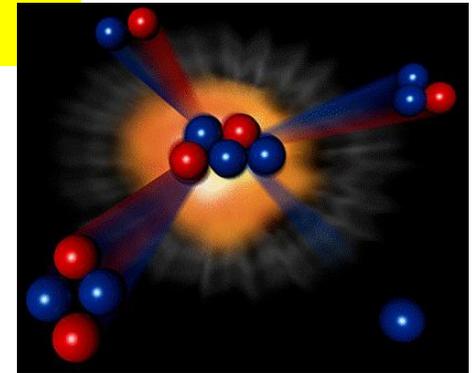
Лазеры широко применяются:



В научных исследованиях;
в частности в голографии;
в измерительной технике;
при обработке, резании,
микросварке
твёрдых материалов;



при получении и исследовании
высокотемпературной плазмы (проблема
управляемого термоядерного синтеза)



В военной технике;



В хирургии и медицинских исследованиях.

8.5.5. Понятие о жидких кристаллах.

Особый вид свечения создают жидкие кристаллы, которые являются *особым состоянием некоторых органических веществ.*

Жидкие кристаллы обладают, с одной стороны, текучестью жидкостей, а с другой стороны, сохраняют определённую упорядоченность в расположении молекул и анизотропию ряда физических свойств, характерную для твёрдых кристаллов.

Существует целый ряд жидких кристаллов некоторых соединений в интервале температур от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$.

Основным признаком структуры жидких кристаллов является палочкообразная форма их молекул.

Изменение ориентации этих молекул под воздействием электрических и магнитных полей, оптического излучения, при изменении температуры и т.д. создает большие возможности их практического использования.

Свойство жидких кристаллов изменять свой цвет при изменении температуры на доли градуса используется в **медицине** (определение температуры определённых участков тела) и в **технике** (визуализация ИК, СВЧ и других видов излучения, контроль качества микроэлектронных схем и т.д.).

Электрооптические свойства жидких кристаллов широко используются в **системах обработки и отображения информации**, в **буквенно-цифровых индикаторах** (электронные часы, микрокалькуляторы и т.д.), в **плоских телеэкранах** и **компьютерных мониторах**.