

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

И.С. Коровченко, А.А. Потапов, Г.К. Усков

# **ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

Учебное пособие

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2015

## Содержание

1. Оптоэлектроника .....	4
1.1. Физика явлений оптоэлектронных эффектов в твердых телах .....	4
1.1.1. Инжекционная люминесценция .....	8
1.1.2. Предпробойная люминесценция .....	9
1.1.3. Возбуждение переменным напряжением .....	11
1.2. Светодиоды и лазерные диоды – генераторы динамических неоднородностей оптоэлектроники .....	12
1.2.1. Светодиоды .....	12
1.2.2. Лазерные диоды .....	15
1.3. Волоконно-оптические линии связи .....	17
1.4. Фотодетекторы .....	19
1.5. Устройства памяти в оптоэлектронике .....	20
1.6. Оптическая обработка информации в оптоэлектронике .....	21
1.6.1. Оптроны .....	21
1.6.2. Оптические транспаранты .....	26
1.7. Перспективы развития оптоэлектроники .....	27
2. Библиографический список .....	30

одной из зон возникает, если энергетический уровень центра расположен ближе к этой зоне, чем к другой. Если же уровень расположен далеко от зон, то центр способен лишь захватывать электроны из зоны проводимости и дырки из валентной зоны. В результате этого выделяется некоторая энергия, а оба заряда нейтрализуют друг друга. Такой процесс называется рекомбинацией.

Разделение центров на центры захвата (ловушки) и центры рекомбинации очень удобно при рассмотрении кинетики люминесценции, однако оно весьма не строго, так как далеко не всегда один из процессов – тепловое освобождение зарядов или их рекомбинация значительно преобладают над другим. Строго говоря, они оба происходят при любых условиях, но в разных пропорциях. Какой из этих процессов станет более интенсивным – зависит от температуры и концентрации свободных носителей заряда. Так, при низких температурах, когда вероятность термического освобождения электронов мала, ловушка может стать центром рекомбинации. Таким же образом влияет и увеличение концентрации свободных зарядов, так как при этом также возрастает отношение вероятности рекомбинации локализованных зарядов к вероятности их теплового освобождения. Механизм фотолюминесценции кристаллофосфоров, в общих чертах, состоит в следующем.

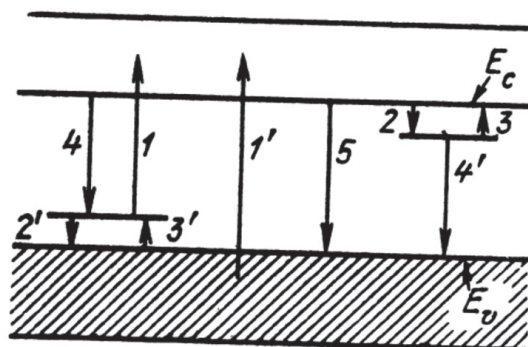


Рис. 1.1. Энергетическая диаграмма переходов в полупроводнике

Кванты возбуждающего света поглощаются центрами люминесценции (переход 1 на рис. 1.1, на рисунке стрелками указаны переходы электронов). Дырки совершают переход в обратном направлении или решеткой основного вещества (переход 1'). В результате этого происходит разделение зарядов. В первом случае один из них оказывается свободным, а другой – локализованным на центре люминесценции. Во втором случае оба носителя заряда получают свободными. Затем свободные носители заряда локализуются на ловушках и центрах люминесценции (переходы 2 и 2'). На этом заканчивается процесс возбуждения кристаллофосфора. О кристаллофосфоре, находящемся в таком состоянии, говорят, что он запас светосумму, понимая под этим, что в нем имеется некоторый запас разделенных зарядов, которые могут при рекомбинации дать соответствующее число квантов света.

Заряды, локализовавшиеся на уровнях примесей во время возбуждения, постепенно освобождаются под влиянием тепловых колебаний (переходы 3 и 3'), некоторые из них встречаются с зарядами противоположного знака и воссоединяются с ними – рекомбинируют (переходы 4 и 4'), а остальные опять захватываются ловушками. Рекомбинация обычно происходит в местах нарушения правильной кристаллической решетки – атомах примеси, пустых узлах решетки, междоузельных атомах и т. п. Если эти центры рекомбинации способны превращать в свет выделяющуюся при рекомбинации энергию, они называются центрами люминесценции, или центрами свечения. Центры рекомбинации, не обладающие этой способностью, называются центрами тушения, так как энергия, выделяющаяся при рекомбинации на этих центрах, превращается в тепло и тем самым безвозвратно теряется для люминесценции.

Если концентрация свободных зарядов того и другого знака достаточно велика, то заметную роль может играть также рекомбинация зарядов, когда они оба находятся в свободном состоянии (переход 5). В этом случае обычно тоже происходит испускание квантов света.

Если выключить возбуждающий свет, то люминесценция будет продолжаться в течение некоторого времени (иногда очень длительного), постепенно ослабевая по мере истощения запаса разделенных зарядов. Для рекомбинационного механизма люминесценции характерно не экспоненциальное спадание яркости за время послесвечения: в начале послесвечения яркость спадает быстро, а затем все медленнее и медленнее. Такую кривую невозможно охарактеризовать только величиной постоянной времени  $\tau$ , поэтому надо очень осторожно относиться к утверждениям, что люминесценция данного кристаллофосфора имеет данное  $\tau$ . Обычно это просто значит, что на некотором участке кривую затухания можно аппроксимировать экспонентой с этим  $\tau$ . Чтобы это утверждение приобрело смысл, необходимо выяснить о каком интервале времени (или яркости) идет речь. Нередко хорошо выраженный экспоненциальный участок бывает только в начале затухания, где яркость спадает всего в 23 раза, а дальше спад яркости замедляется.

При описанном выше механизме люминесценции причина такого замедления затухания заключается в следующем. Скорость рекомбинации (т. е. число актов рекомбинации, происходящее в единицу времени) пропорционально произведению концентраций рекомбинирующих «партнеров», например, локализованных дырок и свободных электронов (или свободных дырок и локализованных электронов). В результате рекомбинации происходит уменьшение концентрации разделенных зарядов, по мере которого им становится все труднее «найти» друг друга, и поэтому они все большее число раз задерживаются на ловушках, прежде чем им удастся рекомбинировать.

Иногда возможен несколько иной механизм люминесценции, но приводящий к качественно таким же результатам, как и в первом из рассмотренных нами случаев. Дело в том, что даже когда электроны и дырки локализованы на примесях, они могут рекомбинировать друг с другом, минуя зону проводимости. Такой процесс называется межпримесной рекомбинацией. При этом электрон совершает так называемый туннельный переход от донора к акцептору (уровень акцептора обычно расположен ниже уровня донора). Этот переход может сопровождаться испусканием света. Вероятность перехода быстро убывает с ростом расстояния между донором и акцептором. Поэтому, после прекращения возбуждения, рекомбинация происходит сначала в «ближних» парах (т. е. в таких, в которых донор и акцептор расположены близко друг к другу), а потом во все более дальних. Затухание свечения происходит при этом также по неэкспоненциальному закону, близкому к описанному выше.

На далеких стадиях послесвечения обязательно наступает момент, когда непрорекомбинировавшими останутся электроны и дырки, локализованные на донорах и акцепторах, расположенных столь далеко друг от друга, что вероятность туннельного перехода заряда между ними станет меньше вероятности термического освобождения одного из зарядов. Начиная с этого момента, вероятность межпримесной рекомбинации перестает определять длительность послесвечения, и затухание пойдет по обычной рекомбинационной схеме, описанной выше.

В некоторых кристаллофосфорах возможен также принципиально другой – нерекombинационный механизм люминесценции. В этом случае поглощение возбуждающего света происходит в центрах люминесценции и не приводит к освобождению зарядов. Энергия поглощенного кванта не выходит за пределы центра люминесценции и в нем же почти целиком превращается в энергию испускаемого кванта. В несколько измененном виде этот механизм люминесценции может быть в некоторых случаях осуществлен также и при электровозбуждении.

### ***1.1.1. Инжекционная люминесценция***

Инжекционная электролюминесценция твердых тел была открыта в 1923 году О. В. Лосевым при изучении кристаллических детекторов из карбида кремния и правильно им объяснена, но интенсивные исследования этого явления начались лишь в пятидесятых годах XX века. Инжекционной электролюминесценцией называется люминесценция, при которой светящееся тело черпает энергию непосредственно из электрического поля. Свечение при электровозбуждении возникает обычно тем же путем, что и при фотовозбуждении, – рекомбинационным или не рекомбинационным. Различие состоит, главным образом, в том, каким образом тело поглощает энергию, а не в том, как оно превращает её в свет.