

Санкт-Петербургский государственный университет

Физический факультет
Кафедра физики твердого тела

В.Ф. Агекян, Н.Р. Григорьева

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

Учебно-методическое пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2008

Утверждено методической комиссией физического факультета СПбГУ

Рецензент доктор физ.-мат. наук С.Ю. Вербин

В учебно-методическом пособии рассмотрены различные типы излучательной рекомбинации в легированных полупроводниковых кристаллах. Приведены основные теоретические модели, описывающие электронную структуру и оптические свойства полупроводниковых кристаллов, содержащих примеси, анализируются результаты некоторых экспериментальных исследований люминесценции полупроводниковых кристаллов. Пособие рассчитано на студентов и аспирантов, специализирующихся в области оптики твердого тела.

Поддержано Министерством Науки и Образования РФ (грант РНП 2.1.1.362).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Основные модели электронного спектра точечных дефектов	6
Глава 2. Оптические переходы примесь-зона с участием изолированных точечных дефектов	27
Глава 3. Люминесценция донорно-акцепторных пар	49
Глава 4. Люминесценция свободных экситонов и экситонно-примесных комплексов	73
Глава 5. Электронно-колебательные спектры точечного дефекта	99
Глава 6. Люминесценция кристаллов с глубокими центрами (статистика Шокли-Рида)	120
Литература	127

Введение

Переход системы атомов из одного (стационарного) квантового состояния в состояние с меньшей энергией сопровождается излучением *энергии*, в том числе и *в виде фотонов*. Этот процесс может носить как равновесный, так и неравновесный характер.

Излучение тела, находящегося *в равновесии* с окружающей средой, называют тепловым излучением. Спектральный состав такого излучения определяется только температурой T и описывается известной формулой Планка:

$$U_{\omega}(T) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{k_B T}\right) - 1},$$

где k_B — постоянная Больцмана. Эта формула, в частности, устанавливает связь между температурой тела и энергией фотона, соответствующей максимуму теплового излучения.

Люминесценцией называется *неравновесное* излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением при условии, что это избыточное излучение обладает конечной длительностью, превышающей период световых колебаний. Неравновесный характер такого излучения — главное отличие люминесценции от теплового электромагнитного излучения тела. Для того чтобы можно было наблюдать люминесценцию, необходимо привести систему в неравновесное (возбужденное) состояние.

Существуют различные способы возбуждения люминесценции:

- квантами оптического диапазона — фотолюминесценция;
- быстрыми частицами (электроны и т.д.) — катодолюминесценция;
- Γ -лучами и X -лучами — радиолюминесценция и рентгенолюминесценция;
- приложением электрического поля (инжекция электронов и дырок) — электролюминесценция;
- химическим процессом — хемилюминесценция;
- механическим воздействием — триболюминесценция.

Далее мы будем рассматривать излучение, вызванное оптическим возбуждением системы светом — электромагнитным волнами оптического диапазона. Излучение, возникающее при взаимодействии света с молекулами и кристаллами, называют вторичным свечением. Вторичное свечение подразделяется на релеевское рассеяние (процесс поглощения и излучения когерентно связаны), комбинационное рассеяние (происходит неупругое рассеяние фотонов на фононах), и люминесценцию — термализованную и, горячую.

При рассмотрении люминесценции процессы поглощения и испускания света выступают как независимые. В механизме люминесценции можно выделить три этапа.

Первый этап — поглощение энергии и переход системы в неравновесное состояние. *Второй этап* — безизлучательная релаксация, в ходе которой система переходит в возбужденное стационарное состояние с более низкой энергией. *Третий этап* — переход системы в равновесное состояние с испусканием кванта света — излучательная рекомбинация.

Энергия испущенного при переходе кванта определяется энергетическим интервалом между начальным и конечным состояниями системы. Спектральный состав, интенсивность и время жизни излучательной рекомбинации зависят от энергии уровней системы, определяющих ее начальное и конечное состояния, и от природы этих уровней, от параметров конкурирующих процессов.

Если акт излучения следует за актом поглощения с интервалом не более 10^{-7} с, такое излучение называют **флюоресценцией**. Если свечение наблюдается после прекращения возбуждения с большой задержкой (от тысячных долей секунды до часов), то такой процесс называют **фосфоресценцией**. Такое деление является, конечно, условным.

Для чистых полупроводников основным механизмом излучения является рекомбинация электрона и дырки типа зона-зона. Следовательно, главный фактор, определяющий спектральный состав излучения полупроводника, — ширина запрещенной зоны E_g . В принципе электрон может перейти из валентной зоны в зону проводимости и тогда, когда тело находится в равновесном состоянии, то есть за счет энергии тепловых колебаний кристаллической решетки. Однако вероятность такого события пропорциональна $\exp(-E_g/k_B T)$, так что при величине E_g порядка 2 эВ для комнатной температуры вероятность исчезающе мала.

При тепловых переходах соотношение между переходами из валентной зоны в зону проводимости и обратно удовлетворяет принципу детального равновесия. При наличии внешних воздействий на полупроводник к тепловым переходам добавляются переходы, индуцированные этими воздействиями. В этом случае принцип детального равновесия уже не выполняется. Например, при освещении кристалла электрон может получить энергию кванта света и совершить переход из валентной зоны в зону проводимости.

В настоящем учебном пособии рассматриваются различные типы излучения света реальными кристаллами, содержащими примеси и дефекты. Естественно, что для понимания механизмов и параметров излучения необходимо рассматривать и процессы поглощения.