

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

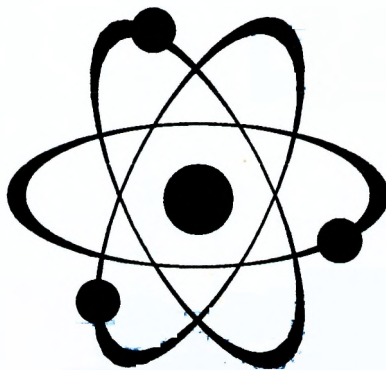
Кафедра физики

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы Ф2  
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ»

по дисциплине  
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

для студентов специальности  
1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
дневной формы обучения



Брест 2007

УДК 535.243, 535.341.08, 535.345.1

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной формы обучения, выполняющих лабораторные работы по физическим основам электронной техники. Содержат теоретические сведения, методику определения ширины запрещенной зоны полупроводников оптическим методом, задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Авторы: И.С. Янусик, старший преподаватель  
К.И. Русаков, доцент, к. ф.-м. н.  
Т.Л. Кушнер, старший преподаватель, к. ф.-м. н.

Рецензент: В.С. Костко, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики БрГУ им. А.С. Пушкина

**Цель работы:** изучить процессы оптического поглощения в полупроводниках; освоить методику определения ширины запрещенной зоны полупроводников оптическим методом; определить значения ширины запрещенной зоны полупроводниковых кристаллов по спектрам пропускания.

**Приборы и принадлежности:** спектрофотометр СФ-26, образцы полупроводников.

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. Основы спектрофотометрического анализа

Изучение веществ по их спектрам поглощения является в настоящее время одним из самых распространенных методов исследований, не приводящих к разрушению образцов. Данный метод является достаточно универсальным и применяется при исследовании как твердых, так и жидких материалов.

В основе спектрофотометрического анализа лежит свойство веществ поглощать свет определенных длин волн, характерных для данного типа соединений. В процессе поглощения кванта света атомом вещества, происходит его переход из основного невозбужденного состояния в одно из возможных возбужденных. Энергия поглощаемого кванта света равна разности энергий возбужденного и основного состояний атома. Следовательно, спектры поглощения и излучения одиночных атомов являются линейчатыми. В сложных молекулах атомы принимают участие в колебательном и вращательном движении, что приводит к появлению множества энергетических подуровней, поэтому для молекул характерны широкополосные спектры. Интенсивность полос поглощения определяется вероятностью перехода молекул из основного состояния в возбужденное. Зависимость вероятности поглощения от частоты или длины волны света называется **спектром поглощения**.

Для измерения спектров поглощения необходимы источники света с непрерывным спектром излучения, такие как водородная лампа в ультрафиолетовой области, и лампа накаливания – в видимой области.

### 1.2. Взаимодействие оптического излучения с кристаллами

В кристаллических телах под действием излучения происходят сложные физические процессы, обусловленные взаимодействием фотонов, электронов и атомов. При этом на общую картину оптических явлений в кристаллах неизбежно накладываются такие факторы, как наличие дефектов решетки, внешние воздействия (температура, электрические и магнитные поля, давление), и взаимозависимости между ними.

Если на кристалл падает электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda$  и интенсивностью  $I_0(\lambda)$ , то, исследуя интенсивность отраженного  $I_R(\lambda)$  или прошедшего через образец, излучения  $I_T(\lambda)$ , можно изучить процессы, происходящие в кристалле под действием падающих на него волн. Для характеристики зависимостей  $I_T(\lambda)$  и  $I_R(\lambda)$  введены оптические коэффициенты.

**Коэффициент пропускания**  $T(\lambda)$  характеризует долю излучения, прошедшего через образец, и определяется соотношением:

$$T(\lambda) = \frac{I_T}{I_0}, \quad (1.1)$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения, падающего на образец;  
 $I_T$  – интенсивность излучения, прошедшего через образец.

$T(\lambda)$  может быть безразмерной величиной или выражаться в процентах.

**Коэффициент отражения**  $R(\lambda)$  характеризует долю отраженного от кристалла излучения и определяется соотношением:

$$R(\lambda) = \frac{I_R}{I_0}, \quad (1.2)$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения, падающего на образец;  
 $I_R$  – интенсивность излучения, отраженного от образца.

$R(\lambda)$  – величина либо безразмерная, либо выраженная в процентах.

Любое вещество характеризуется **коэффициентом поглощения**  $\alpha(\lambda)$ , который определяется законом Бугера–Ламберта:

$$I_T = I_0(1 - R)e^{-\alpha x}, \quad (1.3)$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения, падающего на образец;  
 $I_T$  – интенсивность излучения, прошедшего через образец;  
 $R$  – коэффициент отражения;  
 $\alpha$  – коэффициент поглощения;  
 $x$  – толщина образца.

Выражая из (1.3) коэффициент  $\alpha$ , получим:

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0(1 - R)}{I_T}. \quad (1.4)$$

Коэффициент поглощения  $\alpha$  характеризует долю излучения, поглощенного образцом толщиной в один метр. В системе СИ коэффициент поглощения  $\alpha$  имеет размерность  $\text{м}^{-1}$ , но часто для удобства данный коэффициент принято измерять в  $\text{см}^{-1}$  или в  $\text{мм}^{-1}$ . В образцах с плоско-параллельными гранями отражение происходит на двух границах раздела, и тогда интенсивность излучения, прошедшего через образец:

$$I_T = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha x}. \quad (1.5)$$

Если коэффициент  $R$  неизвестен, то можно найти  $\alpha$ , измеряя пропускание в двух образцах различной толщины. В этом случае:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{I_{T1}}{I_{T2}} \quad (1.6)$$

где  $I_{T1}$  – интенсивность излучения, прошедшего через 1-й образец;

$I_{T2}$  – интенсивность излучения, прошедшего через 2-й образец;

$x_1$  – толщина 1-го образца;

$x_2$  – толщина 2-го образца.

В случае, когда толщина образца такова, что внутри него предполагается многократное внутреннее отражение, коэффициент  $\alpha$  рассчитывается по более сложной формуле, которая будет приведена позже.

Спектральные зависимости от длины волны  $R(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$ , от частоты  $R(\omega)$ ,  $\alpha(\omega)$  или от энергии квантов падающего излучения  $R(\hbar\omega)$ ,  $\alpha(\hbar\omega)$  называются соответственно **спектрами отражения** или **спектрами поглощения** для данного материала.

### 1.3. Механизмы поглощения света

Процессы поглощения света следует классифицировать по тому, на что непосредственно расходуется энергия поглощенных квантов света.

Можно выделить следующие механизмы поглощения.

1) Взаимодействие света с атомами кристаллической решетки приводит к превращению энергии квантов света в энергию фононов, т.е. при поглощении фотона в кристалле рождается один фонон (однофононное поглощение) или несколько фононов (многофононное поглощение). Этот тип взаимодействия получил название **решеточного** или **фононного** поглощения. Фононы – кванты колебательной энергии кристаллической решетки.

2) При поглощении квантов света (фотонов) полупроводником их энергия может быть передана электронам валентной зоны с переходом этих электронов в зону проводимости, т.е. энергия квантов света идет на ионизацию атомов полупроводника. Такой вид поглощения называют **собственным** или **фундаментальным**.

3) Кванты света могут реагировать и со свободными носителями заряда в разрешенных зонах, т.е. с электронами в зоне проводимости или дырками в валентной зоне. В этом случае энергия фотонов расходуется на переход носителей заряда на более высокие уровни. Этот вид поглощения называют поглощением **на свободных носителях**.

4) Если фотоны взаимодействуют с примесными центрами, причем энергия фотонов идет на возбуждение примесных атомов или на их ионизацию (в этом случае электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости или на примесный уровень), говорят о **примесном** поглощении.

5) **Экситонным** называют поглощение, при котором в кристалле образуется пара электрон–дырка, связанная кулоновским взаимодействием.

Рассмотрим более подробно различные виды поглощения.

### 1.3.1. Собственное поглощение

При собственном поглощении энергия кванта света, падающего на полупроводник, расходуется на перемещение электронов из валентной зоны в зону проводимости. Этот переход может осуществляться только в том случае, если энергия фотона  $\hbar\omega$ , будет не меньше ширины запрещенной зоны  $E_g$ , т.е.  $\hbar\omega \geq E_g$ . В полупроводниках с повышением температуры происходит расширение кристаллической решетки и усиление колебаний атомов относительно положений равновесия, что сопровождается уменьшением ширины запрещенной зоны.

При поглощении света должны выполняться два закона – закон сохранения энергии и закон сохранения импульса:

$$E_n = E_p + \hbar\omega \quad (1.7)$$

где  $E_n$  – энергия электрона, перешедшего в зону проводимости;

$E_p$  – энергия дырки, образовавшейся в валентной зоне;

$\hbar\omega$  – энергия поглощенного фотона.

$$\vec{p}_n = \vec{p}_p + \vec{p}_{\text{фот.}} \quad (1.8)$$

где  $\vec{p}_n = \hbar\vec{k}_n$  – импульс электрона, перешедшего в зону проводимости;

$\vec{p}_p = \hbar\vec{k}_p$  – импульс дырки, образовавшейся в валентной зоне;

$\vec{p}_{\text{фот.}}$  – импульс фотона.

Импульс фотона примерно на три порядка меньше импульса электрона. Поэтому выражение (1.8) можно записать в виде:

$$\hbar\vec{k}_n \approx \hbar\vec{k}_p, \text{ или } \vec{k}_n \approx \vec{k}_p \quad (1.9)$$

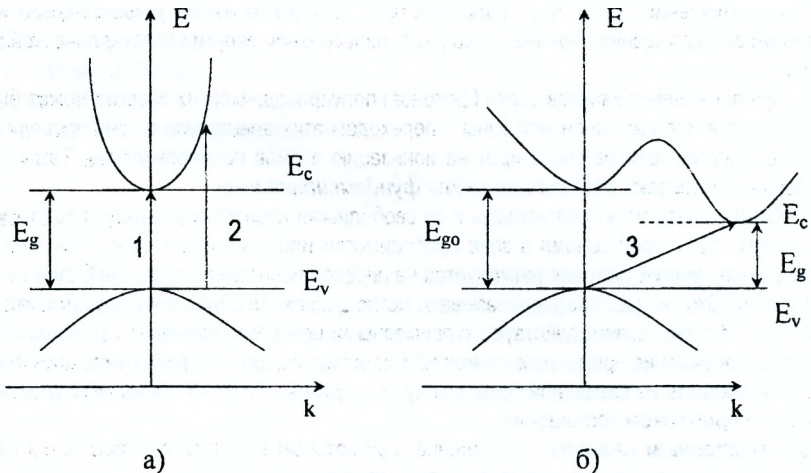


Рисунок 1.1 – Прямые (а) и непрямые (б) межзонные переходы

Соотношение (1.9) называют *правилом отбора* для электронных переходов. Оно показывает, что в процессе взаимодействия электрона с полем излучения возможны только такие переходы, при которых волновой вектор  $\vec{k}$  сохраняется. На энергетической диаграмме (рисунок 1.1 а) такие переходы изображают вертикальными стрелками 1 и 2 и называют *прямыми межзонными* переходами или *вертикальными*.

Если экстремумы зоны проводимости и валентной зоны находятся при различных значениях волнового вектора  $\vec{k}$ , то такие переходы называются *непрямыми межзонными* переходами (рисунок 1.1 б, стрелка 3). Такие переходы происходят с участием третьей квазичастицы – фонона. В этом случае законы сохранения энергии и импульса имеют вид:

$$E_n = E_p + \hbar\omega \pm E_{\text{фон}}, \quad (1.10)$$

где  $E_{\text{фон}}$  – энергия фонона;

$$\vec{p}_n = \vec{p}_p + \vec{p}_{\text{фон}} \pm \vec{p}_{\text{фон}}, \quad (1.11)$$

где  $\vec{p}_{\text{фон}}$  – импульс фонона.

Знак «+» относится к процессам, протекающим с поглощением фонона, «-» — с испусканием фонона.

Полупроводники, для которых преобладают прямые межзонные переходы, называются *прямозонными*. К таким, например, относятся ZnO, GaAs, CdSe, CdS и т.д. В *непрямозонных* полупроводниках (Ge, Si, GaP и т.д.) доминируют *непрямые* переходы, соответствующие наименьшей энергии фотонов.

### 1.3.2. Экситонное поглощение

При поглощении света полупроводником возможно такое возбуждение электрона из валентной зоны, при котором он не переходит в зону проводимости, а образует с дыркой связанную систему, получившую название *экситон*. Если размеры экситона велики по сравнению с периодом решетки, то взаимодействие электрона и дырки можно представить как кулоновское взаимодействие двух точечных зарядов, ослабленное в  $\epsilon\epsilon_0$  раз, где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость кристалла,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная. Экситон сходен с возбужденным атомом водорода, поскольку электрон и дырка движутся по орбитам вокруг их центра масс. В такой модели экситон имеет водородоподобную схему расположения энергетических уровней, и энергетический спектр является дискретным (рисунок 1.2).

При условии изотропности эффективных масс ( $m_n^*$ ,  $m_p^*$ ) и, если оптический переход будет прямым и осуществляется при  $K=0$ , экситон будет характеризоваться водородоподобной серией линий поглощения (рисунок 1.2), которые удовлетворяют соотношению:

$$\hbar\omega = \hbar\omega_\infty - \frac{E_{\text{экс}}}{n^2}, \quad (1.12)$$

где  $E_{\text{экс}}$  – энергия связи экситона;

$n$  – порядок экситонного состояния.

Или

$$\hbar\omega = E_g - \frac{E_{\text{экс}}}{n^2} \quad (1.13)$$

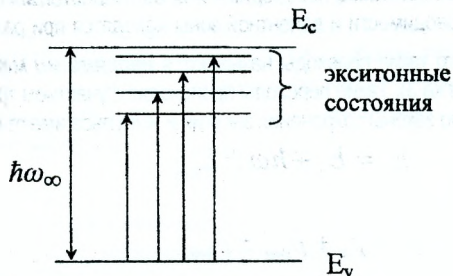


Рисунок 1.2 – Экситонное поглощение фотонов

Экситоны могут образовываться как в результате прямых, так и непрямых переходов. Они являются электрически нейтральными и могут локализоваться возле различных дефектов кристаллической структуры (в основном у нейтральных). В этом плане спектроскопия связанных электронов (обычно при температурах 4–77 К) широко используется для обнаружения точечных дефектов.

### 1.3.3. Примесное поглощение

При энергии фотонов  $\hbar\omega < E_g$  может осуществляться примесное поглощение, обусловленное ионизацией, или возбуждением примесных центров в кристалле. При наличии в полупроводнике донорной или акцепторной примеси в его запрещенной зоне появляются локальные энергетические уровни (рисунок 1.3). Под действием излучения могут происходить переходы электронов с донорных  $E_D$  уровней в зону проводимости (переход показан стрелкой 1) и из валентной зоны на акцепторный  $E_A$  уровень (переход 2). Граница этого поглощения сдвинута в область длинных волн тем сильнее, чем меньше энергия соответствующего перехода.

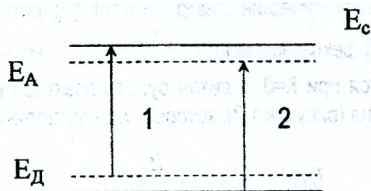


Рисунок 1.3 – Примесное поглощение  
 (1 – переход электронов с донорных уровней в зону проводимости;  
 2 – переход из валентной зоны на акцепторный уровень)



Следует отметить, что если примесные атомы уже ионизированы, то примесное поглощение наблюдаться не будет. Поскольку температура истощения примеси падает с уменьшением энергии ее ионизации, то для наблюдения примесного поглощения необходимо охладить полупроводник до низких температур.

Например, спектр поглощения германия легированного золотом (энергия ионизации примеси  $E_{пр} = 0,08$  эВ, граница поглощения  $\lambda = 9$  мкм), наблюдается при 77 К, при легировании сурьмой ( $E_{пр} = 0,01$  эВ,  $\lambda = 135$  мкм) примесное поглощение наблюдается при температуре 4 К.

### 1.3.4. Поглощение свободными носителями заряда

При освещении полупроводника светом определенной длины волны электроны зоны проводимости и электроны не полностью заполненной валентной зоны могут осуществлять переходы внутри зоны с одного уровня на другой (рисунок 1.4 а).

Такие внутрizonные переходы происходят с нарушением правил отбора. В силу закона сохранения импульса они осуществляются только тогда, когда наряду с поглощением фотона происходит поглощение или испускание фонона. Коэффициент поглощения можно определить из следующего соотношения:

$$\alpha = \frac{n\lambda^2}{\mu} \quad (16)$$

где  $n$  – концентрация свободных носителей;

$\lambda$  – длина волны падающего излучения;

$\mu$  – дрейфовая подвижность.

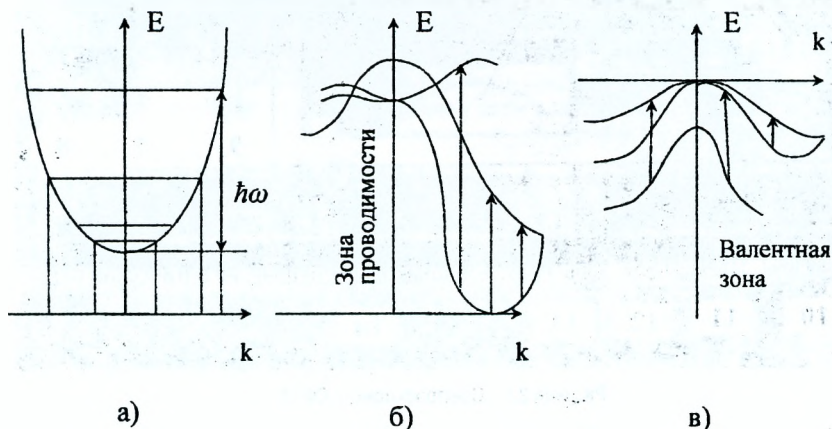


Рисунок 1.4 – Поглощение света свободными носителями заряда при переходах внутри одной подзоны (а), между подзонами зоны проводимости (б) и валентной зоны (в)

Если энергетические зоны у полупроводника сложны (Ge, Si, GaP, AlAs и др.), то на поглощение свободными носителями накладывается поглощение, обусловленное переходами между отдельными подзонами зоны проводимости (рисунок 1.4 б) и валентной зоны (рисунок 1.4 в).

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Описание лабораторной установки

Спектрофотометр СФ-26 (рисунок 2.1) состоит из монохроматора (1), шкалы измерительного прибора (2), осветителя (3) с источниками излучения и стабилизатором, кюветного отделения (4), камеры (5) с фотоприемниками и усилителем. На передней стенке камеры (5) располагаются: рукоятка (6) «Чувствительность»; рукоятка (7) шторки, перекрывающей световое окно камеры; рукоятка (8) «Нуль» установки нуля.

**ВНИМАНИЕ!** Установка нуля осуществляется потенциометром с двойной регулировкой (грубой и тонкой), им необходимо пользоваться с большой осторожностью, не прилагая усилий.

Также справа на передней панели кюветного отделения располагается регулятор положения держателя с образцами (9).

Внизу и слева на приборе расположены (10): тумблер «Сеть»; сигнальная лампа «Сеть»; сигнальная лампа «Д», показывающая включение дейтериевой лампы; сигнальная лампа «Н», показывающая включение лампы накаливания. Рукоятка (11) позволяет установить необходимую длину волны. Правее располагаются регулятор (12) «Компенсация», рукоятка (13) «Отсчет», регулятор ширины щели (14).

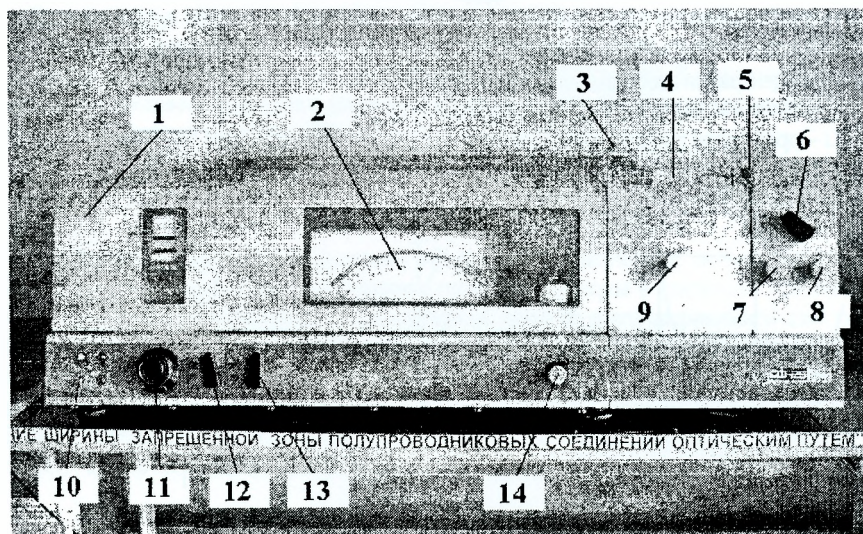


Рисунок 2.1 – Спектрофотометр СФ-26

Шкала измерительного прибора (2) оцифрована в процентах пропускания (Т) и единицах оптической плотности (D). В спектрофотометре имеются два источника со сплошным спектром излучения: дейтериевая лампа для работы в области длин волн 186–350 нм и лампа накаливания – для работы в диапазоне 340–1100 нм. Смена источников излучения производится путем переключения рукоятки осветителя (3) из положения «Д» в положение «Н».

Для крепления плоских твердых образцов в каретке кюветного отделения служит держатель с четырьмя окнами, позволяющий измерять пропускание в образцах толщи-

Для крепления плоских твердых образцов в каретке кюветного отделения служит держатель с четырьмя окнами, позволяющий измерять пропускание в образцах толщиной 0,5–2 мм, шириной 8–15 мм. Для фиксации положения держателя образцов в каретке используется рамка, вставляемая в одну из прорезей в стенках каретки. Держатель образцов устанавливается в каретку стороной с белой точкой к лицевой части спектрофотометра, предельно близко к выходному окну монохроматора. Каретка с образцами перемещается с помощью рукоятки (9) и может фиксироваться в четырех положениях: «1», «2», «3» и «4», соответствующих четырем образцам.

Вращение рукоятки (11) позволяет выбрать определенный диапазон длин волн. Шкала длин волн имеет вид спирали Архимеда с оцифровкой от 185 до 1200 нм.

Регулятор (12) «Компенсация» используется, если исследуемые образцы сильно поглощают излучение. В этом случае можно растянуть 10-процентный диапазон на всю шкалу, используя резисторы компенсации. Регулятор имеет 10 положений, обеспечивающих работу в диапазонах коэффициентов пропускания 110–100, 100–90... 10–0.

Рукоятку (13) «Отсчет» используют следующим образом:

- положение «х1» рукоятки (13) используют для измерения в диапазоне коэффициентов пропускания от 100 до 0;
- положение «х0,1» используют для растяжки 10-процентного диапазона на всю шкалу измерительного прибора при включенном компенсаторе (12);
- положение «х0,01» используется при измерении образцов с пропусканием меньше 10 %, для растяжки одного процента из диапазона от 0 до 10 % в 100 раз на всю шкалу измерительного прибора.
- положение «Калибр» используют для установки 100-процентного отсчета при работе с сильно поглощающими образцами, когда световые потоки, прошедшие через измеряемый образец и попадающие на фотоприемник, малы. При этом измерение производится с более широкими щелями, чтобы увеличить световой поток.

Рукоятка (14) позволяет регулировать ширину щели в диапазоне от 0,01 до 2 мм.

## 2.2. Подготовка спектрофотометра к работе

1. Установите рукоятку осветителя (3) в положение «Н», а рукоятку камеры (5) в положение «К», что включает фотозлемент, работающий в красном спектральном диапазоне, а в качестве источника работает лампа накаливания.
2. Закройте фотозлемент, поставив рукоятку шторы (7) в положение «Закр».
3. Включите тумблер «Сеть» (10), после чего должны загореться сигнальная лампа «Сеть» и сигнальная «Н». Стабильная работа спектрофотометра обеспечивается через 15 минут после его включения. **ВНИМАНИЕ!** После прогрева запрещается открывать крышку кюветного отделения (4), она должна быть плотно закрыта.
4. Установите рукоятку (12) «Компенсация» в положение «0».
5. Согласуйте с преподавателем выбор образцов, диапазон длин волн для измерений и шаг изменения длины волны. Установите максимальную длину волны из заданного диапазона, вращая рукоятку (11) в сторону увеличения. Если при этом шкала повернется на большую величину, чем Вам необходимо, возвратите ее назад на 3–5 нм, и снова подведите к требуемому значению длины волны.

- Установите рукоятку (6) «Чувствительность» в положение «1». Если поток излучения недостаточен, а измеряемый и контрольный образцы значительно поглощают излучение, установите рукоятку в положение «2», «3» или «4».

### 2.3. Измерение коэффициентов пропускания

- Установите на пути потока излучения контрольный образец, перемещая каретку рукояткой (9) на себя, и зафиксировав ее в положении «1». При отсутствии контрольного образца за 100% пропускания принимается значение светового потока, проходящего через свободное окно держателя фильтров.
- Установите рукоятку (13) «Отсчет» в положение «x1».
- Установите рукоятку (8) «Нуль» стрелку измерительного прибора на ноль.
- Установите рукоятку (7) шторы фотозлемента в положение «Откр».
- Установите стрелку измерительного прибора на деление «100», вращая рукоятку (14) изменения ширины щели.
- Установите в рабочее положение измеряемый образец, перемещая каретку рукояткой (9) в положение «2», «3» или «4» (в зависимости от номера образца, согласованного с преподавателем), и снимите показания пропускания (T) по шкале (2).
- Выведите из потока излучения измеряемый образец, установив рукоятку (9) обратно в положение «1». При этом стрелка измерительного прибора должна вернуться на деление «100».

### 2.4. Задания для самостоятельной работы

- Согласуйте с преподавателем номера измеряемых образцов, диапазон и шаг изменения длины волны для предстоящих измерений.
- Составьте таблицу по предлагаемому образцу.

№ п/п	$\lambda$ , мкм	$\hbar\omega$ , эВ	T, %	T, отн.ед.	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>	$\alpha^2$ , см <sup>-2</sup>	$\alpha^{1/2}$ , см <sup>-1/2</sup>
-------	-----------------	--------------------	------	------------	-----------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

- Руководствуясь пунктами 1–7 раздела 2.3, проведите измерения коэффициентов пропускания T для одного образца, указанного преподавателем, начиная с максимального значения длины волны. Повторите измерения для всех длин волн из данного диапазона. Данные измерений заносите в таблицу (см. пункт 2).
- Рассчитайте энергию фотона, падающего на образец, по формуле:

$$\hbar\omega = \frac{1,24}{\lambda} \quad (2.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения, падающего на образец.

- Рассчитайте коэффициенты поглощения  $\alpha$  для исследуемого образца по формуле, учитывающей многократное отражение:

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2} \right\}, \quad (2.2)$$

Значение  $R=0,21$ , если каретка устанавливалась в положение «2»,  $R=0,23$ , если каретка устанавливалась в положение «3»;  
 $R=0,25$ , если устанавливалась в положение «4».

- Постройте график зависимости коэффициента пропускания  $T$  от длины волны  $\lambda$ . По спектральной зависимости  $T = f(\lambda)$  определите длину волны края собственного поглощения  $\lambda_0$  (из середины «ступеньки» графика  $T=f(\lambda)$  опустите перпендикуляр на ось абсцисс).
- Вычислите в джоулях и электрон-вольтах ширину запрещенной зоны  $E_g$  исследуемого образца по формуле:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_0}$$

где  $\lambda_0$  – длина волны края собственного поглощения;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;

1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

- Постройте графические зависимости  $\alpha^2 = f(\hbar\omega)$  и  $\alpha^{1/2} = f(\hbar\omega)$  для исследуемого полупроводника. Экстраполяцией прямолинейного участка этих зависимостей на ось абсцисс определите значения ширины запрещенной зоны полупроводника  $E_g$  и сравните их со значением из пункта 7 данного раздела.
- По найденному значению ширины запрещенной зоны  $E_g$  идентифицируйте исследованное полупроводниковое соединение. Используйте данные, приведенные в таблице 1.

**Таблица 1** – Значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  некоторых полупроводников при комнатной температуре

Полупроводник	$E_g$ , эВ
Ge	0,67
Si	1,12
GaN	3,4
AlP	2,45
GaP	2,26
InP	1,35
AlAs	2,16
GaAs	1,35–1,43
InAs	0,36
AlSb	1,58
GaSb	0,72
InSb	0,18
ZnS	3,67 (кубич.); 3,74 (гексаг.)
PbSe	0,27
CdS	2,53
PbTe	0,32
ZnSe	2,73

CdSe	1,6–1,85
ZnTe	2,23
AgTe	0,08
CdTe	1,51
PbS	0,39
CuIn <sub>3</sub> Se <sub>5</sub>	1,21
CuGa <sub>3</sub> Se <sub>5</sub>	1,77
CuGa <sub>5</sub> Se <sub>8</sub>	1,81

10. Повторите измерения (пункты 1–7 раздела 2.3) для других образцов, указанных преподавателем. Руководствуясь пунктами 2–9 раздела 2.4, повторите обработку результатов эксперимента.

### III. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм взаимодействия света с кристаллической решеткой?
2. В чем сущность прямых и непрямых оптических переходов?
3. Что такое правило отбора?
4. Какова природа примесного поглощения света в полупроводниках и почему оно проявляется при низких температурах?
5. Толстый полупроводниковый образец имеет коэффициент отражения  $R=0,36$ . Коэффициент пропускания пленки из того же материала толщиной  $x=1$  мм равен  $T=0,17$ . Найдите коэффициент поглощения  $\alpha$ ?

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Елифанов Г.И. Твердотельная электроника / Г.И. Елифанов, Ю.А. Мома. – М.: Высшая школа, 1986. – 304 с.
2. Киреев П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев. – М.: Высшая школа, 1975. – 584 с.
3. Елифанов Г.И. Физика твердого тела / Г.И. Елифанов – 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1977. – 288 с.
4. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / Панков Ж. – М.: Мир, 1973.
5. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин. – М.: Высшая школа, 1977.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Составители:**

Янусик Ирина Семеновна  
Русаков Константин Иванович  
Кушнер Татьяна Леонидовна

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы Ф2  
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ»

по дисциплине  
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

для студентов специальности  
1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
дневной формы обучения

Ответственный за выпуск: Янусик И.С.  
Редактор: Строкач Т.В.  
Компьютерная верстка: Боровикова Е.А.  
Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 7.12.2007 г. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая. Усл. печ. л. 0,93.  
Уч.-изд. л. 1,0. Заказ № 1300. Тираж 60 экз. Отпечатано на ризографе учреждения  
образования «Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267