

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- а) ознакомление с явлениями фото- и электролюминесценции в полупроводниках;
- б) воздействие спектральных характеристик фото- и электролюминесценции полупроводников.

Приборы и оборудование, используемые в работе:

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

Рекомбинационное излучение - люминесценция - в твердых телах представляет собой явление, обратное поглощению. В полупроводниках оно обусловлено электронными переходами: зона проводимости - валентная зона, зона проводимости - акцепторный уровень, донорный уровень - валентная зона, донорные уровни - акцепторные уровни и переходами с промежуточным актом связывания носителей в экситонное состояние.

При этом спектр излучаемого света состоит из одной или нескольких полос. Исследование спектров рекомбинационного излучения может дать информацию о параметрах зонной модели, о положении локальных уровней, вносимых примесями в запрещенную зону, а также энергетический спектр экситонов, фононов и др.

Процессы, приводящие к рекомбинационному излучению, начинаются с возбуждения свободных носителей. Результатом этого процесса является возникновение неравновесных носителей заряда одного или двух типов (электронов и дырок).

Основными способами возбуждения неравновесных носителей являются следующие: 1) возбуждение потоком фотонов - фотолюминесценция; 2) возбуждение потоком электронов - катодолуминесценция; 3) возбуждение путем инжекции неосновных носителей через $p - n$ -переход - электролюминесценция; 4) возбуждение сильным электрическим полем - электролюминесценция типа Дестрио.

Остановимся на двух способах возбуждения полупроводника -фотолюминесценции и электролюминесценции.

Фотолюминесценция

Спектр излучения ФЛ, как правило, смещен в длинноволновую область по сравнению со спектром поглощения, т.е. излучаемая энергия меньше поглощаемой. Разницу этих энергий называют сдвигом Стокса, она свидетельствует о том, что часть поглощенной

центром энергии передается в виде фононов решетке кристалла, окружающей центр люминесценции.

Любая люминесценция характеризуется двумя основными параметрами - интенсивностью и спектром люминесценции, которые зависят от наличия в нем примесей (т.н. активаторов). Примесные уровни могут быть поглощающими, промежуточными или излучательными. Роль этих уровней могут выполнять также валентная зона и зона проводимости. В полупроводниках возможны следующие механизмы рекомбинации.

Рекомбинация свободных электронов и дырок

Основной вопрос, возникающий при рассмотрении процесса рекомбинации зонных электрона и дырки - это вопрос о том, в каком виде выделяется освобождающаяся при рекомбинации энергия.

Если акт рекомбинации сопровождается появлением кванта света, то одновременное выполнение законов сохранения энергии и импульса обеспечивается либо тем, что рекомбинируют электрон и дырка с равными (и противоположно направленными) импульсами и при этом квант света с импульсом, примерно равным нулю, уносит всю энергию, выделяющуюся при рекомбинации, либо акт рекомбинации происходит в виде соударения трех "тел": электрона, дырки и фонона. В этом случае фонон, получая (или отдавая) небольшую долю выделяющейся энергии, может приобрести (или передать) практически весь импульс и тем самым обеспечить возможность рекомбинации (с излучением фотона) электронов и дырок с разными импульсами.

Два указанных выше варианта рекомбинации обратны процессам поглощения света, приводящим к так называемым "прямым" и "непрямым" фотопереходам электрона из валентной зоны в зону проводимости.

В полупроводнике с прямой запрещенной зоной переходы с сохранением импульса связывают состояния, имеющие одинаковые значения квазиимпульса (рис.1а). Следовательно, как и при соответствующих процессах поглощения, спектр излучения описывается выражением:

$$I(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2}$$

где $I(h\nu)$ - интенсивность излучения, B - вероятность перехода зона - зона, E_g - ширина запрещенной зоны, $h\nu$ - энергия испускаемого фотона.

При возрастании скорости возбуждения, а также при увеличении температуры заполняются более высокие состояния в зоне, обуславливая излучение при более высоких энергиях фотонов. Таким образом, для рекомбинации свободных носителей характерен

зависящий от температуры высокоэнергетический хвост, в то время как низкоэнергетический край круто обрезан при энергии $h\nu = \hat{A}_g$.

В полупроводнике с непрямой запрещенной зоной все заполненные верхние состояния (т.е. состояния в зоне проводимости) могут взаимодействовать со всеми нижними пустыми состояниями (т.е. с состояниями в валентной зоне), однако, в переходах должны принимать участие промежуточные процессы, которые обеспечивают сохранение импульса (рис.1, б). Наиболее вероятным промежуточным процессом является эмиссия фонона.

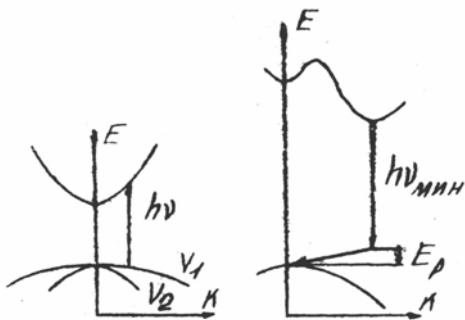


Рис.1. Прямые (а) и не прямые (б) излучательные переходы.

В материале с непрямой запрещенной зоной при высоких уровнях возбуждения, когда увеличивается населенность зон и квазиуровни Ферми смещаются глубже в зоны, спектр излучения включает все возможные переходы между любыми двумя состояниями, отстоящими на данную величину \hat{A}_g , несмотря на разницу в импульсе между начальным и конечным состояниями. Спектр излучения описывается выражением:

$$I(h\nu) = V'(h\nu - E_g + E_p)^2$$

где E_p - энергия фонона, V' - вероятность перехода.

Так как вероятность акта рекомбинации, происходящего в виде соударения трех "тел", намного ниже чем двух, то $V' \ll \hat{A}$ и, следовательно, интенсивность люминесценции в материалах с непрямой запрещенной зоной намного меньше, чем в прямозонных.

Переход "зона-примесь"

В полупроводнике p -типа возможны излучательные переходы электронов из зоны проводимости на акцепторный уровень, в полупроводнике n -типа - с донорного уровня в валентную зону. Причем в первом случае акцепторный уровень вначале захватывает дырку из валентной зоны, которая затем рекомбинирует с электроном) из зоны проводимости, а во втором случае донорный уровень вначале захватывает электрон из зоны проводимости, после чего следует его рекомбинация с дыркой валентной зоны.

При прямых переходах энергия излучаемого кванта света

$$h\nu = E_g - E_i,$$

где E_i - энергия ионизации примесного центра (донора или акцептора).

При непрямым же переходах

$$h\nu = E_g - E_i + E_p$$

где E_p - энергия фонона, принимающего участие в рекомбинации.

Таким образом, максимум спектра люминесценции при переходах "зона-примесь" сдвинут в длинноволновую область относительно максимума спектра люминесценции при переходах зона-зона.

Переход донорный уровень - акцепторный уровень

Если в полупроводнике присутствуют доноры и акцепторы с энергией ионизации E_d и E_a соответственно, то они могут образовывать пары. Если донор и акцептор разделены расстоянием r , то энергия излучаемого кванта света при рекомбинации электрона донора с дыркой акцептора выражается формулой

$$h\nu = E_g - E_a - E_d + (\hbar^2 / \chi r)$$

где χ - диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Поскольку донорные и акцепторные атомы обычно находятся в узлах решетки, то возможны только некоторые дискретные значения r . Следовательно, будет наблюдаться серия узких линий излучения, соответствующих этим r .

Электролюминесценция

При смещении p - n -перехода в прямом направлении инжектированные носители рекомбинируют в самом переходе или узкой области вблизи p - n -перехода, определяемой длиной диффузионного смещения неосновных носителей заряда. Рекомбинация неосновных носителей может сопровождаться либо передачей выделяющейся энергии решетке кристалла (безизлучательная рекомбинация), либо излучением квантов света с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны полупроводника (излучательная рекомбинация).

Обычно излучательная рекомбинация наблюдается или в p - или в n -области полупроводника. Поэтому важной характеристикой диода является коэффициент инжекции γ , равный отношению тока неосновных носителей в область полупроводника, где происходит излучательная рекомбинация, к полному току через p - n -переход. То есть, если излучательная рекомбинация происходит в p -области, то:

$$\gamma = I_{n0} / (I_{n0} + I_{p0}),$$

где I_{n0} - электронная компонента тока, а I_{p0} - дырочная компонента тока через p - n -переход. Если же излучательная рекомбинация происходит в n -области, то:

$$\gamma = I_{\delta 0} / (I_{n0} + I_{p0}).$$

Схематически процесс возбуждения электролюминесценции в полупроводнике изображен на рис.2.

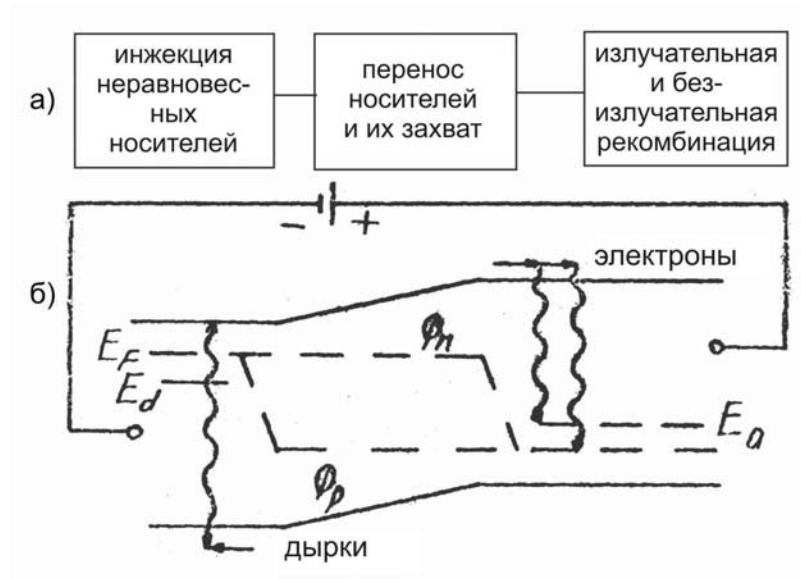


Рис.2. Разделение возбуждения люминесценции на элементарные акты (а), зонная диаграмма $p-n$ - перехода при прямом смещении (б); E_F ϕ_n ϕ_p -уровень й квазиуровни Ферми, E_d - донорные уровни, E_a - акцепторные уровни.

Измерительная установка и методика измерений

Блок-схема установки для исследования спектров фото- и электролюминесценции представлена на рис.3.

Исследуемый образец O , установленный в криостат K , возбуждается с помощью лазера ЛГ. Лазерное излучение модулятором M модулируется в световые импульсы с частотой 160 Гц. Линза L_1 служит для фокусировки луча на исследуемый образец. Исследуются фото- и электролюминесценция полупроводников в пределах от температуры от 77 до 300 К. Температура образца измеряется термопарой TP и микровольтметром $B7-23$. Рекомбинационное излучение кристалла, возбужденное лазерным лучом, фокусируется конденсором L_2 , на входную щель монохроматора МДР-2. Монохроматическое излучение из монохроматора попадает на фотоэлектронный умножитель ФЭУ-28 (со спектральной областью чувствительности 0,4-1,1 мкм), преобразуется в электрический сигнал и подается на селективный усилитель $У2-8$. Для получения опорного сигнала используется вольфрамовая лампа и фотодиод. Спектры фотолуминесценции записываются самописцем $КСП-4$ после усиления и синхронного детектирования с помощью синхродетектора $B9-2$.

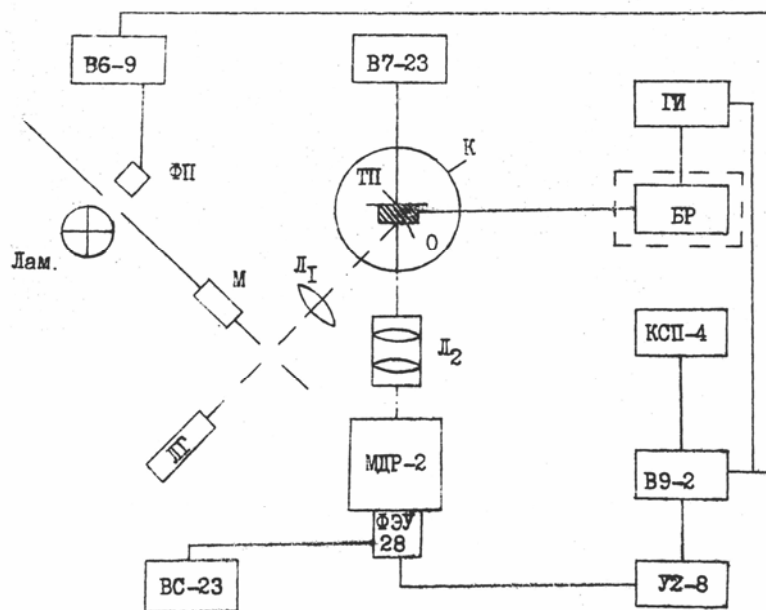


Рис.3. Блок-схема установки для исследования фото- и электролюминесценции.

В режиме измерения электролюминесценции переменное напряжение с генератора импульсов ГИ подается на блок возбуждения БР и в виде опорного сигнала на В9-2. С блока БР прямоугольные импульсы тока с частотой, заданной ГИ, подаются на образец О и возбуждают в нем электролюминесценцию. Далее схема регистрации излучения та же, что и при записи спектра фотолуминесценции.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ.

1. Исследование спектров ФЛ полупроводников.

1.1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности при работе в учебной лаборатории.

1.2. Включить в сеть У2-8, В6-9, КСП-4, В9-2, блок питания лазера, высоковольтный блок питания ФЭУ-28 (не включая высокого напряжения и дать прогреться приборам 25-30 мин).

1.3. Залить жидкий азот в криостат и встряхиванием добиться исчезновения центров кристаллизации.

1.4. Закрепить образец на держателе и погрузить его в жидкий азот.

1.5. Включить высокое напряжение на блоке питания ФЭУ.

1.6. Открыть оптические щели монохроматора, предварительно установив на нем показания барабана, соответствующие спектру ФЛ исследуемого образца.

1.7. Сфокусировать возбуждающий пучок света на образец с помощью линзы (Л). Ориентируя образец по отношению в лучу лазера, с помощью конденсора (Кон) добиться наибольшего сигнала ФЛ на У-2-8.

1.8. Регулируя ручкой "Фаза" на В9-2, получить максимальное отклонение по шкале прибора.

1.9. Включив автоматическую развертку МДР-2, записать спектр ФЛ исследуемого образца.

2. Исследование спектров ЭЛ полупроводников.

2.1. Выполнить пункты 3.1.1-3.1.6 предыдущего параграфа, исключая пункт 3.1.5.

2.2. Включить генератор ГИ.

2.3. Включить блок питания Б-5-43 и установить ток через диод 10 мА.

2.4. Вращая ручку "Фаза" на В9-2, добиться минимального отклонения на шкале прибора.

2.5. Записать на КСП-4 спектр ЭЛ исследуемого образца.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные способы возбуждения неравновесных носителей заряда в полупроводниках.
2. Каковы особенности рекомбинации носителей заряда в прямозонных и непрямозонных полупроводниках?
3. Чем отличается спектр люминесценции примесных полупроводников?
4. Что такое коэффициент инжекции?
5. Как отличается величина интенсивности люминесценции в материалах с прямой и непрямой шириной запрещенной зоной и почему?

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: "Энергия", 1976.
2. Берг А., Дин П. Светодиоды. - М.: "Мир", 1979.