

## Работа 5.10

### Определение ширины запрещенной зоны полупроводников по краю собственного поглощения

**Оборудование:** призмный монохроматор УМ-2, лампа накаливания, гальванометр, сернисто-кадмиевое фотосопротивление, выпрямитель, образец полупроводника (Se).

#### Введение

Одной из особенностей полупроводников является их способность увеличивать электропроводимость при воздействии на них излучения. Это явление получило название *внутреннего фотоэффекта*. Внутренний фотоэффект — это процесс возникновения в полупроводнике дополнительных неравновесных носителей заряда под действием света.

Дополнительную проводимость полупроводника, обусловленную воздействием на него света, называют *фотопроводимостью*. Фотопроводимость является непосредственным результатом поглощения света полупроводником. Явление поглощения света и возникновения фотопроводности можно объяснить на основе *зонной теории*.

Согласно зонной теории твердого тела кристаллы, в отличие от отдельных атомов и молекул, обладают не узкими энергетическими уровнями, а широкими полосами (*зонами*) допустимых значений энергии, отделенных одна от другой запрещенными зонами.

Каждая зона допустимых значений энергии соответствует определенному энергетическому уровню атомов, образующих кристалл. Расщепление энергетических уровней и образование энергетических зон происходит по причине взаимодействия атомов. Ширина зон определяется величиной энергии связи между атомами, т. е. зависит от расстояния между ними.

Количество уровней в зоне равно числу атомов, образующих кристалл ( $\approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ). В изолированном атоме разрешенные энергетические уровни могут быть заняты электронами или быть свободными. Соответственно в твердом теле энергетические зоны также могут иметь различное заполнение электронами, т. е. могут быть частично заполненными, полностью заполненными или свободными.

В соответствии с принципом Паули в одном и том же энергетическом состоянии может находиться не более одного электрона. Поэтому электроны в энергетических зонах располагаются каждый на своем уровне и заполняют почти все разрешенные зоны. В диэлектриках и полупроводниках (при низких

температурах) на заполнение верхней энергетической зоны электронами не хватает — она пустая (рис. 5.26, а).

Эта верхняя незаполненная зона называется *зоной проводимости*. Она отделена *запрещенной зоной* от последней заполненной (или почти заполненной) зоны, которая называется *валентной зоной*. В металлах валентная зона заполнена на половину (рис. 5.26, б).

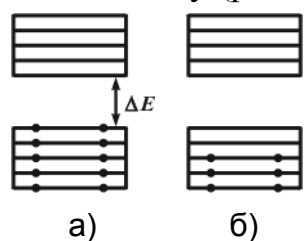


Рис. 5.26

Чтобы электрон мог участвовать в процессе электропроводности, он должен приобрести дополнительную энергию за счет электрического поля, т. е. перейти на более высокий энергетический уровень. Если все уровни в зоне уже заняты, то электрон не будет ускоряться полем до того времени, пока не перейдет в зону, где есть свободные уровни.

В металлах, в валентной зоне которых есть незаполненные уровни, электроны под воздействием поля могут увеличивать свою энергию и переходить на более высокие энергетические уровни, что приводит к возникновению электрического тока. В полупроводниках валентная зона от зоны проводимости отделена конечным интервалом энергии  $\Delta E$ . В этом случае, чтобы перевести электрон в зону проводимости, ему необходимо сообщить энергию, равную *ширине запрещенной зоны*  $\Delta E$ . Эта энергия может быть передана электрону за счет энергии теплового движения или при воздействии излучения. При поглощении полупроводником квантов излучения с энергией  $h\nu$ , которая превышает ширину запрещенной зоны ( $h\nu > \Delta E$ ), электроны валентной зоны переходят в зону проводимости. В валентной зоне образуется *дырка*. Таким образом, при поглощении света с энергией  $h\nu > \Delta E$  возникает *собственная проводимость полупроводника*. Поглощение света, вызывающее собственную проводимость, называется *собственным* или *фундаментальным*. Характерной особенностью собственного поглощения полупроводника является наличие *края полосы поглощения* со стороны более длинных волн. Если длина волны света, падающего на полупроводник, не настолько мала, чтобы вызвать собственную проводимость, то полупроводник для такого кванта света будет *прозрачным*. Однако прозрачность полупроводников в области длин волн, лежащих за краем собственного поглощения, наблюдается только в тех образцах, которые очищены от примесей. При наличии в полупроводнике достаточного количества примесей он бывает непрозрачным во всей области спектра почти до радиочастот. Объясняется это тем, что энергетические уровни атомов примесей располагаются в области запрещенных значений энергии (рис. 5.27) и, чтобы перейти электрону с *донорного* уровня в зону проводимости (рис. 5.27, а) или с валентной зоны на *акцепторный* уровень (рис. 5.27, б), необходима значительно меньшая энергия.

Поэтому *полосы примесного* поглощения расположены в более длинноволновой области спектра. У полупроводников, кроме собственного и примесного поглощения, наблюдается еще *экситонное* поглощение, поглощение свободными носителями заряда и решеткой. При расшифровке спектра поглощения необходимо учитывать, что различные виды поглощения могут накладываться один на другой и усложнять форму спектральной кривой.

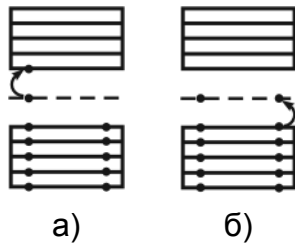


Рис. 5.27

Интенсивность света  $I$ , проходящего через образец толщиной  $d$ , определяется законом Бугера — Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения, зависящий от длины волны и свойств вещества образца.

Этот закон справедлив только для монохроматического излучения при перпендикулярном его падении на исследуемую поверхность образца и отсутствии отражения. Отклонение от этого закона может быть также вызвано неоднородностью поглощаемой среды и недостаточной параллельностью пучка. Если прологарифмировать соотношение (1), то получим выражение:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (2)$$

которое дает возможность определить коэффициент поглощения  $\alpha$ . Для этого необходимо измерить интенсивность монохроматического света  $I_0$ , падающего на образец, и интенсивность  $I$  света, прошедшего через него. Необходимо заметить, что формула (2) действительна только в случаях линейной оптики, т. е. когда  $\alpha$  не зависит от интенсивности светового потока.

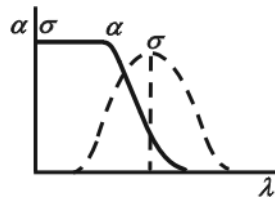


Рис. 5.28

Если интенсивность света не очень большая и при этом рассеивание и отражение света не учитывается, то формулу (2) можно использовать для определения зависимости коэффициента поглощения от длины волны. Зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  исследуемого вещества от длины волны излучения определяется *спектром поглощения*. Форма спектральной кривой собственного поглощения показана на рис. 5.28 (сплошная линия).

Пунктиром показана кривая спектральной зависимости световой проводимости  $\sigma$  в области собственного поглощения. В отличие от кривой  $\alpha(\lambda)$  кривая  $\sigma(\lambda)$  имеет максимум, т. е. при увеличении энергии фотонов, несмотря на то, что поглощение возрастает, фотопроводимость падает. Это вызвано тем, что при сильном поглощении генерация электронов и дырок под воздействием света происходит только в тонком поверхностном слое полупроводника. Положение

максимума кривой  $\sigma(\lambda)$  в случае собственного поглощения достаточно точно определяет край собственного поглощения (рис. 5.28). Это может использоваться и при определении ширины запрещенной зоны. Для этого достаточно определить длину волны, соответствующую максимуму фотопроводимости и определить  $\Delta E$  по формуле:

$$\Delta E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}. \quad (3)$$

**Описание установки и метода.** Для построения кривых спектральной зависимости коэффициента поглощения и фотопроводимости в работе используется монохроматор УМ-2, который дает возможность получать узкий пучок света определенной длины волны. Оптическая схема монохроматора приведена на рис. 5.29.

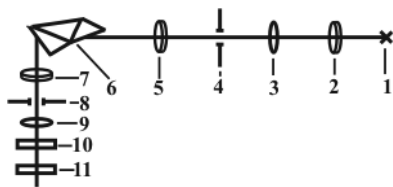


Рис. 5.29

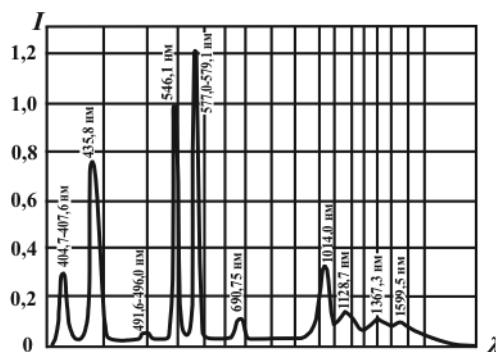


Рис. 5.30

Свет от источника 1 через конденсор 2, 3 и входное отверстие монохроматора 4 попадает на объектив коллиматора 5 и параллельным пучком проходит через дисперсионную призму 6. Под углом к пучку света, падающему на входное отверстие монохроматора, помещена выходная подзорная труба с объективом 7 и выходным отверстием 8. Свет, проходящий через линзу 9, падает на исследуемый образец 10 и попадает в фотоприемник 11. Поворотом призмы 6 относительно пучка света на выходном отверстии получаем свет разной длины волны. В качестве источника света используется вольфрамовая лампа накаливания, которая дает сплошной спектр, а в качестве фотоприемника — сернисто-кадмиевое фотосопротивление, которое включено

последовательно с источником питания и гальванометром. Градуировка монохроматора производится с помощью ртутной лампы, спектр излучения которой приведен на рис. 5.30.

## Порядок выполнения работы

1. Проверьте градуировку монохроматора. Для этого включите ртутную лампу и с помощью линзы сфокусируйте ее лучи на входное отверстие монохроматора. Вращением барабана установите его в таком положении, чтобы световой показатель на шкале гальванометра максимально отклонялся. Записывайте каждый раз показания барабана и гальванометра. Пользуясь градуировочной кривой монохроматора, определите соответствующие длины волн

и сравните их с данными графика, представленного на рис. 5.30. При необходимости внесите поправки.

2. Включите лампу накаливания и сфокусируйте ее нить на входное отверстие монохроматора. Установите необходимую ширину входного и выходного отверстий. Между входным отверстием и фотоприемником разместите исследуемый образец.

3. Включите в цепь гальванометр и подайте напряжение на фотосопротивление.

4. Измерьте темновой фототок.

5. Исследуйте зависимость интенсивности света  $I_0$  и  $I$  от длины волны последовательным изменением показаний барабана  $N$  через каждые 50 делений в интервале от 2200 до 3500. При этом следует исходить из того, что фототок, измеряемый гальванометром, пропорционален интенсивности света.

6. По формуле (2) вычислите коэффициент поглощения  $\alpha$  для разных значений  $\lambda$  с учетом того, что  $d = 10^{-5}$  см. Результаты измерений и расчетов запишите в таблицу:

№ п/п	Деления барабана ( $N$ )	$\lambda$ , нм	$I_0$	$I$	$\ln \frac{I_0}{I}$	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>
-------	--------------------------	----------------	-------	-----	---------------------	-----------------------------

7. Постройте спектральную кривую поглощения  $\alpha = f(\lambda)$  и по графику определите длину волны  $\lambda$ , при которой начинается резкое возрастание коэффициента поглощения.

8. По формуле (3) вычислите ширину запрещенной зоны исследуемого полупроводника и выразите ее в эВ.

9. Исследуйте спектральную проводимость полупроводника  $\sigma = f(\lambda)$ , постройте график этой зависимости.

10. Учтя, что ток, проходящий через полупроводник, пропорционален фотопроводимости, по графику найдите длину волны, которая соответствует максимальной фотопроводимости ( $\lambda_{\max}$ ), и по формуле (3) вычислите ширину запрещенной зоны полупроводника  $\Delta E$ .

11. Найдите среднее значение ширины запрещенной зоны полупроводника  $\overline{\Delta E}$ .

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

Исследуйте зависимость коэффициента поглощения от длины волны вблизи границы собственного поглощения для образца с различной степенью чистоты. Постройте график  $\alpha = f(\lambda)$  и объясните результаты исследований.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое явление называется внутренним фотоэффектом?
2. В чем сущность зонной теории полупроводников?
3. Чем отличаются полупроводники от металлов и диэлектриков с точки зрения зонной теории?
4. Назовите основные типы оптического поглощения в полупроводниках.
5. Что является характерной особенностью собственного поглощения полупроводников?
6. Что называется краем полосы собственного поглощения?
7. Почему фотосопротивление делают из тонких пленок полупроводника?
8. Как выглядит кривая поглощения полупроводника при наличии в нем примесей?
9. По какому закону изменяется интенсивность света, проходящего через полупроводниковый образец?
10. От чего зависит коэффициент поглощения полупроводника?