

## Люминесценция в полупроводниках

Рустамжон Ўктамович Сиддиқов  
sidrus1073@mail.ru

Кокандский филиал Ташкентского государственного технического  
университета имени Ислама Каримова

**Аннотация:** В статье приведены рассуждения о излучения и поглощения света в твердых телах и о явление люминесценции в полупроводниках.

**Ключевые слова:** полупроводник, люминесценция, рекомбинация, люминофор, уровень Ферми, спектр излучения

## Luminescence in semiconductors

Rustamjon O'ktamovich Siddiqov  
sidrus1073@mail.ru

Kokand branch of Tashkent State Technical University

**Abstract:** The article presents arguments about the emission and absorption of light in solids and the phenomenon of luminescence in semiconductors.

**Keywords:** semiconductor, luminescence, recombination, phosphor, Fermi level, emission spectrum.

Физической основой излучения и поглощения света (электромагнитного излучения в видимом и близком к нему ультрафиолетовом и инфракрасном спектре) в твердых телах является рекомбинация и генерация неравновесных носителей, поскольку переходы электронов между состояниями происходят либо с испусканием, либо с поглощением квантов света. Для видимого и инфракрасного спектров излучения важны электронные переходы между валентной зоной и зоной проводимости. Электронные переходы между состояниями зоны проводимости и более глубоких энергетических зон в твердых телах сопровождаются поглощением или испусканием квантов в рентгеновском диапазоне спектра.

Процессы, приводящие к рекомбинационному излучению в полупроводниках, как правило, представляют собой совокупность нескольких явлений. Возникновение неравновесных носителей под воздействием возбуждения может сопровождаться диффузией носителей заряда, дрейфом их в

электрическом поле, захватом на ловушки и т.д. *Явление рекомбинационного излучения в полупроводниках получило название люминесценции.*

При люминесценции каждый из актов возбуждения и излучения разделен промежуточными процессами, что приводит к конечным значениям длительности послесвечения. Для большинства твердых тел люминесцентные свойства выражены очень слабо. Легирование вещества специальными примесями с целью повышения эффективности люминесценции называется активацией, а сами примеси - активаторами люминесценции. Активированные диэлектрики, обладающие высокой эффективностью люминесценции в видимой области спектра, называются *кристаллофосфорами* или *люминофорами*. Элементарными процессами, обуславливающими люминесценцию в таких веществах, обычно являются внутрицентровые оптические переходы, т.е. электронные переходы между энергетическими уровнями, принадлежащими иону (или атому) активатора. Такую люминесценцию иногда называют *мономолекулярной*.

Рассмотрим процессы, определяющие люминесценцию полупроводников. Их особенностью является то, что возбужденные носители заряда могут быть как свободными, т.е. находиться в разрешенных зонах, так и связанными, т. е. локализованными на дефектах (в том числе на примесях). После того как в полупроводнике тем или иным путем созданы неравновесные носители заряда, в большинстве случаев довольно быстро (за  $10^{-11}$  -  $10^{-13}$  с) устанавливается *квазиравновесие* отдельно в валентной зоне и в зоне проводимости. Неравновесные носители за очень короткий промежуток времени приобретают температуру, равную температуре решетки, и большую часть времени свободного существования в зоне проводят в состояниях, не отличающихся от равновесных.

Таким образом, в первом приближении можно считать, что генерация неравновесных носителей приводит лишь к изменению концентрации свободных носителей заряда, в то время как распределение этих носителей по энергии в зонах и средняя кинетическая энергия частиц остаются неизменными. При этом распределение неравновесных носителей заряда по энергии в каждой из зон можно характеризовать, как и для равновесного состояния, функцией Ферми - Дирака, однако с несколько иными значениями входящих в неё параметров.

Напомним, что статистика Ферми - Дирака справедлива лишь для термодинамически равновесных систем. Для неравновесных систем с нормальным распределением частиц по состояниям в каждой из зон используют функцию Ферми - Дирака, в которой энергия Ферми заменяется величиной  $F^*$ , называемой *квазиуровнем Ферми*.

В отличие от равновесного состояния положения квазиуровней Ферми для электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне различны и обозначаются  $F_n^*$  и  $F_p^*$ , соответственно. Тогда распределение носителей заряда и их концентрации в каждой из зон можно выразить соотношениями:

$$f_n = \frac{1}{e^{\frac{E_n - F_n^*}{kT}} + 1}; \quad f_p = \frac{1}{e^{\frac{F_p^* - E_p}{kT}} + 1}. \quad (1a)$$

Если распределение носителей в каждой из зон невырождено, то вместо распределения Ферми можно записать распределение Больцмана. Тогда

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - F_n^*}{kT}}; \quad p = N_v e^{-\frac{F_p^* - E_v}{kT}}. \quad (1б)$$

Здесь  $E_n$  и  $E_p$  – энергии электронов и дырок в зонах, отсчитанных от дна зоны проводимости  $E_c$  и потолка валентной зоны  $E_v$ , соответственно;  $f_n$  и  $f_p$  – функции распределения Ферми-Дирака.

Физический смысл введенных квазиуровней Ферми для электронов и дырок поясняет рис. 1. Естественно, что положения квазиуровней Ферми  $F_n^*$  и  $F_p^*$  зависят от интенсивности возбуждения. В отсутствие возбуждения квазиуровни Ферми для электронов и дырок совпадают и их положение определяется обычным уровнем Ферми. С увеличением интенсивности возбуждения возрастает концентрация неравновесных носителей заряда в каждой из зон, а, следовательно, расстояние между квазиуровнями Ферми.

Строго говоря, квазиуровень Ферми характеризует заполнение энергетических уровней, лежащих только между ним и границей соответствующей зоны. Заполнение уровней, распределенных между ними, устанавливается процессами рекомбинации.

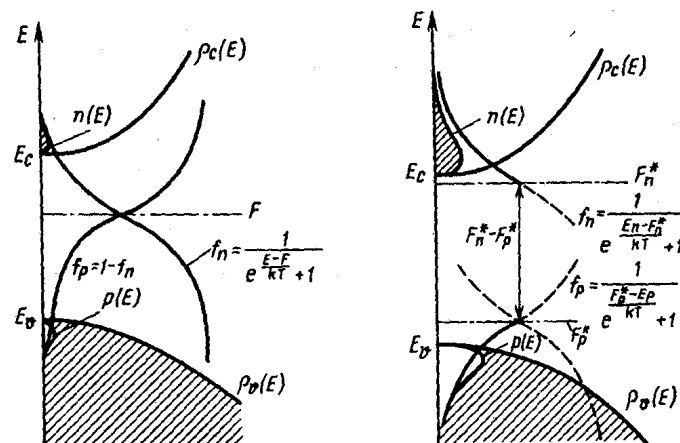


Рис. 1. Распределение носителей заряда по энергии: а - в равновесном состоянии; б - в неравновесном состоянии при наличии возбуждения

Люминесценция в полупроводниках может быть обусловлена различными по своей природе электронными переходами между валентной зоной и зоной проводимости. В зависимости от начального и конечного состояния различают семь типов переходов:

A - межзонные переходы, т.е. переходы электронов между состояниями, расположенными в зоне проводимости и запрещенной зоне;

B - внутрizonные переходы, т. е. переходы электронов между состояниями, расположенными только в зоне проводимости или только в запрещенной зоне;

C - переходы между примесными состояниями, энергетические уровни которых расположены в запрещенной зоне;

D - переходы между примесными состояниями и состояниями для электронов в зоне проводимости или дырок в валентной зоне;

E - переходы с участием экситонов, т.е. переходы электронов между экситонным состоянием и состояниями, расположенными в валентной зоне, или для связанных экситонов с состояниями, расположенными в запрещенной зоне;

I - внутрицентровые излучательные переходы, т.е. электронные переходы между двумя энергетическими уровнями, принадлежащими одному центру (рис. 2.).

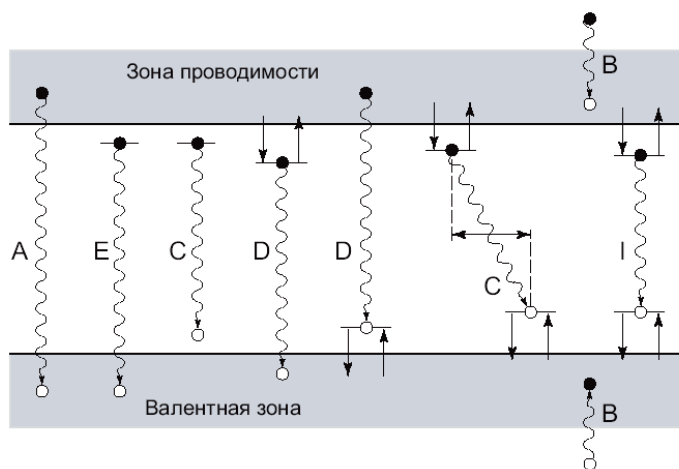


Рис. 2. Схематическое изображение процессов излучательной рекомбинации в полупроводниках при различных механизмах рекомбинации

Для оптоэлектронных устройств наиболее важными являются оптические переходы типа A, типа E и типа D. Межзонные переходы типа A обуславливают наиболее сильное поглощение или испускание света, с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны:  $\hbar\omega > E_g$ . Эти оптические переходы также называют *фундаментальными*.

Поскольку процессы испускания и поглощения фотона определяются аналогичными электронными переходами, каждому из процессов излучательной рекомбинации можно сопоставить такой же процесс оптического поглощения.

Отметим особенности указанных выше наиболее важных для оптоэлектроники механизмов люминесценции.

Переходы типа А - *собственная излучательная рекомбинация зона-зона* соответствует случаю, когда свободные электрон и дырка непосредственно рекомбинируют друг с другом. Она доминирует в том случае, когда концентрации свободных электронов и дырок велики, что имеет место в узкозонных материалах. В зависимости от энергетического расстояния между зонами излучательная рекомбинация наблюдается от инфракрасной до рентгеновской области спектра, включая видимую и ультрафиолетовую области.

Переходы типа Е - *излучательная рекомбинация свободных экситонов*. Экситон представляет собой связанное состояние электрона и дырки, возникающее в результате кулоновского притяжения их друг к другу. Образовав экситон, электрон и дырка движутся по кристаллу как единое целое. Вероятность излучательной рекомбинации через экситонные состояния оказывается выше вероятности переходов зона-зона.

Излучательная рекомбинация связанных экситонов возникает в случае, когда пара электрон-дырка перед рекомбинацией связывается на примесном центре (или на другом дефекте), а последующий излучательный переход происходит как переход центра из возбужденного состояния в равновесное. Такой механизм излучательной рекомбинации может быть достаточно эффективен. Он особенно важен в полупроводниках с непрямой структурой энергетических зон, поскольку вероятность излучательной рекомбинации через такой центр существенно больше вероятности межзонных переходов.

Переходы типа D - *излучательная рекомбинация свободных носителей заряда на связанных состояниях*. Излучательная рекомбинация зона-примесь (или примесь-зона) вызвана переходами носителей из одной энергетической зоны на примесные уровни вблизи противоположной зоны. Такие переходы наиболее эффективны в полупроводниках с прямой структурой зон, содержащих примеси. В кристаллах арсенида галлия они совместно с межзонными переходами обеспечивают внутренний квантовый выход люминесценции при комнатной температуре, близкий к единице.

*Локальные центры, участвующие в рекомбинации, называются рекомбинационными центрами или ловушками рекомбинации.* Чаще всего в качестве таких центров выступают примесные состояния, и поэтому такая рекомбинация получила название *примесной рекомбинации*. Очевидно, переходы D на рис 1.8 эквивалентны. Схемы переходов D описывают рекомбинацию электронно-дырочной пары, когда один из носителей заряда в этой паре свободен, а другой связан на локальном рекомбинационном центре.

Интенсивность излучательных примесных переходов зависит не только от концентрации примесей, с помощью которой идут излучательные переходы, но и от заполнения этих и соседних с ними уровней примесных состояний в запрещенной зоне. Заполнение же примесных состояний определяется положением уровня Ферми в запрещенной зоне полупроводника. Изменяя положение уровня Ферми с помощью введения дополнительной легирующих примесей, можно влиять на интенсивность примесных излучательных переходов.

### **Использованная литература**

1. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высш. школа, 2001.
2. Звелто О. Принципы лазеров. СПб.: Изд-во «Лань», 2008.
3. Киселев Г.Л. Квантовая и оптическая электроника. СПб.: Изд-во «Лань», 2011.
4. Сиддиқов, Р. Ў. (2021). СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ И ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК ХАЛЬКОГЕНИДОВ КАДМИЯ. Science and Education, 2(3), 221-225.