

**ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Т.Г. Шевченко**

Физико-математический факультет

Кафедра Твердотельной электроники и микроэлектроники

КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Тирасполь, 2013

УДК
ББК

Составитель:

И.В. Дементьев, доцент кафедры ТТЭМ

Н.И. Мацкова, ст. преподаватель кафедры ОФ и МПФ

Рецензенты:

Ишимов В.М., канд.ф.м.н, доцент кафедры ТТЭМ

Коровой О.В., канд.ф.м.н., доцент кафедры НОиКР

Квантовая и оптическая электроника. Лабораторный практикум/
Составитель:

И.В. Дементьев, Н.И. Мацкова, Тирасполь: 2013 – 69 стр.

Лабораторный практикум предназначен для выполнения лабораторных работ по курсу «Квантовая и оптическая электроника».

Учебное пособие предназначено для студентов IV курса физико-математического факультета ПГУ им. Т.Г. Шевченко.

УДК
ББК

Утверждено Научно-методическим советом ПГУ им. Т.Г. Шевченко

© Составитель
И.В. Дементьев,
Н.И. Мацкова
2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Лабораторная работа №1	5
2. Лабораторная работа №2	17
3. Лабораторная работа №3	24
4. Лабораторная работа №4	36
Литература	69

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий лабораторный практикум предназначен для студентов специализирующихся в области твердотельной электроники, микроэлектроники, физики полупроводников и диэлектриков. Его целью является закрепление теоретических сведений по курсу «Квантовая и оптическая электроника», а также ознакомление студентов с методами исследования оптических свойств полупроводников, характеристик и параметров оптоэлектронных приборов.

Лабораторный практикум разработан к следующим лабораторным работам:

Определение коэффициента оптического поглощения полупроводника.

Определение «оптической» ширины запрещенной зоны полупроводника.

Ознакомление с устройством монохроматора, его оптической схемой.

Исследование характеристик и параметров светоизлучающих диодов.

Описанию каждой лабораторной работы предшествуют довольно подробные теоретические сведения по изучаемому вопросу. Их объем совпадает, а в некоторых случаях, превышает содержание лекционного материала. Подробно описаны теория экспериментальных методов получения и описание лабораторных установок.

Лабораторная работа выполняется в течение 4 часов. Выполнению работы предшествует проверка знаний студента соответствующего теоретического материала, устройства и порядок работы на лабораторной установке. Получив допуск преподавателя, студент самостоятельно выполняет работу и на основе полученных экспериментальных данных оформляет отчет в отдельной тетради.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы - изучение и определение коэффициента оптического поглощения полупроводниковых пленок, ознакомление с методикой исследования оптического поглощения в полупроводниках.

Оптические свойства веществ, в частности, способность поглощать ими излучение, представляют значительный интерес как с практической, так и с теоретической стороны. Они определяют возможность использования полупроводника для изготовления различного рода приборов, таких, как фотосопротивления, фотоэлементы, фотодиоды и. т.п. Кроме того, изучение оптического поглощения позволяет получить информацию относительно структуры энергетических зон полупроводника.

Спектр поглощения

Когда пучок монохроматического излучения проходит через однородную поглощающую среду, то вследствие поглощения в среде его интенсивность уменьшается. Обозначим через I интенсивность пучка излучения, падающего на слой dl (рис.1).

Тогда dI будет уменьшение интенсивности излучения вследствие поглощения его в этом слое. dI пропорционально интенсивности и толщине слоя dl , т.е.

$$- dI = \alpha I dl \quad (1)$$

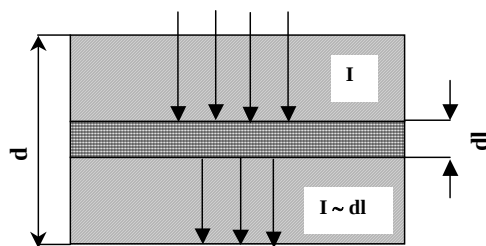


Рис. 1 Поглощение света в полупроводнике.

Константа α , показывающая, какая доля излучения поглощается при прохождении единицы длины пути, носит название коэффициента поглощения. Она является характеристикой поглощающей среды и зависит от длины волны излучения. Обычно коэффициент поглощения α измеряется в см^{-1} и, следовательно, имеет размерность $[\text{L}^{-1}]$.

Проинтегрировав уравнение (1), получим выражение, известное под названием закона Ламберта-Бугера:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2)$$

Этот закон справедлив только для строго монохроматического излучения и при условии, если пучок излучения падает перпендикулярно поверхности исследуемого вещества и не испытывает отражения. Отклонение от закона Ламберта - Бугера вызывают также неоднородность поглощающей среды и недостаточная параллельность пучка излучения.

Практически определение коэффициента поглощения сводится к измерению пропускания или оптической плотности $d = \lg I/I_0$ для данной длины волны излучения. Коэффициент поглощения α можно легко рассчитать по формуле (2), зная толщину поглощаемого слоя d .

Результаты исследования поглощающей способности вещества выражают в виде графической зависимости коэффициента поглощения (пропускания) от длины волны излучения λ или от энергии кванта падающего света $h\nu$.

Пропускаемость I/I_0 выражают обычно в процентах, длину волны - в ангстремах, микронах.

Зависимость коэффициента поглощения исследуемого вещества от длины волны падающего излучения носит название спектра поглощения.

Краткая характеристика различных видов поглощения в полупроводниках

Поглощение излучения в полупроводниках может быть связано с изменением колебательной энергии атомов решетки, а также с изменением энергетического состояния свободных или связанных с атомами электронов. В связи с этим различается несколько видов поглощения в полупроводниках: собственное или фундаментальное; поглощение свободными носителями; примесное поглощение и поглощение решеткой.

Собственное поглощение. Рассмотрим простую модель энергетических зон кристалла, где зависимость между возможным значением энергии электрона E и его квазиимпульсом имеет вид, изображенный на рис.2

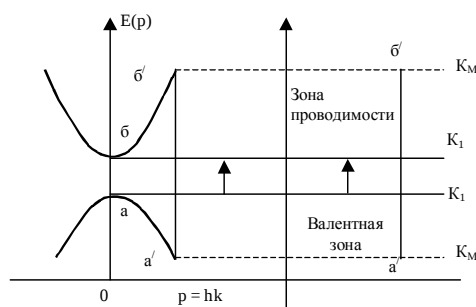


Рис.2. Модель энергетических зон кристалла

Вместо величины $\overline{p}$ часто на оси абсцисс откладывают значение волнового вектора k . Эти величины связаны между собой соотношением $\overline{p} = \hbar k$, где $\hbar$ - постоянная Планка h , деленная на 2π .

Нижняя кривая (рис. 2) определяет значение энергий, которые может иметь электрон, находящийся в валентной зоне кристалла; верхняя представляет собой энергию электрона в зоне проводимости в зависимости от квазиимпульса $\overline{\mathbf{p}}$ или волнового вектора $\overline{\mathbf{k}}$.

Под воздействием излучения электроны валентной зоны, приобретая дополнительную энергию, превышающую или равную ширине запрещенной зоны, могут переходить на свободные состояния зоны проводимости. Такое поглощение называется собственным или фундаментальным.

В процессе перехода электрона из состояния a в состояние b (рис. 2) при взаимодействии с электромагнитным полем излучения должны выполняться закон сохранения энергии и закон сохранения квазиимпульса или волнового вектора $\overline{\mathbf{k}}$:

$$E_{\varepsilon}^{\text{эл}} = E_{\varepsilon}^{\text{эл}} + h \nu_{\text{фотона}} \quad (3)$$

$$\overline{\mathbf{k}}_b = \overline{\mathbf{k}}_a + \overline{\boldsymbol{\eta}} \quad (4)$$

где

$$\eta = \frac{2 \pi}{\lambda_{\text{фотона}}}$$

$$k = \frac{2 \pi}{\lambda_{\text{электрона}}}$$

Волновой вектор $\overline{\boldsymbol{\eta}}$ фотона очень мал, по сравнению с волновым вектором $\overline{\mathbf{k}}$ электрона, так как длина электронной волны в кристалле $\lambda_{\text{эл}}$ порядка 10^{-7} см, в то время как λ фотона порядка $10^{-1} - 10^{-5}$ см. Поэтому в уравнении (4) волновым вектором фотона можно пренебречь. Тогда получим соотношение

$$\overline{\mathbf{k}}_b = \overline{\mathbf{k}}_a = \overline{\mathbf{k}}_1 \quad (5)$$

показывающее, что в процессе взаимодействия электрона с квантом света возможны только такие переходы, при которых волновой вектор $\overline{\mathbf{k}}$ электрона сохраняется. Эти переходы получили название прямых или вертикальных (на рис.2 обозначены вертикальными стрелками a - b , a' - b')

В некоторых случаях наблюдаются переходы, для которых правило отбора (5) не выполняется, потому что электрон в процессе перехода взаимодействует не только с полем излучения, но и с колебаниями решётки.

Это взаимодействие может сопровождаться передачей энергии от электрона к решётке или, наоборот, от решетки к электрону. В первом случае возбуждается квант колебательной энергии или фонон, во втором фонон разрушается, так как энергия решётки уменьшается. С учётом взаимодействия электрона с решёткой закон сохранения волнового вектора будет иметь вид

$$\vec{k}_d = \vec{k}_a + \vec{\eta} \pm \vec{q}$$

где $\vec{q}$ - волновой вектор фонона.

Опуская η , можем записать: $\vec{k} = \vec{k}_a \pm \vec{q}$

Как видим, в этом случае при переходе электрона из одного состояния в другое его вектор $\vec{k}$ не сохраняется. Переходы, происходящие с изменением волнового вектора $\vec{k}$ в результате взаимодействия электронов с излучением и колебаниями решётки, носят название непрямых или невертикальных.

Оптическое поглощение, связанное с переходами электронов внутри энергетических зон, называется поглощением свободными носителями. Оно обычно имеет место при значительно меньших энергиях фотонов, по сравнению с собственным поглощением. Характерным признаком внутриволнового поглощения свободными носителями является квадратичная зависимость коэффициента поглощения от длины волны падающего излучения ($\alpha \sim \lambda^2$).

При расшифровке спектра поглощения необходимо учитывать, что различные виды поглощения могут накладываться друг на друга, усложняя форму спектральной кривой (рис. 3). Участок 1-2 определяет собственное или фундаментальное поглощение; полосы 3-5 связаны с переходами дырок

между перекрывающимися энергетическими полосами внутри валентной зоны германия; полоса 6 вызвана переходами электронов в зоне проводимости.

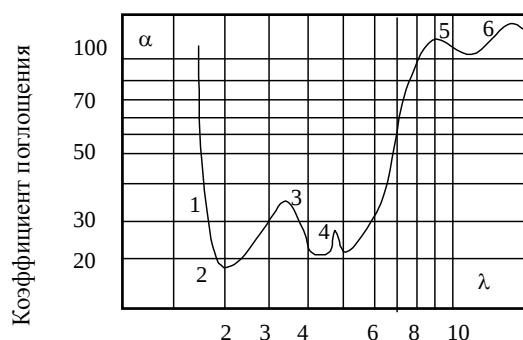


Рис.3. Спектр поглощения германия р - типа

Примесное поглощение - это оптическое поглощение, обусловленное ионизацией или возбуждением примесных центров в кристалле. Как известно, в полупроводнике могут быть донорные и акцепторные примеси. Первые вносят в запрещенную зону локальные энергетические состояния E_d (рис.4), заполненные электронами, вторые - свободные энергетические состояния.

При оптической ионизации примесных атомов происходит переход электронов, взаимодействующих с излучением, из локальных состояний E_d в зону проводимости или из валентной зоны на локальные состояния E_a . Второй процесс можно рассматривать как переход локализованной дырки из состояния E_a в валентную зону.

Кроме основных состояний E_d или E_a , примесные центры могут иметь возбужденные энергетические уровни (рис.4).

В этом случае электроны и дырки примесей при взаимодействии с излучением будут переходить на уровни возбуждения. В качестве примера примесного поглощения приведена спектральная кривая абсорбции бора в кремнии (рис .5)

Для снятия спектра поглощения какого-либо вещества необходимы следующие элементы в общей экспериментальной схеме:

- а) источник излучения;
- б) прибор, позволяющий выделить из сплошного или сложного спектра излучения участки определенных длин волн;
- в) прибор для измерения и регистрации интенсивности прошедшего излучения.

В качестве прибора, позволяющего получить на выходе пучок света определенной длины волны, используем монохроматор УМ-2 (рис.6) Рабочий диапазон исследований на этом приборе 3800-10000 Х.

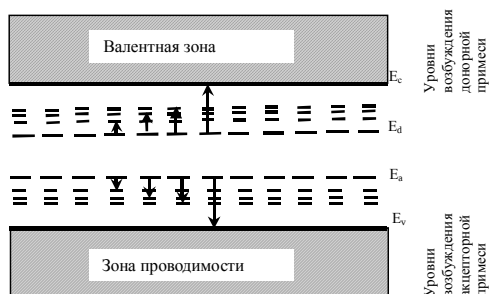


Рис.4. Энергетическая структура примесного полупроводника

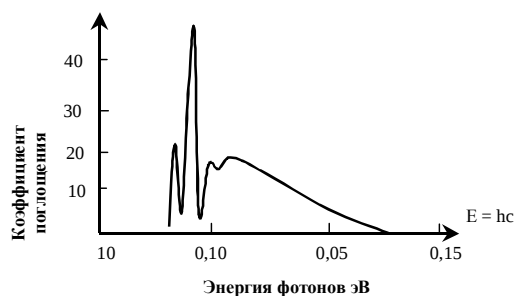


Рис. 5 Спектр поглощения бора в кремнии.

Свет от источника 1 через конденсатор 3 и входную щель монохроматора 6 попадает на объектив коллиматора 7 и параллельным пучком проходит через диспергирующую призму 8. Под углом 90° к падающему пучку света помещается выходная зрительная труба монохроматора с объективом 9, щелью 10 и защитным стеклом 11.

Вращая призму с помощью барабана на различные углы относительно падающего пучка света получаем в выходной щели свет различной длины волны (при работе с монохроматором следует пользоваться прилагаемым к нему описанием).

В качестве источника излучения в видимой области спектра наиболее часто используются специальные лампы накаливания: в ультрафиолетовой области - водородные, криптоновые и другие разрядные кварцевые трубки; в инфракрасной области - штифт Нернста (стержень, изготовленный из окислов различных металлов) и штифт глобара (стержень из карбида кремния), нагреваемые электрическим током. В данном случае применяется лампа накаливания, дающая сплошной спектр. Для измерения интенсивности прошедшего излучения в настоящей работе используется фотозаэлемент с гальванометром.

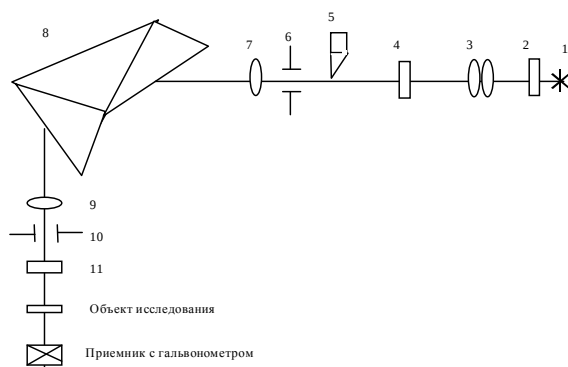


Рис.6. Оптическая схема монохроматора УМ-2.

Градуировка монохроматора

Прежде чем снимать спектр поглощения какого-либо вещества, монохроматор необходимо проградуировать. Задача по градуировке сводится к построению графика, показывающего, какой длине волны излучения на выходе прибора соответствует каждое деление барабана монохроматора, вращающегося вместе с диспергирующей призмой. При этом дисперсия призмы не является линейной функцией угла её поворота и, следовательно,

угла поворота барабана. Поэтому график зависимости между $\lambda_{\text{изл}}$ и углом или длиной дуги поворота барабана будет нелинейным.

Для градуировки в видимой области спектра используются ртутно-кварцевые лампы (типа ПРК-4). Такие лампы дают спектр ртути, который благодаря наличию характерных групп линий, легко идентифицируемых, используются как эталонный спектр. Наиболее интенсивные линии ртути в видимой области спектра 4000-5800 Å указаны в градуировочном графике по спектру паров ртути. Сравнительно слабые линии ртути в этой таблице не приведены.

Градуировочный график по спектру паров ртути

1.	Красная слабая	6440 Å
2.	Красная яркая	6360 Å
3.	Желтая яркая двойная	5770 Å
4.	Зеленая яркая	5460 Å
5.	Голубая слабая двойная	4960 Å
6.	Синяя яркая	4350 Å
7.	Фиолетовая яркая	4110 Å
8.	Фиолетовая яркая между двух слабых близких	4050 Å

За начало координат можно взять $\lambda = 4000$ Å и соответствующий ей угол.

Перед началом градуировки необходимо установить в выходной трубе монохроматора патрубок зрительной трубы со сменными окулярами. В фокальной плоскости окуляра находится указатель, освещаемый лампочкой через сменные светофильтра. Таким образом при работе в любой области спектра указатель может быть освещён светом той же длины волны. Затем без конденсатора необходимо отцентрировать источник света 1, после чего

установить конденсатор 3 по центру так, чтобы объектив коллиматора 7 был равномерно освещён светом. Ширину щели необходимо брать порядка 0,1-0,2 мм, а высоту 2 мм.

Градировка монохроматора осуществляется следующим образом. К указателю, находящемуся в фокальной плоскости окуляра зрительной трубы, подводится одна из известных линий ртутного спектра. Фокусировкой объектива коллиматора 7 добиваются совмещения в одной фокальной плоскости наблюдаемой линии и указателя. Соответствующее деление барабана и положение объектива коллиматора записывается в таблице.

Таким образом, получают ряд эталонных точек, определяющих зависимость между длиной волны и делением барабана; по ним строится градуировочный график. Одна из типичных градуировочных кривых монохроматора представлена на рис.7.

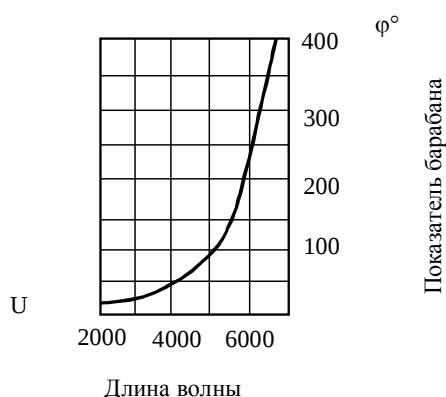


Рис. 7. Кривая дисперсии монохроматора

Определение коэффициента поглощения

Пучок света определенной длины волны, вырезаемый щелью 10 монохроматора, направляется на образец исследуемого вещества. Если вещество твёрдое, то образец может представлять собой монокристалл или плёнку полупроводника, нанесенную на подложку из специально подобранного материала (стекло, кварц). Образец исследуемого вещества располагается таким образом, чтобы параллельный пучок излучения входил перпендикулярно его поверхностям. Если вещество представляет собой жидкость, то её помещают в кювету с плоскопараллельными окошками,

которые прозрачны для излучения в исследуемой области спектра. Для определения коэффициента поглощения α исследуемого вещества для данной длины волны излучения можно воспользоваться полученным из формулы (2) соотношением

$$\ln n = \frac{I_{0\lambda}}{I_{\lambda}} = \alpha d \quad (6)$$

Вычисление отношения интенсивностей $I_{0\lambda}/I_{\lambda}$ приводится по данным показаний гальванометра, который включен последовательно с фотоэлементом, являющимся приемником излучения. Положим, что без образца пучок света с интенсивностью $I_{0\lambda}$ и длиной волны λ возбуждает в цепи фотоэлемента ток $i_{0\lambda}$, в то время как при наличии образца гальванометр показывает ток i_{λ} .

На участке линейной зависимости $i = f(I)$ (рис. 8) отношение $I_{0\lambda}/I_{\lambda}$ определяется очень просто: $I_{0\lambda}/I_{\lambda} = i_{0\lambda}/i_{0\lambda}$.

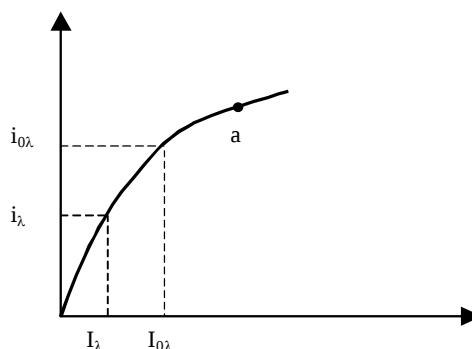


Рис. 8. Зависимость тока фотоэлемента от интенсивности падающего излучения

С ростом интенсивности излучения относительная чувствительность фотоэлемента обычно падает, характеристика $i = f(I)$ становится нелинейной, и определение отношения затрудняется. Поэтому желательно по возможности подбирать такой приемник, чтобы для данного режима работы зависимость между током i и интенсивностью излучения I имела линейный вид. В настоящей работе, это условие выполняется; рассматривается

оптическое поглощение в пленках CdS (50%) CdSe (50%). Ширина запрещенной зоны у CdS равна 2,5 эв, у CdSe - 1,9 эв

Задание

1. Программировать монохроматор по длинам волн. Градуировку производить, пользуясь описанием прибора УМ-2. Построить градуировочную кривую монохроматора.

2. Результаты измерений тока в цепи фотоэлемента и расчета коэффициента поглощения занести в таблицу:

показан на барабане	λ	ν	$h\nu$	i	i
дел	мкм	В	А	А	м ⁻¹

Толщина плёнки d , необходимая для расчетов, указывается отдельно.

3. Построить графики $\alpha(h\nu)$, $\alpha(\lambda)$ и пояснить механизм поглощения света в различных участках спектра.

Контрольные вопросы:

1. Как связаны квазиимпульс и волновой вектор носителя заряда?
2. Выразить связь между длиной волны падающего излучения в А и микрометрах и энергией кванта в электроновольтах.

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ «ОПТИЧЕСКОЙ» ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА.

Цель работы – научиться определять «оптическую» ширину запрещенной зоны полупроводников.

Для всех полупроводников характерно существование широкой спектральной области интенсивного поглощения света, ограниченной со стороны длинных волн резким краем (рис.1). Это поглощение, обусловленное переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется основным (или собственным) оптическим поглощением, а область резкого возрастания поглощения со стороны длинных волн называется краем основного (собственного) поглощения. Легко обнаруживаемое экспериментально возрастание коэффициента поглощения для фотонов с энергиями, превышающими ширину запрещенной зоны ($h\nu > \Delta E$), позволяет определить ΔE .

Наличие в полупроводнике свободных носителей заряда приводит к поглощению света свободными носителями, спектральная область которого может перекрываться с краем области основного поглощения. Коэффициент поглощения света свободными носителями пропорционален их концентрации и возрастает с увеличением длины волны света (рис. 1). Наличие большего количества примеси, определяющей проводимость полупроводника, уменьшает резкость края собственного оптического поглощения и уменьшает точность определения ΔE . Следовательно, чем чище исследуемый образец, тем точнее можно определить край оптического поглощения и ширину запрещенной зоны. Характер возрастания поглощения с увеличением энергии фотона, т.е. форма края полосы поглощения, определяется структурой энергетических зон электронов в полупроводнике.

Известные в настоящее время полупроводники в соответствии с конфигурацией энергетических зон делятся на два основных вида. У первого из них минимум энергии электронов зоны проводимости, характеризуемой волновым вектором $\vec{k}_{\min}$, и максимум энергии валентной зоны, определяемый волновым вектором $\vec{k}_{\max}$, расположены в одной и той же точке зоны Бриллюэна (обычно это точка $\vec{k} = 0$). Для таких полупроводников, примером которых является актимонид индия, $\vec{k}_{\min} = \vec{k}_{\max}$ (рис. 2 а). У второго вида веществ максимум валентной зоны и минимум зоны проводимости находятся при различных $\vec{k}$, т.е. $\vec{k}_{\min} \neq \vec{k}_{\max}$ (рис.2б). К этому типу веществ относится большинство полупроводников, в том числе германий и кремний.

Край собственного поглощения определяется электронными переходами между энергетическими состояниями, соответствующими максимуму валентной зоны и минимуму зоны проводимости, так как таким переходам отвечает минимальная энергия кванта.

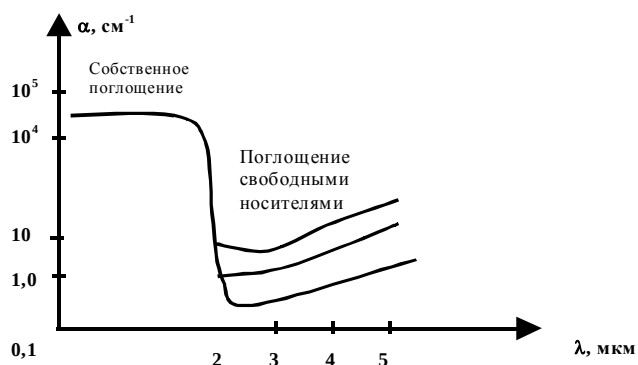


Рис. 1

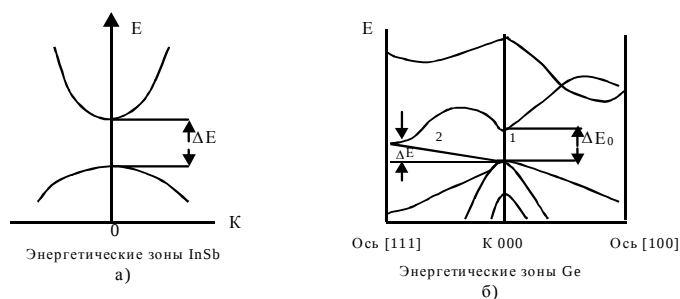


Рис. 2

При взаимодействии излучения с веществом должны выполняться основные физические законы - законы сохранения энергии и импульса (для электронов в кристалле - квазиимпульса), которые записываются следующим образом:

$$E_c - E_v = h\nu \quad (1)$$

$$P_2 - P_1 = P_\phi \quad (2)$$

где E_v и P_1 - энергия и квазиимпульс электрона до взаимодействия с квантом света, E_c и P_2 - энергия и квазиимпульс электрона после взаимодействия, $h\nu$ и P_ϕ - энергия и импульс фотона. Так как квазиимпульс пропорционален волновому вектору $\vec{k}$, ($\vec{P} = \hbar\vec{k}$), то закон сохранения импульса может быть записан следующим образом:

$$\vec{k}_2 - \vec{k}_1 = \vec{k}_\phi = 0 \quad (3)$$

где $\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$ волновые векторы, характеризующие электрон до и после взаимодействия, $\vec{k}_\phi$ - волновой вектор, которым обладает квант света. Край поглощения большинства полупроводников приходится на инфракрасную область спектра, т.е. $\lambda_\phi \sim 10^{-1} - 10^{-5}$. Длина волны электрона в кристалле, при энергиях, соответствующих 300 К, составляет примерно $5 \cdot 10^{-7}$ см. Так как $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$, ясно, что волновой вектор фотона много меньше волновых векторов электрона, поэтому в выражении (3) можно пренебречь последним членом ($|\vec{k}_1| \gg |\vec{k}_\phi|, |\vec{k}_2| \gg |\vec{k}_\phi|$): $k_2 - k_1 \approx 0$,

$$\text{т.е.} \quad k_2 \cong k_1 \quad (4)$$

Таким образом, закон сохранения импульса приводит к выражению (4), которое называется правилом отбора и показывает, что при взаимодействии

электрона с полем излучения возможны только такие переходы, при которых волновой вектор электрона не изменяется. Переходы называются прямыми или вертикальными (переход 1 на рис. 2 б). Экспериментально обнаружено поглощение в области $h\nu \sim \Delta E < \Delta E_0$. При таких переходах волновой вектор электрона должен изменяться ($\vec{k}_2 \neq \vec{k}_1$, т.к. $\vec{k}_{\min} \neq \vec{k}_{\max}$). Закон сохранения импульса в данном случае выполняется лишь вследствие участия третьей «частицы» - фонона в данном процессе (испускания или поглощение его):

$$\vec{k}_2 - \vec{k}_1 - \vec{k}_\phi = 0$$

Электронные переходы, происходящие при взаимодействии электронов с полем излучения и тепловыми колебаниями решетки, т.е. сопровождающиеся поглощением или испусканием фонона, называются непрямыми или неvertикальными переходами (переход 2 на рис. 2 б).

Вероятность не прямых переходов значительно меньше вероятности прямых переходов, проявляются они в той спектральной области, где энергия кванта недостаточна для прямых переходов. Спектральные зависимости коэффициентов поглощения, отвечающих прямым и непрямым переходам, различны:

при прямых переходах

$$\alpha \sim (h\nu - \Delta E_0)^{1/2}, \quad (5)$$

при не прямых переходах

$$\alpha \sim (h\nu - \Delta E_0)^2 \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) описывают спектральную зависимость α только в области края основного поглощения ($h\nu \sim \Delta E$), так как при $h\nu \gg \Delta E$ $\alpha \approx \text{const}$, а при $h\nu < \Delta E$ $\alpha=0$ (если не учитывать другие виды поглощения).

Если исследуемый полупроводник имеет структуру энергетических зон электронов, аналогичную изображенной на рис. 2а., край поглощения описывается формулой (5). В полупроводниках второго типа начальный участок возрастания коэффициента поглощения описывается формулой (6)

($h\nu < \Delta E_0$). Формула (5) описывает спектральную зависимость α для той области значений $h\nu$, для которой $h\nu > \Delta E_0$, т.е. становятся возможными прямые переходы, а так как их вероятность намного превышает вероятность не прямых переходов, то имеем большие значения α . Зависимости α от $h\nu$, свойственные прямым переходам представлены на рис. 3.

Разные зависимости α от $h\nu$ для прямых и не прямых переходов используются при анализе экспериментальных данных о форме края полосы собственного поглощения для выяснения характера электронных переходов и определения ширины запрещенной зоны, отвечающей прямым (ΔE_0) и не прямым (ΔE) переходам.

Ширина запрещенной зоны, определенная по температурной зависимости концентрации носителей заряда (или проводимости), обычно называется «термической» шириной запрещенной зоны и отвечает минимальному энергетическому расстоянию между зонами.

В этом случае перевод электрона в зону проводимости осуществляется за счет тепловой энергии, отсюда и название ΔE – термическая. Исследование формы края основного оптического поглощения, как показано выше, тоже позволяет получить значение ширины запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны, определенная из данных по поглощению, носит название «оптической». Наличие двух типов электронных переходов – прямых и не прямых - приводит к определению двух величин - ΔE_0 и ΔE . В соответствии с (5) и (6) можно выделить участки спектра, отвечающие прямым и не прямым переходам и, экстраполируя α к нулевому значению, определить ΔE_0 и ΔE . В той спектральной области, где имеют место не прямые переходы (область малых частот), экспериментальные значения $\alpha^{1/2}$ линейно зависят от $h\nu$. В области более коротких длин волн, где $h\nu$ достаточно для прямых переходов, $\alpha^2 \sim h\nu$. Экстраполируя в каждом случае прямую к $\alpha = 0$, определим ΔE_0 и ΔE .

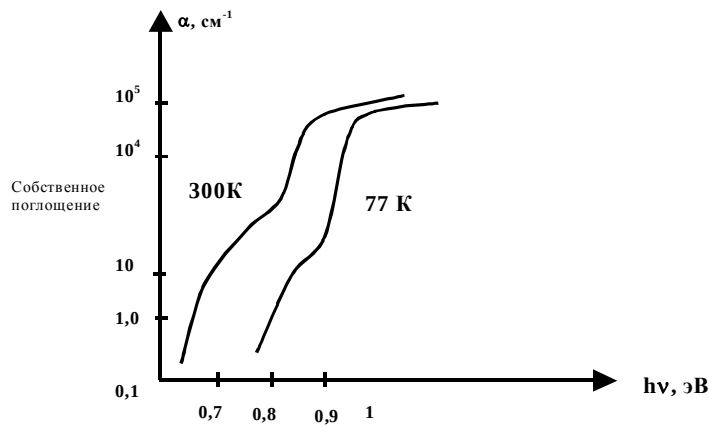


Рис. 3

Экспериментальное определение ширины запрещенной зоны.

Для того, чтобы определить ширину запрещенной зоны, надо знать зависимость коэффициента поглощения от длины волны в области края собственного поглощения. Для вычисления коэффициента поглощения экспериментально измеряются в зависимости от длины волны коэффициенты

отражения света образцом $R = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}}$ и пропускания $T = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}}$. Для достаточно толстых образцов, для которых можно пренебречь эффектами интерференции, справедливо следующее выражение:

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2}{e^{\alpha d} - R^2 e^{-\alpha d}} \quad (7)$$

Зная T и R , из (7) можно вычислить α (d - толщина образца). Экспериментально установлено, что α определяется с максимальной точностью при выполнении соотношения $\alpha d \sim 1$.

Так как в исследуемой спектральной области λ изменяется от долей обратного см. до 10^5 см^{-1} , для получения зависимости $\alpha = f(h\nu)$ надо иметь набор образцов различной толщины (от нескольких микрон до нескольких миллиметров).

В настоящее время надежно установлено значение коэффициента отражения в области края собственного поглощения для Ge и Si, поэтому при определении коэффициента поглощения этих материалов можно

ограничиться определением спектральной зависимости пропускания, используя R из литературных данных. Вычислив $\alpha = f(h\nu)$ и установив, каким переходам отвечает исследуемая спектральная область коэффициента поглощения, можно определить ΔE , отвечающую данному оптическому переходу. Менее строгую оценку ширины запрещенной зоны можно получить, записывая спектр пропускания полупроводника, которое резко возрастает с увеличением длины волны. Зная длину волны λ^* при которой коэффициент пропускания равен половине максимального значения, найдем ΔE , $\Delta E = hc/\lambda^*$; если λ^* выразить в микронах, то $\Delta E = 1,2395/\lambda^*$ эВ.

Задание

Определить «оптическую» ширину запрещенной зоны исследуемых полупроводников.

Порядок выполнения работы:

1. Внимательно изучить инструкцию по обращению с инфракрасным спектрометром ИКС–14.
2. Разобраться в основах оптической схемы прибора.
3. Подключить прибор к сети (220 В) и подготовить его к работе, строго соблюдая прилагаемые правила.
4. Записать спектры пропускания света образцами Ge и Si.
5. Обработать спектрограммы Ge и Si, пользуясь градуировочным графиком зависимости длины волны от деления барабана длин волн.
6. Вычислить «оптическую» ширину запрещенной зоны германия и кремния.

Литература

1. В.С. Вавилов «Действие излучений на полупроводники», Физмагиз, 1963, стр. 12-24.
2. Р.Смит. «Полупроводники», ИЛ, 1962, стр. 195 - 234.
3. Инструкция к прибору ИКС-14.

Лабораторная работа №3

Ознакомление с устройством монохроматора, его оптической схемой. Монтаж схемы для измерения оптического пропускания.

Цель работы - ознакомление с устройством монохроматора, с методикой измерения оптического пропускания тонких слоев полупроводниковых материалов.

1. Назначение

РЕГИСТРИРУЮЩИЙ спектрофотометр СФ-10 предназначен для измерения оптических плотностей, относительных коэффициентов пропускания, абсолютных и относительных коэффициентов диффузного отражения различных твердых и жидких образцов в видимой области спектра.

2. Основные данные

Рабочий диапазон прибора - 400-750 ммк

Монохроматор - призмный, двойной.

Относительное отверстие - 1:7

Дисперсия:

для длины волны	400 ммк	1,6 ммк/мл
»	»	» 500 ммк
»	»	» 600 ммк
»	»	» 750 ммк

Продолжительность записи:

1-я скорость	3,5 мин.
2-я	2,4 мин.
3-я скорость	2,0 мин.
4-я	» 1,5 мин.

Источник света - кинопроекционная лампа К30. Приемник энергии - висмут-серебряно-цезиевый фотоэлемент Ф-3.

Потребляемая мощность 250 Вт

Напряжение питания 220 В

Габаритные размеры прибора 1150 X 60 X 380 мм

Вес ~ 300 кг

3. Принцип действия и схема прибора

Принцип действия

Спектрофотометр состоит из осветителя, двойного призмного монохроматора, фотометра поляризационного типа, записывающего механизма и приемно-усилительной части. Принцип действия прибора основан на нулевом методе и заключается в следующем.

Монохроматический пучок света делится призмой Рошона на два плоскополяризованных пучка. Один пучок падает на призму Волластона (другой пучок диафрагмируется) и снова делится на два пучка,

поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Так как на призму Волластона падает плоско-поляризованный пучок света, направление плоскости поляризации которого определяется угловым положением призмы Рошона, то угол поворота призмы Рошона относительно неподвижной призмы Волластона определяет распределение интенсивности света в обоих пучках за призмой Волластона.

После призмы Волластона пучки поочередно перекрываются вращающимся барабаном модулятора таким образом, что началу открытия одного пучка соответствует начало закрытия второго. После модулятора пучки проходят кюветное отделение, передние окна интегрирующего шара и падают на окна, к которым прижимаются образец и эталон, в случае определения коэффициента отражения, или два эталона, в случае определения коэффициента пропускания (в последнем случае па пути одного из лучей в кюветном отделении устанавливается кювета с образцом).

Свет, отраженный от образца и эталона, после многократных отражений от стенок шара освещает фотоэлемент, расположенный за окном шара, закрытым молочным стеклом.

Освещенность фотоэлемента в каждый момент времени определяется суммой мгновенных потоков, отраженных от образца и эталона. Если световые потоки, отраженные образцом и эталоном, равны, то освещенность фотоэлемента будет постоянна в любой момент времени и сигнал переменного тока на входе усилительной системы будет отсутствовать. При наличии поглощения образцом суммарный световой поток на фотоэлементе будет изменяться с частотой 50 гц и на входе усилителя появится сигнал такой же частоты. Напряжение сигнала усиливается и подается на обмотку якоря электродвигателя отработки, который с помощью фотометрического кулачка поворачивает призму Рошона до тех пор, пока не исчезнет разность световых потоков, т. е. пока не исчезнет сигнал на входе усилителя. Одновременно с поворотом призмы происходит перемещение пера по бланку, фиксирующее пропускание (отражение) или оптическую плотность образца. Средняя щель прибора перемещается вдоль спектра, изменяя длину волны света, выходящего из монохроматора. Одновременно с этим поворачивается барабан записывающего механизма, на бланке которого записывается кривая спектрального отражения (пропускания) или оптической плотности.

Оптическая схема

Оптическая схема прибора с коллиматором и двумя сменными камерами показана на рис. 1.

Свет от источника, пройдя коллиматор, параллельным пучком падает на диспергирующую систему призм, которая разлагает пучок белого света в спектр и одновременно поворачивает осевой луч на 90° . Разложенный пучок света с помощью объектива камеры фокусируется на фотопластинку

Прибор с камерой $F = 120$ мм хорошо разрешает дублет натрия $5889,95\text{--}5895,92 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 5,97 \text{ \AA}$, а с камерой $F = 270$ мм - линии спектра железной дуги:

$4066,98 - 4067,28 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 0,3 \text{ \AA}$,

$4871,33 - 4872,15 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 0,82 \text{ \AA}$,

$4919,00 - 4920,51 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 1,51 \text{ \AA}$,

$6408,04 - 6411,67 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 3,63 \text{ \AA}$.

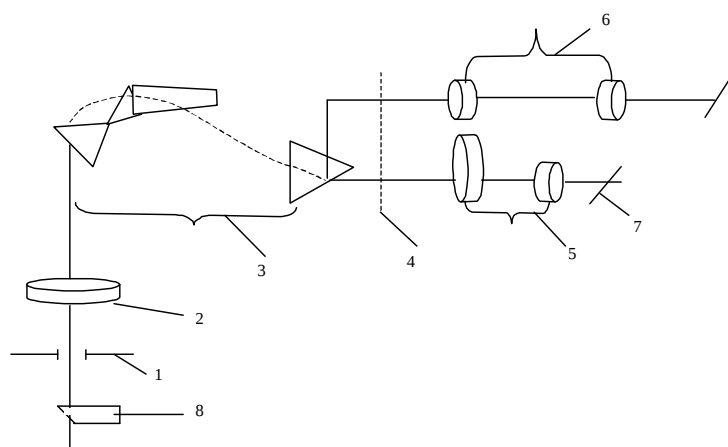


Рис. 1. Оптическая схема: 1 - входная щель коллиматора; 2 - объектив коллиматора; 3 - диспергирующая система, состоящая из трех призм с преломляющими углами 63° и общей базой 210 мм; 4 - съемная диафрагма; 5 - объектив камеры с фокусным расстоянием 120 мм; 6 - объектив камеры с фокусным расстоянием 270 мм; 7 - плоскость изображения спектра; 8 - призма сравнения.

Конструкция

Конструктивно прибор состоит из монохроматора с фотометром поляризационного типа и приемно-усилительной части.

Монохроматор и фотометр расположены на верхней плите чугунного основания, приемно-усилительное устройство расположено внутри основания прибора. Сверху прибор закрыт литым кожухом. На боковых стенках кожуха имеются два окна, закрытые шторками: окно служит для

наблюдения за изображением нити лампы относительно объектива коллиматора, окно, расположенное с противоположной стороны кожуха, дает доступ к барабанчику изменения ширины выходной щели и к винту тонкого поворота призмы Рошона. В передней части кожуха имеется откидная крышка для доступа к записывающему механизму.

В качестве источника излучения в спектрофотометре используется кинопроекторная лампа КЗ0, которая находится внутри кожуха. Рукоятки служат для юстировки лампы

Входная щель монохроматора смонтирована на кронштейне. На этом же кронштейне крепится конденсор. Входная и выходная щели раскрываются симметрично от кулачка, рассчитанного по закону, обеспечивающему постоянство энергии по спектру. Не нарушая закона раскрытия щелей, задаваемого кулачком можно увеличить ширину входной щели барабанчиком, а выходной - барабанчиком, предварительно отвернув винт. Для компенсации вызываемого призмами искривления изображения входная и выходная щели изогнуты.

Развертка спектра осуществляется перемещением зеркала средней щели от кулачка, обеспечивающего равномерную шкалу длин волн. Отсчет длин волн производится по шкале.

Кулачковый механизм приводится в действие либо от электродвигателя включением соответствующего выключателя на щите управления, либо от руки с помощью рукоятки. Вращение вала кулачкового механизма от электродвигателя происходит только в одном направлении - в сторону увеличения длин волн, вращение его от руки в этом же направлении происходит без ограничения, а в обратном направлении оно ограничено специальным фиксатором, предохраняющим механизм от поломки.

Призма Рошона смонтирована в кронштейне. Оправа призмы жестко связана с радиусным сектором, на котором укреплен один конец плоской пружины; другой конец укреплен па штоке, который с помощью противовеса прижимается к фотометрическому кулачку.

Переключение фотометрического кулачка пропускания на кулачок оптической плотности и обратно производится с помощью рукоятки. Для переключения необходимо потянуть на себя шток за рукоятку и повернуть ее в нужную сторону. При установке в рабочее положение кулачка пропускания против винта встанет буква «Т», при рабочем положении кулачка оптической плотности - буква «Д». Винт служит для тонкого поворота призмы Рошона при установке пера на линию стопроцентного пропускания и на линию нулевой плотности.

Призма Волластона укреплена неподвижно на кронштейне. Прерыватель света укреплен на оси электродвигателя.

Записывающее устройство состоит из барабана и каретки, скользящей по цилиндрическому направляющему. Оправа со стеклянным пером надевается на каретку, жестко связанную с капроновым тросиком. На барабане с помощью прижима укрепляется бланк для записи. Бланк представляет собой сетку, по одной оси которой расположена шкала длин волн от 400 до 750 мкм, по другой - слева шкала пропусканий от 0 до 100%, справа - шкала оптической плотности от 0 до 2,5. Кнопка служит для поднятия пера при установке бланков.

Под записывающим механизмом расположен щиток с выключателями: «сеть», «лампа», «развертка спектра», «отработка», «изменение направления», ««модулятор» и переключателем «скорость развертки спектра». Выдвижной ящик служит для хранения запасных частей и принадлежностей.

На плато смонтированы кюветное отделение и интегрирующий шар. Кюветное отделение служит для установки образцов, измеряемых на пропускание. Твердые прозрачные образцы и кюветы с жидкостью помещаются в специальный держатель, выполненный в виде тисков, и зажимаются винтом. Держатель вставляется в направляющую кюветного отделения.

Для измерения пропускания жидкостей имеется набор парных кювет с толщиной слоя 5, 10, 20 и 50 мм. Для измерения мутных сред и прозрачных порошков на пропускание служит держатель с лапками, в который вставляется круглая кювета. Держатель при работе помещается во входные окна.

Для измерения порошков на отражение служит кювета, помещаемая на место эталона. Для исключения зеркальной составляющей отражения имеются специальные карманы, которые можно установить в боковые отверстия шара. Внутри шара имеются два экрана, предназначенные для предотвращения попадания света от образца непосредственно на фотоэлемент при измерении абсолютных коэффициентов отражения: верхний экран - для предотвращения попадания света, прошедшего через образец, нижний - для предотвращения попадания света, отраженного от образца.

Для включения экранов необходимо оттянуть рукоятку.

Электрическая часть прибора состоит из входного блока, включающего фотоэлемент и усилитель напряжения, и выходного блока, включающего усилитель мощности и выпрямитель.

Все детали и узлы усилителя смонтированы на шасси. На верхней панели шасси расположены фотоэлемент, входные сопротивления и электронные лампы. Для уменьшения шумов лампа (6K7) подвешена на пружинных подвесках. Три лампы 6Н9С усилителя напряжения закрыты общим кожухом для устранения влияния свечения этих ламп на фотоэлемент.

На верхней панели шасси выходного блока расположены силовой трансформатор, дроссель и электронные лампы. Трансформатор и дроссель закрыты стальным экраном. На боковую панель блока выведены рукоятка регулятора усиления и клеммы «контроль».

Входной и выходной блоки соединяются шлангом, вмонтированным в корпус прибора.

Фотоэлемент установлен на кронштейне, который откидывается вниз, для того чтобы можно было вынуть блок из корпуса прибора. Для подъема кронштейна служит рукоятка.

Подготовка прибора к работе

1. Установить перо с оправой в каретку записывающего устройства и поднять его, оттянув кнопку.
2. Установить бланк на барабане записывающего механизма, для чего: обрезать бланк со стороны шкалы длин волн так, чтобы линия отреза прошла через обе риски; вращением барабана установить его так, чтобы прижим находился примерно на одной линии со шкалой длин волн; поднять прижим, навернуть на барабан бланк так, чтобы обрезанный край его вплотную прилегал к правому бортику барабана, и опустить прижим; установить по шкале длин волн отсчет 400 мкм; опустить перо и вращением барабана вручную точно совместить острие пера с линией бланка, соответствующей 400 мкм.
3. Выключить выключатели на щитке управления.
4. Включить прибор выключателем «сеть», при этом должна загореться сигнальная лампа на щитке управления.
5. Дать прибору прогреться в течение 5 мин.
6. Включить выключатель «лампа».
7. Отъюстировать лампу накаливания с помощью рукояток. Добиться такого положения лампы, при котором изображение нити заполнит объектив коллиматора и будет резким (наблюдение вести через боковое окно в кожухе). Лампа предварительно должна быть промыта спиртом или эфиром.
8. Выключить выключатель «лампа».
9. Включить выключатель «модулятор».
10. Включить обмотку возбуждения реверсивного электродвигателя выключателем «отработка».

11. Повернуть рукоятку «регулировка усиления», в крайнее правое положение (максимальное усиление).

12. Включить выключатель «лампа». Перо должно перемещаться в сторону линии стопроцентного пропускания, если установлен кулачок «Т», и в сторону линии нулевой плотности, если установлен кулачок «Д». Переключить переключатель «изменения направления», если перо перемещается в противоположную сторону.

13. Установить по шкале длин волн 420 мкм, при этом должны наблюдаться колебания пера. Вращать рукоятку «регулировка усиления» в сторону уменьшения усиления до тех пор, пока не прекратятся колебания пера. Для проверки правильности установки усиления предлагается следующий способ: коснуться пальцем верхней клеммы «контроль», при этом перо должно отойти в сторону, затем убрать палец - перо должно вернуться в первоначальное положение с одним-двумя колебаниями. Если наблюдается несколько колебаний, усиление надо уменьшить, если же перо медленно подходит к первоначальному положению, усиление следует прибавить.

Проверка работы прибора

1. Установить входную и выходную щели в положение «1», «2» или «3» согласно указанию на контрольной записи, приложенной к аттестату.

2. Включить в рабочее положение кулачок «Т» поворотом рукоятки.

3. Установить бланк на барабане записывающего устройства.

4. Установить максимальную скорость записи, поставив переключатель «скорость развертки спектра» в положение «4».

5. Включить выключатель «отработка».

6. Включить выключатель «лампа», при этом перо должно перемещаться в сторону линии стопроцентного пропускания.

7. Установить перо винтом примерно на линию бланка, соответствующую 90% пропускания.

8. Опустить перо, нажав кнопку, включить выключатель «развертка спектра», произвести запись кривой стопроцентного пропускания и выключить выключатель.

9. Установить перо винтом в положение при котором кривая стопроцентного пропускания имела бы одинаковый разброс ошибок в обе стороны относительно линии «100» на бланке.

10. Выключить выключатели «скорость развертки спектра» и «отработка».

11. Закрепить в держателе светофильтр № 1 и установить его на пути правого (по ходу лучей) пучка.

12. Включить выключатель «отработка», а затем «развертка спектра» и произвести запись светом фильтра при нахождении переключателя «скорости развертки спектра» в положении «1», после чего выключить выключатели «отработка» и «развертка спектра».

13. Установить в кюветное отделение держатель со светофильтром № 2 и записать кривую спектрального пропускания, после чего выключить выключатели «отработка» и «развертка спектра».

14. Рукояткой установить в рабочее положение кулачок «Д» и переключить переключатель «изменения направления».

15. Установить перо винтом на линию нулевой плотности бланка.

16. Установить в кюветное отделение светофильтр № 3 и, включив прибор, записать кривую оптической плотности фильтра, после чего выключить прибор.

17. Снять бланк с записывающего устройства, поднять прижим и сравнить полученную запись фильтров с записью, приложенной к аттестату.

18. Сравнение записи фильтра № 1 вести по узким полосам поглощения, смещение кривой по длинам волн должно быть не более + 0,5 ммк. Кривая фильтра № 2 не должна иметь смещений по процентам пропускания более чем на +0,3%; кривая фильтра № 3 не должна иметь смещений по оптической плотности более чем на + 0,0075

Практические замечания

Прибор позволяет производить измерения коэффициентов пропускания (отражения) в пределах от 1 до 100%. При измерении образца с пропусканием в некотором интервале длин волн менее 1 % перо может отклониться за «0» шкалы пропусканий. Как только пропускание образца станет больше 1%, перо автоматически выйдет на шкалу бланка.

При переключении кулачка «Т» на кулачок «Д» необходимо проверить установку нулевой плотности, а при переключении кулачка «Д» на кулачок «Т» - установку на стопроцентное пропускание. При установке какого-либо деления по шкале длин волн необходимо вращать ее в сторону увеличения показаний. Если при этом шкала повернется на большую величину, нужно отвести ее назад и снова подвести на требуемое деление. Таким же образом необходимо устанавливать отсчет шкалы длин волн на 400 ммк при установке бланка.

Точность показаний прибора в значительной мере зависит от правильной установки бланка, а также от его линейных размеров как по длинам волн, так и по шкале пропускания. Необходимо обрезать бланк точно по рискам с помощью металлической линейки. Бланк при установке должен плотно охватывать барабан, а обрезанный край должен прилегать к правому бортику барабана по всей длине, при этом острие пера должно точно совпадать с линией бланка, соответствующей 400 ммк.

Во избежание поломки пера следует держать его в приподнятом положении до тех пор, пока прибор не будет полностью подготовлен к записи. После установки или снятия бланка прижим записывающего механизма необходимо опустить. Неопущенный прижим может привести к поломке пера.

Для замены пера необходимо: поставить новое перо в держатель, а держатель - в каретку записывающего механизма; точно обрезать бланк и установить его на барабан записывающего механизма; включить прибор и, регулируя винтом, добиться совмещения отметки «100» шкалы с индексом,

при этом острие пера должно совпасть с линией «100» на бланке. В случае несовпадения острия пера с линией «100» бланка необходимо освободить винт и, регулируя винтами, добиться такого положения, при котором острие пера будет совпадать с линией «100» бланка, а отметка «100» шкалы будет совмещена с индексом. Наблюдение вести через окно. Регулировку винтом производить с помощью отвертки, при этом каретку необходимо придерживать, чтобы избежать растяжения капронового троса.

При измерении образцов, имеющих узкие полосы поглощения или поглощение которых резко меняется с изменением длины волны, правильность показаний зависит от скорости развертки спектра и ширины щели: чем меньше скорость развертки спектра и уже щель, тем более достоверны показания прибора.

В случае возникновения автоколебаний во время записи нужно уменьшать усиление. Необходимо следить, чтобы шторка была вдвинута до упора. Не рекомендуется трогать барабан модулятора во избежание его деформации.

Состав для приготовления чернил

Эозин натрия или алюминия (краситель)	8-15 г
Сахар или глюкоза	15 г
Глицерин	20 см ³
Фенол	1,5 г
Вода дистиллированная	1000 см ³

При изготовлении чернил раствор следует нагреть до кипения и отфильтровать. Порция состава, имеющегося в комплекте прибора, рассчитана на 100 см³ воды.

Если чернила не заполняют капилляр, надо прочистить его иглой из бронзовой проволоки диаметром 0,1 мм. Нельзя применять иглы из стальной или более толстой бронзовой проволоки. Если чистка не дает должного

эффекта, перо следует промыть теплой водой, предварительно удалив чернила, прочистить иглой и снова заполнить чернилами.

Задание

1. Ознакомиться с устройством СФ-10 и его оптической схемой;
2. Провести измерения оптического пропускания тонких слоев полупроводниковых материалов (CdS , As_2Se_3).
3. Определить ширину запрещенной зоны по оптическому пропусканию.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ.

Цель работы - исследование спектров светодиодов из арсенида галлия (GaAs) и фосфида галлия (GaP) - полупроводниковых соединений из группы A^3B^5 . Исследование зависимости интенсивности излучения от тока, мощности и квантового выхода излучения.

Если в полупроводнике возбуждаются неравновесные электронно-дырочные пары, то часть энергии при рекомбинации может излучаться в виде квантов света. Такой процесс называется излучательной рекомбинацией - люминесценцией.

Один из наиболее удобных способов возбуждения полупроводника - пропускание прямого тока через р-п - переход, т. е. инжекция неосновных носителей.

Излучательная рекомбинация, возбуждаемая прямым током через р-п-переход, называется инжекционной электролюминесценцией. При этом в

полупроводниковых диодах происходит прямое преобразование энергии электрического тока в энергию света, (рис. 1)

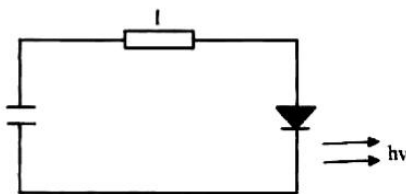


Рис. 1. Схема преобразования энергии электрического тока в энергию излучения в люминесцентном диоде

Люминесцентные диоды - светодиоды - имеют важные практические применения, так как коэффициент преобразования электрической энергии в световую в них велик.

Механизмы излучательной рекомбинации.

Процесс рекомбинации электронов и дырок может сопровождаться излучением квантов света $h\nu$ в том случае, если выделяемая при захвате носителей энергия значительно превышает ту, которую может поглотить решетка. Так, при непосредственной межзонной рекомбинации электронов и дырок выделяемая энергия равна или несколько превышает ширину запрещенной зоны полупроводника; в GaAs это $\approx 1,4$ эв, в GaP - 2,2 эв. Энергия же теплового движения атомов при комнатной температуре - всего 0,026 эв, а энергия квантов колебаний решетки фононов - порядка 0,03-0,05 эв. Следовательно, $h\nu_{\text{изл}} \approx \Delta\varepsilon_{\text{I}}$. В процессе рекомбинации через мелкие примесные центры энергии, выделяемые при захвате электрона на акцепторный уровень и дырки на донорный, также близки к $\Delta\varepsilon_{\text{I}}$ (см. рис. 2, а, б).

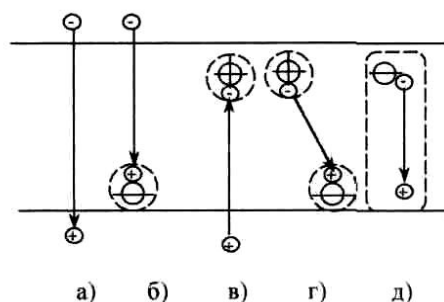


Рис. 2. Различные механизмы излучательной рекомбинации в полупроводнике: а - межзонная рекомбинация электрон-дырка; б, в - рекомбинация оона - акцептор и донор - Δ -зона; г - межпримесная рекомбинация донор-акцептор; д -рекомбинация связанного экситона.

Если в полупроводнике кроме «мелких» есть глубокие примесные центры, рекомбинация на которых идет безызлучательным путем, то доля излучательной рекомбинации понижается и может быть даже сведена на нет. Таким образом, повышение интенсивности излучения светодиода требует определенного примесного состава полупроводника.

Вероятность межзонной излучательной рекомбинации существенно зависит от энергетического спектра полупроводника. Если абсолютный минимум с-зоны и абсолютный максимум Δ -зоны полупроводника расположены, в одной точке зоны Бриллюэна, то излучательные переходы могут происходить без изменения квазиимпульса, это - прямые переходы (рис. 3,а). Если положения абсолютных экстремумов с - и Δ -зон в зоне Бриллюэна не совпадают (рис. 3,б), то при излучательном переходе должно происходить изменение квазиимпульса электрона. Для соблюдения законов сохранения часть энергии и избыточный квазиимпульс должны передаваться третьему «телу» - примесному атому или кванту колебаний решетки - фонону. Такие переходы называются непрямыми. Поскольку для непрямого перехода необходимо взаимодействие трех «частиц», то его вероятность много меньше вероятности прямого перехода.

Число межзонных излучательных переходов в единицу времени в единице объема пропорционально произведению концентраций рекомбинирующих электронов и дырок

$$R = B \text{ пр (1)}$$

Постоянные B для полупроводников с прямыми и непрямыми переходами существенно различны и равны по порядку величины соответственно 10^{-10} и $10^{-14} \text{ см}^3 \text{сек}^{-1}$.

Если излучательная рекомбинация дырок (в полупроводнике n-типа) идет на донорные уровни или рекомбинация электронов (в полупроводнике p-типа) на акцепторные уровни, то число излучательных переходов пропорционально концентрациям соответствующих уровней (центров):

$$R_d = B_d \cdot N_d \cdot p, \quad R_a = B_a \cdot N_a \cdot n, \quad (2)$$

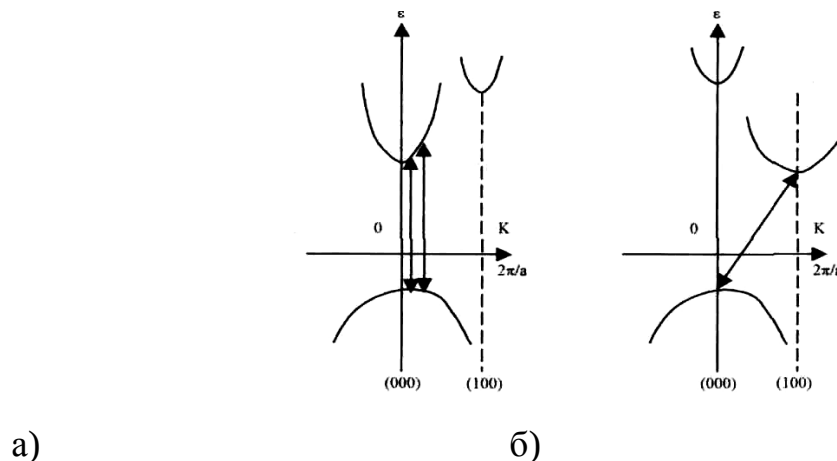


Рис. 3. Прямые (а) и не прямые (б) межзонные переходы.

Постоянные R_d и R_a - того же порядка, что и постоянные для межзонных переходов, но для не прямых переходов они много меньше, чем для прямых.

В светодиодах излучательная рекомбинация в большинстве случаев идет с участием примесей.

В полупроводниках, с не прямыми переходами излучательный механизм может давать существенный вклад в полную рекомбинацию, если и

электрон и дырка последовательно захватываются на примесный центр, а затем возбуждение, локализованное вблизи центра, передается квантам света. Возбужденный комплекс, состоящий из электронно-дырочной пары и примесного центра, называется связанным экситоном (см. рис. 2, д). В светодиодах GaP, исследуемых в настоящей работе, при комнатной температуре наиболее интенсивно излучение экситонов, связанных на примеси азота N (зеленая полоса с максимумом вблизи 2,2 эВ) или на паре примесных атомов цинк-кислород Zn-O (красная полоса с максимумом вблизи 1,77 эВ). При более низких температурах оказывается преобладающей излучательная рекомбинация на парах примесных атомов донор-акцептор, расположенных в решетке на некотором расстоянии друг от друга. В этом случае рекомбинируют электрон, предварительно захваченный донором, и дырка, предварительно захваченная акцептором (рис. 2,г).

Спектры излучения. Положение максимума спектральной полосы излучения зависит прежде всего от ширины запрещенной зоны полупроводника и от энергии ионизации примесей, участвующих в рекомбинации. Если $\Delta\epsilon_I < 1,6$ эВ, а энергии $\Delta\epsilon_{dc}$, $\Delta\epsilon_{a\bar{a}} \ll \Delta\epsilon_I$, то излучение лежит в инфракрасной области спектра ($\lambda > 0,8$ мкм). Если $1,6\text{эВ} < \Delta\epsilon_I < 3,1$ эВ, то межзонное и близкое к нему «примесное» излучение лежит в видимой части спектра ($0,4\text{ мкм} < \lambda < 0,8\text{ мкм}$). Выбирая полупроводник и регулируя его примесный состав, можно получить излучение в широком диапазоне длин волн.

Поскольку излучение диодов люминесцентное, а не тепловое, его спектральное распределение намного уже спектрального распределения излучения черного тела, к которому близок спектр ламп накаливания.

Задача о теоретическом анализе формы спектра излучения полупроводника очень сложна, если необходимо учитывать особенности взаимодействия электронов с примесями и фононами. Мы рассмотрим следующий простой случай. Пусть рекомбинация идет в полупроводнике p-типа и обусловлена излучательными переходами (электронов) с-зона —

акцепторная примесь, дискретный уровень которой стоит от нижнего края зоны ε_c на расстоянии $\Delta\varepsilon_{ac}$. Пусть рассматриваемая зона простая, параболическая, с зависимостью плотности состояний от энергии в виде

$$N_c(\varepsilon) = \text{const} (\varepsilon - \varepsilon_c)^{1/2} \quad (3)$$

Будем считать, что при нарушении равновесия функция распределения электронов в с-зоне больцмановская, определяемая положением квазиуровня Ферми:

$$f_c(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp[(\varepsilon - F_n) / kT]} \approx \exp\left(\frac{\Delta F_{nc}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{kT}\right) \quad (4)$$

а дырки полностью заполняют акцепторный уровень, т. е. его функция заполнения $f_a=1$.

Исходя из закона сохранения энергия излучаемого кванта равна

$$h\nu = (\varepsilon - \varepsilon_c) + \Delta\varepsilon \quad (5)$$

где $\varepsilon - \varepsilon_c$ - энергия рекомбинирующих электронов относительно нижнего края с-зоны. Если вероятность B - перехода не зависит от ε , то связь между интенсивностью излучения величиной $h\nu$ может быть выражена как

$$I(h\nu)D(h\nu) = \text{CONST} \cdot \exp(\Delta F_{NC}/KT) X^{1/2} \exp(-X) DX, \quad (6)$$

где

$$X = \frac{h\nu - \Delta\varepsilon_{ac}}{kT}$$

Характерным для такого простого спектра является положение максимума в точке

$$h\nu = \Delta\varepsilon_{ac} + 1/2 kT, \quad (7)$$

ширина спектральной полосы на половине интенсивности

$$\Delta(h\nu)_{1/2} = 1,8 kT \quad (8)$$

и сравнительно резкий обрыв спектра со стороны малых энергий.

Все взаимодействия электронов и дырок между собой, с примесями и фононами должны приводить к уширению спектра, в особенности в его длинноволновой части,

В настоящей работе экспериментальные данные для GaAs сравниваются с формулами (6) - (8).

Заметим, что концентрация электронов в зоне проводимости определяется интегралом

$$n = \int N_c(\varepsilon) \cdot f_c(\varepsilon) d\varepsilon \approx \exp\left(-\frac{\Delta F_{nc}}{kT}\right) \quad (9)$$

Используя сделанные предположения и формулы (3) - (6), можно показать, что из них следует зависимость интегральной интенсивности излучения от концентрации электронов n в виде

$$R = \int I(h\nu) d(h\nu) = \frac{n}{\tau_{изл}}, \quad (10)$$

где излучательное время жизни

$$\tau_{изл} = (B_a \cdot N_a)^{-1} \quad (11)$$

Особенности излучательной рекомбинации в р-п-переходе.

Рассмотрим простой случай рекомбинации в диоде, когда основная часть тока при прямых напряжениях определяется инжекцией электронов в р-область; причем основная компонента тока - диффузионная. Пусть в этой же области идет излучательная рекомбинация по рассмотренному выше механизму. Тогда при прямых напряжениях $U \gg kT/q$

$$I = I_n = I_{sn} \exp(qU/kT), \quad (12)$$

где

$$I_{sn} = (S \cdot q \cdot n_p \cdot L_n) / \tau_n$$

Здесь S - площадь, L_n - диффузионная длина, τ_n - время жизни электронов.

Если уровень инжекции небольшой, то на границе р - области и области пространственного заряда положение квазиуровня Ферми для электронов определяется приложенным напряжением:

$$qU = F_n - F_p = \text{const} \quad (13)$$

Сравнивая формулы (6) и (12), (13), мы видим, что поскольку и полный ток, и интегральный поток рекомбинации R пропорциональны концентрации инжектированных электронов $n = n_p \exp(qU/kT)$, то R пропорционально I .

Пусть Φ_i есть полное число излучаемых квантов, т. е. интеграл от R по всему объему $\mathcal{V}$, где идет рекомбинация. В однородном случае

$$\Phi = \int R d\mathcal{V} = R \cdot S \cdot L_n \quad (14)$$

Тогда отношение полного числа излучаемых квантов к числу электронов, пересекающих р-п - переход (в единицу времени), равно

$$\eta = \frac{\Phi_i}{\frac{1}{q} I}, \quad (15)$$

где η_i называется внутренним квантовым выходом излучения диода и, как следует из формул (9) - (14), для нашего простого случая

$$\eta = \frac{\tau_n}{\tau_{изл}} \quad (16)$$

Физический смысл внутреннего квантового выхода понятен - он характеризует отношение вероятности излучательной рекомбинации ($1/\tau_{изл}$) к полной вероятности рекомбинации ($1/\tau_n$).

Во многих случаях рассмотренная нами простая картина не описывает реальные условия. В частности, при рекомбинации в области пространственного заряда зависимость тока от напряжения имеет показатель в экспоненциальной зависимости, отличающийся от q/kT

$$I \cong I_s \exp\left(\frac{qU}{ckT}\right),$$

где постоянная величина c может меняться в пределах от 1 до 2.

Если при этом излучательная рекомбинация определяется диффузионным током, т. е

$$\Phi \approx \exp\left(\frac{qU}{kT}\right), \quad (17)$$

то зависимость интенсивности излучения от тока имеет степенной вид

$$\Phi_I \sim I_c \quad (18)$$

с показателем степени в пределах от 1 до 2.

В диодах часто наблюдается переход от квадратичной зависимости ($c=2$) к линейной. В этом случае понятие внутреннего квантового выхода не

имеет простого смысла, выражаемого формулой (16), так как времена жизни могут характеризовать рекомбинацию в разных точках образца и быть функциями концентраций носителей. Зависимости (17), (18) исследуются экспериментально в настоящей работе.

Устройство диодов, внешний квантовый выход излучения и коэффициент полезного действия.

По самому принципу действия, светодиоды должны быть сделаны так, чтобы обеспечить не только большой внутренний квантовый выход излучения, но и вывод излучения во внешнюю среду. На рис. 4, 5 показано устройство люминесцентных диодов, исследуемых в настоящей работе.

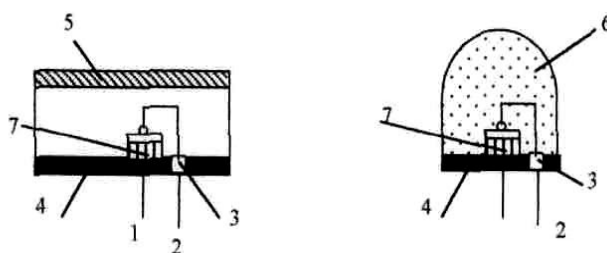


Рис. 4. Устройство люминесцентных диодов (а - GaP, б - GaAs), исследуемых в данной работе: 1-контакт к корпусу и п-области; 2 -контакт к р-области; 3 - проходной изолятор; 4 - корпус; 5 -стеклянное окно; 6 — прозрачная смола; 7 — диод.

Свет может выводиться через поверхность, расположенную сверху от р-п-перехода. Бывают конструкции, когда свет выводится через боковую плоскость.

Поскольку излучение, возникающее вблизи р-п-перехода, должно пройти через объем полупроводника, то часть его при этом поглощается и превращается в тепло. Свет, достигающий поверхности, частично отражается обратно в полупроводник. Так как показатель преломления n большинства полупроводников велик, при больших углах падения происходит полное

внутреннее отражение. Для арсенида галлия и фосфида галлия углы полного внутреннего отражения $\varphi = \arcsin(1/n)$ равны соответственно 16,2 и 12,7°.

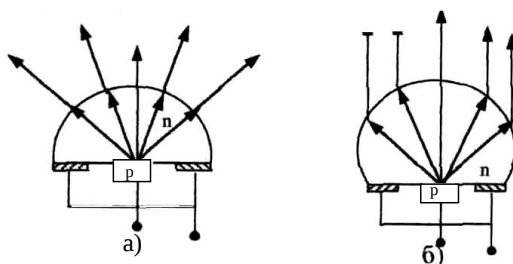


Рис. 5. Устройство люминесцентных диодов с кристаллом в виде: а - полусферы; б - сферы Вейерштрасса

Для того, чтобы уменьшить полное внутреннее отражение, в люминесцентных диодах прибегают к просветляющим покрытиям поверхности прозрачной смолой с показателем преломления, приблизительно равным n . Кроме того, оказывается выгодным делать диоды с внешней поверхностью в виде полусферы или срезанной сферы (сферы Вейерштрасса) (см. рис. 5). В таких конструкциях резко уменьшаются потери на внутреннее отражение, а сфера Вейерштрасса дает дополнительную фокусировку излучения.

Поглощение части излучения перед выходом во внешнюю среду ведет к искажению формы спектра излучения и уменьшению квантового выхода. Наиболее сильно искажается высокоэнергетическая часть спектра, расположенная в области собственного поглощения полупроводника. Поэтому со стороны высоких энергий наблюдаемый спектр может обрываться более круто, чем излучаемый в объеме полупроводника.

Внешний квантовый выход η определяется как отношение интегрального по спектру числа излученных квантов, выходящих во внешнюю среду по всем углам Φ , к числу электронов, пересекающих p-n - переход в единицу времени

$$\eta = \frac{\Phi}{\frac{1}{q}} = \frac{\eta_{onm} \Phi_i}{\frac{1}{q} I} = \eta_i \eta_{onm} , \quad (19)$$

где η_{onm} - коэффициент вывода света или, оптическая эффективность, определяющая уменьшение излучения вследствие поглощения и отражения. Приближенно можно считать, что $\Phi = \Phi(h\nu) \cdot \Delta(h\nu)_{1/2}$.

Внешний квантовый выход представляет важнейшую характеристику люминесцентного диода, определяющую долю преобразования энергии возбужденных электронно-дырочных пар в энергию световых квантов, выходящих из диода.

Однако этот параметр не полностью характеризует преобразование энергии излучения в светодиоде. Энергия квантов $h\nu$ при примесной рекомбинации меньше ширины запрещенной зоны, поэтому полная энергия излучения даже при единичном квантовом выходе может быть меньше энергии возбуждения. Кроме того, часть электрической энергии расходуется на джоулево тепло на сопротивлениях контактов и в толщине образца R_s . Поэтому другим важным параметром диода является коэффициент полезного действия η_p , характеризующий отношение полной выходящей мощности излучения к затраченной электрической мощности $I \cdot V = I \cdot (I \cdot R_s + U)$:

$$\eta_p = \frac{P_{изл}}{P_{эл}} = \frac{\int \Phi(h\nu) \cdot h\nu d(h\nu)}{I^2 R_s + IU}$$

Учитывая, что значение $h\nu = h\nu_m$ в точке максимума спектральной интенсивности $\Phi(h\nu)$ можно вынести за знак интеграла, и используя (10), (14), (15) и (19), получим

$$\eta_p = \eta \frac{h\nu_m}{qV} \quad (20)$$

Таким образом, для наилучшего преобразования энергии тока в энергию света следует, по возможности, уменьшать R_s . В диодах из арсенида галлия величина R_s , обычно порядка 1 ом, в диодах из фосфида галлия, полупроводника более высокоомного, - порядка 10 ом.

Для определения η , η_p необходимо измерять абсолютную мощность излучения, проинтегрированную по всем направлениям. Поскольку диод всегда должен иметь подложку и подводящие контакты, часть излучения неизбежно теряется вследствие поглощения на контактах. Телесный угол, с которого обычно удается собрать излучение при показанной на рис. 4 конструкции, порядка 1стерадиана.

Кроме энергетических характеристик для светодиодов важно положение полос их излучения относительно спектральной чувствительности человеческого глаза, имеющей максимум в зеленой области спектра ($\lambda = 0,55$ мкм). В красной области ($\lambda = 0,70$ мкм) чувствительность глаза падает приблизительно в 30 раз относительно максимума. Поэтому диоды с зеленым свечением при сравнительно малом квантовом выходе обладают большей яркостью, чем красные.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка.

Для исследования спектра излучения полупроводникового диода нужно иметь следующие приборы:

- источник постоянного, переменного или импульсного тока через диод и контролирующие ток и напряжение приборы;
- держатель диода юстировочным устройством относительно входной щели монохроматора;
- монохроматор, разлагающий излучение в спектр, с разрешением, достаточным для выявления нужных деталей спектра;

- фотоприемник с известной спектральной чувствительностью и малым уровнем собственных шумов для регистрации слабых сигналов излучения;
- усилитель электрических сигналов с фотоприемника (желательно проводить резонансное усиление на переменном токе, предварительно модулируя сигнал с определенной частотой);
- синхронный детектор и усилитель постоянного тока с выходным стрелочным прибором или самопишущим потенциометром;
- калиброванный приемник для измерения абсолютной мощности излучения и регистрирующий его сигналы прибор.

Блок-схема установки представлена на рис. 6. Рассмотрим более подробно назначение и характеристики ее основных элементов.

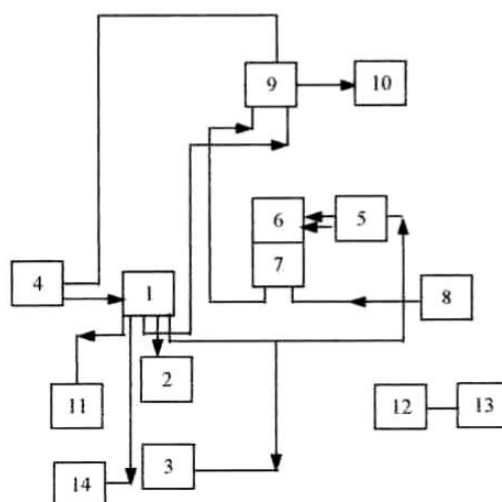


Рис.6. Блок-схема установки для исследования спектров люминесценции: 1 - генератор импульсов тока и источник постоянного тока через диод; 2 - вольтметр В4-1А для измерения амплитуды импульсов; 3 - осциллограф С-1-13; 4 - источник питания генератора и усилителя; 5 - камера образца; 6 - монохроматор ЗМР-3; 7 - корпус с фотоумножителем ФЭУ-22; 8 - высоковольтный выпрямитель ВС-23; 9 - предварительный и резонансный усилители с синхронным детектором; 10 - выходной прибор; 11 - миллиамперметр М-254; 12 - коробочка с фотозлементами; 13 - микроамперметр М-95; 14 - вольтметр М-82

Источник питания, измерение тока и напряжения на диоде. Для модуляции излучения довольно часто используют механические прерыватели света; через образец при этом пропускают постоянный ток. Однако проводниковый люминесцентный диод дает весьма широкие возможности модуляции потока света путем модуляции пропускаемого через него тока. Благодаря малым временам релаксации (порядка 10^{-8} – 10^{-7} сек) возможно практически безынерционно управлять потоком света от диода, настоящей работе применено питание диода прямоугольными импульсами тока частотой 800 гц

Поскольку сопротивление диода в прямом направлении мало, наиболее удобно использовать импульсные генераторы, собранные на полупроводниковых триодах-транзисторах. Транзисторы могут иметь малое выходное сопротивление и давать импульсы большого тока при сравнительно малых падениях напряжения порядка вольта. В условиях настоящей работы, минимальные токи, при которых легко регистрировать излучение диодов, порядка 1 ма для арсенида галлия и 5 ма для фосфида галлия. Максимальные токи, при которых начинает сказываться разогрев диодов и возможен их выход из строя, зависят от конструкции теплоотвода и на постоянном токе порядка 100 ма для арсенида галлия и 50 ма для фосфида галлия. При импульсных напряжениях предельные токи соответственно больше.

Блок-схема генератора импульсов тока необходимой частоты и амплитуды представлена на рис. 7. Генератор состоит из задающего мультивибратора, формирующего каскада - делителя частоты вдвое, усилителя мощности, состоящего из нескольких каскадов. Задающий симметричный мультивибратор дает импульсы напряжения с частотой 1600 гц. Эти импульсы дифференцируются и запускают триггер - делитель частоты вдвое, который дает прямоугольные симметричные импульсы с частотой 800 гц. Выход этих импульсов поступает кроме последующих каскадов усиления на синхронный детектор - как опорный сигнал.

Амплитуда импульсов далее регулируется сопротивлением, выведенным на переднюю панель прибора (две ручки, «грубо» и «точно»), после чего импульсы поступают на усилитель мощности.

Усилитель мощности состоит из каскада усиления по напряжению, предварительного каскада усиления по току и конечного каскада усиления по току, который собран на мощных импульсных транзисторах. С выхода конечного каскада импульс тока поступает на последовательно включенные калиброванное сопротивление 0,1 Ом и исследуемый диод. Заземлена средняя точка между ними.

Напряжение на калиброванном сопротивлении пропорционально току через диод. Оно измеряется импульсным милливольтметром (типа В4-1А). Импульсы напряжения на диоде подаются одновременно на осциллограф (типа С-1-13), на экране которого можно наблюдать их форму и измерять амплитуду.

Источник питания генератора - 12 в - не заземлен (левая половина блока источника питания).

Держатель образца. Исследуемый диод запаян в держателе с фиксированной полярностью. Держатель вставляется в оправу и закрепляется винтом. Оправа вместе с фокусирующим устройством располагается на рейтере оптической скамьи монохроматора и юстируется относительно оптической оси системы специальным котировочным винтом. Точность фокусировки изображения диода на входную щель монохроматора регулируется вращением фокусирующей линзы и смещением рейтера.

Монохроматор ЗМР-3. Величина входной щели зеркального призмного монохроматора ЗМР-3 может, регулироваться от 4 мм и меньше, с точностью 10 мкм (цена деления микрометрического винта).

Свет от щели (рис. 8) поступает на сферическое зеркало, которое направляет пучок на призму. После призмы пучок попадает на плоское зеркало, которое может вращаться с помощью рычага и барабана длин волн. Далее, отражаясь от зеркала, свет снова через призму попадает на

сферическое зеркало и, отражаясь от выходного зеркала, фокусируется на выходную щель.

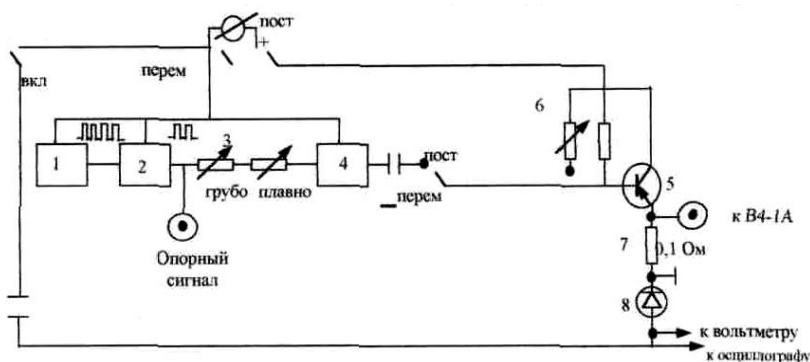


Рис. 7. Блок-схема генератора импульсов тока: 1 - задающий мультивибратор; 2 - формирующий каскад (триггер) - делитель частоты; 3 - делитель напряжения «грубо» и «плавно»; 4 - предварительный усилитель мощности; 5 - каскад выходных транзисторов; 6 - регулировка постоянного тока; 7 - калибровочное сопротивление 0,1 ом; 8 - диод; 9 - фишка для выхода измерения тока к В-4-1А; 10 - фишка для выхода опорного сигнала; 11 - переключатель «импульсный - постоянный ток».

На барабане длин волн имеется шкала, на которой указаны длины волн в нанометрах, соответствующие попаданию изображения входной щели на выходную для света с данной длиной волны. Вращая барабан и изменяя положение зеркала, мы проходим по интересующей нас части спектра. Обратная линейная дисперсия монохроматора со стеклянной призмой в настоящем приборе составляет приблизительно $44 \text{ \AA}/\text{мм}$ и слабо изменяется с длиной волны.

Фотоумножитель. Свет от выходной щели фокусируется линзой на чувствительный фотокатод фотоэлектронного умножителя ФЭУ-22. Для предотвращения влияния рассеянного света выходное отверстие монохроматора и фокусирующая линза закрыты блендой.

ФЭУ закреплен на оптической скамье и отъюстирован так, чтобы изображение выходной щели было сфокусировано на наиболее

чувствительную точку его катода. **Без преподавателя или инженера не сдвигать фокусировку ФЭУ!**

На катод ФЭУ и через сопротивления на его диоды подается высокое напряжение ≈ -1 кВ от высоковольтного выпрямителя (ВС-23). Тонкой регулировкой напряжения в пределах ± 100 в можно добиться оптимального отношения полезного усиливаемого сигнала к шуму. На выходе ФЭУ, в анодной цепи, стоит нагрузочное сопротивление 1 Мом, сигнал с которого подается на предварительный усилитель. Заметим, что заземлен «плюс» источника питания ФЭУ.

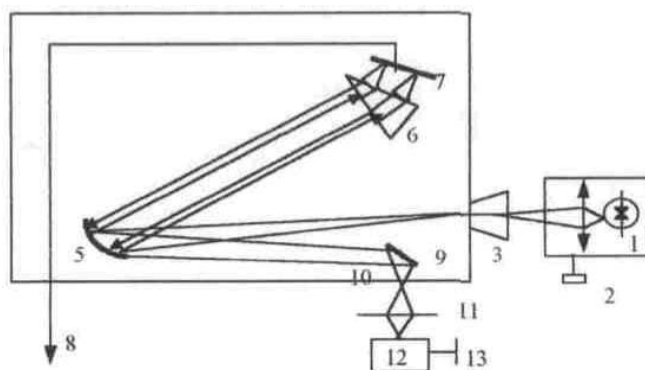


Рис. 8. Схема монохроматора ЗМР-3: 1 - камера со светодиодом и линзой; 2-юстировочный винт; 3 - входная бленда; 4 - входная щель; 5 - сферическое зеркало; 6 - призма; 7 - плоское зеркало; 8 - барабан вращения зеркала; 9 - выходное зеркало; 10 - выходная щель; 11 -фокусирующая линза; 12 - фотоумножитель; 13 - ручка крепления и юстировка ФЭУ

Предварительный и резонансный усилители с синхронным детектором (рис. 9). Предварительный малошумящий усилитель с высокоомным входом собран на транзисторах. Ручка плавной регулировки его коэффициента усиления выведена на переднюю панель блока.

В выходном каскаде усилителя имеется ступенчатый делитель напряжения, позволяющий изменять коэффициент усиления в отношении 100:30:10:3:1. Ручка переключения делителя выведена на переднюю панель усилителя.

После делителя сигнал поступает на резонансный усилитель с максимумом на частоте 800 гц и полосой пропускания, 3-5%, собранный на транзисторах. Последовательный и резонансный усилители питаются напряжением - 12 В от стабилизированного источника. Заземлен «плюс» источника питания.

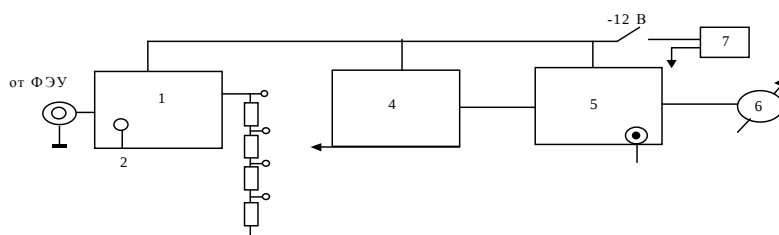


Рис. 9. Блок-схема предварительного и резонансного усилителей: 1 - предварительный усилитель; 2 - регулировка входного сопротивления и коэффициента усиления «плавно»; 3 - переключатель делителя напряжения на четыре положения; 4 - резонансный усилитель; 5. -синхронный детектор и усилитель постоянного тока; 6 - выходной прибор; 7 - источник питания (правая половина блока источника питания)

С выхода, резонансного усилителя сигнал поступает на синхронный детектор, на который также подается опорный сигнал с генератора 800 гц. После усилителя постоянного тока сигнал поступает на выходной прибор.

Сигнал фотоумножителя при малых потоках света точно пропорционален интенсивности излучения. Предварительный и резонансный усилители линейны вплоть до предела шкалы выходного прибора (~45 дел).

Поэтому отсчет на приборе пропорционален интенсивности светового сигнала, прошедшего через монохроматор от люминесцентного диода.

Чувствительность фотоумножителя, вообще говоря, зависит от длины волны излучения. Поэтому при обработке наблюдаемых спектров следует вводить поправки на спектральную чувствительность ФЭУ (см. рис. 10).

Измерение мощности, внешнего квантового выхода и КПД излучения. В настоящей работе для измерения абсолютной мощности излучения люминесцентных диодов используются градуированные кремниевые фотоэлементы, так называемые солнечные батареи.

Полупроводниковый фотоэлемент (ФЭ) по своему принципиальному устройству не отличается от диода.

Если на поверхность ФЭ, содержащую р-п-переход, падают кванты света с энергией $h\nu \geq \Delta\epsilon_i$, то возникающие электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем р-п-перехода. Появляется фото-э. д. с.

Если ФЭ, имеющий дифференциальное сопротивление r_{ϕ} , замкнуть на внешнее сопротивление $R \ll r_{\phi}$, то ток короткого замыкания $I_{кз}$ в цепи определяется только внутренними свойствами элемента. Отношение числа электронов $I_{кз}/q$, проходящих в единицу времени в короткозамкнутой цепи, к числу падающих на элемент фотонов называется квантовым выходом ФЭ.

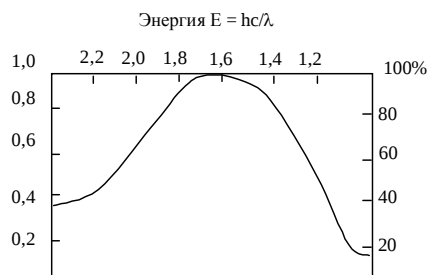


Рис. 10. Спектральная чувствительность ФЭУ-22 (типа S-I)

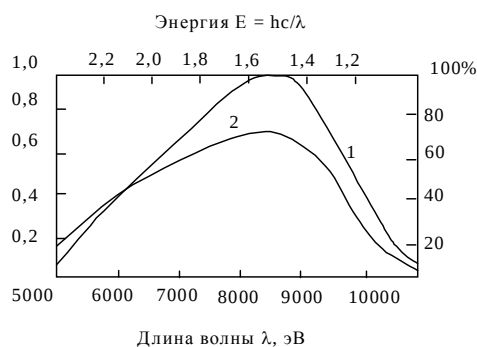


Рис. 11. Спектральная чувствительность кремниевых фотоэлементов. 1 кривая - электронов/фотон (левая шкала) и ампер/ватт (правая шкала). 2

кривая - приблизительные положения полос спектрального излучения люминесцентных диодов

Чувствительность ФЭ можно также характеризовать, отношением $I_{кз}$ к мощности падающего излучения (размерность [а/вт], или, чаще, [мкА/мкВт]).

Спектральная зависимость чувствительности и квантового выхода кремниевых фотоэлементов, применяемых в данной работе, показана на рис.11.

Для собирания излучения от диода фотоэлементы подключены параллельно и собраны в коробочку, в центр которой вставляется люминесцентный диод. При такой геометрии большая часть излучения, выходящего из диода, попадает на фотоэлементы и преобразуется в фототок. «Коэффициент собирания» излучения в конструкции, примененной в настоящей работе, $K = 0,5$.

Для измерения абсолютной мощности и внешнего квантового выхода излучения люминесцентных диодов необходимо знать спектральную чувствительность ФЭ и спектр излучения диода. Если $\Phi(h\nu)d(h\nu)$ - спектральная интенсивность излучения диода (фотонов/сек), а $F(h\nu)$ - спектральная зависимость квантового выхода ФЭ (электронов/фотон), то ток короткого замыкания элемента равен

$$I_{кз} = Kq \int \Phi(h\nu)F(h\nu)d(h\nu) \quad (21)$$

Так как необходимо учитывать коэффициент собирания K конкретного устройства и спектральные характеристики, то расчетные формулы для определения внешнего квантового выхода диода η имеют вид

$$\eta = \frac{1}{K} C_{\eta} \cdot \frac{I_{кз}}{I}, \quad (22)$$

где

$$C_{\eta} = \frac{\int \Phi(h\nu)d(h\nu)}{\int \Phi(h\nu)F(h\nu)d(h\nu)} \quad (23)$$

- коэффициент, зависящий от спектров излучения диода и фотоэлемента. Если полоса спектра излучения диода узка по сравнению с полосой спектральной чувствительности ФЭ (как это имеет место для светодиодов из арсенида галлия и фотоэлементов из кремния), то вместо интегрирования в формуле (22) можно приближенно написать

$$C_{\eta} = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{F(h\nu_M)} \quad (24)$$

У диодов из фосфида галлия спектр довольно широк и может состоять из зеленой и красной полос, вклад которых в излучение сильно зависит от легирования диода. При этом C_{η} может существенно изменяться от образца к образцу, так как в зеленой области спектральная чувствительность кремниевых фотоэлементов сильно падает. Величину C_{η} в таком случае надо определять для данного спектра диода (см. также рис. 11).

Для измерения тока короткого замыкания фотоэлементов в настоящей работе используется микроамперметр М-95, внутреннее сопротивление его на шкале 100 мкА равно 80 Ом.

Точность определения η , $P_{\text{изл}}$ и η_p (как следует из приведенных выше формул) лимитируется главным образом точностью определения коэффициента C_{η} . В условиях настоящей работы погрешность составляет - 10% для светодиодов из арсенида галлия и 20% для фосфида галлия.

Задание

Исследование спектральных характеристик светодиодов

Ознакомиться с описаниями приборов и их расположением в установке; проверить (не включая приборов) подводу сетевого напряжения к катодному вольтметру, осциллографу, высоковольтному выпрямителю и низковольтному источнику питания; подводу напряжения 12 В к генератору импульсов и резонансному усилителю; высокого напряжения к

фотоумножителю; кабелей от генератора импульсов к диоду, катодному вольтметру, осциллографу и от ФЭУ к резонансному усилителю; включение вольтметра и амперметра постоянного тока. Проверить заземление всех приборов.

Получить люминесцентные диоды для исследования, ознакомиться с их конструкцией, отметить полярность их включения, вставить диод из GaP в камеру перед входной щелью.

Убедиться в правильности начального положения элементов контроля и управления приборами.

Генератор импульсов: тумблер питания должен быть в положении «выключено», тумблер переключения постоянного и импульсного сигнала - в положении «импульсный», ручки регулировки постоянного и импульсного тока «грубо» и «плавно» выведены до отказа против часовой стрелки.

Катодный вольтметр В-4-1А: переключатель полярности импульсов - в положении «-п-», переключатель чувствительности шкал - в положении наибольшей чувствительности (10 мВ), ручка «установка нуля» - в среднем положении, тумблер включения сети - в положении «выключено».

Осциллограф С-1-13: ручки яркости, фокуса, смещения по осям Х и У, частоты, синхронизации, усиления плавно - в среднем положении; переключатель рода работ - в положении непрерывной развертки; переключатель рода синхронизации - в положении внутренней синхронизации; переключатель усиления - в положении 1:10; метки времени - на 100 мксек; диапазон длительностей - на 1,5 - 0,3 мсек.

Держатель и камера с диодом: оптическая ось камеры должна быть направлена на центр входной щели монохроматора, приблизительно перпендикулярно ее плоскости.

Монохроматор ЗМР-3: входная щель закрыта блендой; микрометры ширины щелей установлены в среднем положении, около 2 мм; выходная щель закрыта блендой, соединяющей выходное отверстие с фокусирующей линзой ФЭУ; фотоумножитель в камере укреплен напротив выходной щели.

Высоковольтный выпрямитель ВС-23: ключ сетевого питания и тумблер высокого напряжения - в положении «выключено»; переключатель диапазонов напряжения левого канала (ФЭУ) - во втором слева положении, ручка плавной регулировки выведена против часовой стрелки до отказа;

Переключатель высокого напряжения правого канала и ручка плавной регулировки выведены против часовой стрелки до отказа; крышка, закрывающая выводы высокого напряжения, плотно защелкнута.

Источник стабилизированного питания: тумблер сети - в положении «выключено»; тумблеры питания левого и правого каналов выключены; регуляторы напряжения - в крайнем левом положении; тумблеры приборов - в положении «V».

Предварительный и резонансный усилители: тумблер включения - в нижнем положении, ручка плавной регулировки усиления - в среднем положении. Остальные органы управления этим блоком относятся к системе синхронного детектирования: тумблер полярности - в положении «+», интегратор - в положении 2; регулировка нуля - в среднем положении.

Задание 1.

Исследование спектра излучения люминесцентного диода из фосфида галлия.

Подключить подводку от генератора импульсов к держателю образца. Включить катодный вольтметр В-4-1А и осциллограф С-1-13 в сеть. Установить нуль вольтметра; установить луч на экране осциллографа. Включите источник питания («сеть вкл»), установить 12 В по левому прибору; включить левый тумблер; включить тумблер питания на блоке генератора. Следить за положением стрелки катодного вольтметра, за сигналами на экране, осциллографа. Импульсный вольтметр В-4-1А имеет постоянную времени детектирующей цепи порядка секунды и регистрирует отбросом даже единичные импульсы. Поэтому для ускорения измерений

следует пользоваться кнопкой разряда конденсатора детектирующей системы вольтметра, чтобы убедиться в случайности отброса стрелки вольтметра.

Медленно (!) вращать ручку, регулировки импульсов тока через диод до тех пор, пока импульсное напряжение на вольтметре не будет около 3-5 мВ (что соответствует амплитуде импульсов 30-50 мА, поскольку напряжение снимается с калиброванного сопротивления 0,1 Ом). После этого ручкой плавной регулировки установить амплитуду тока через диод около 20-40 мА (2-4 мВ на В-4-1А).

Убедиться визуально, что диод светится, обратить внимание на цвет свечения, зеленый он или красный.

Настроить осциллограф так, чтобы можно было наблюдать форму импульсов напряжения на образце. (Воспользоваться импульсной разверткой, отрегулировать плавно усиление и амплитуду синхронизации.)

Юстировочным винтом камеры сфокусировать световое пятно от диода в центр входной щели монохроматора.

Включить сетевое напряжение выпрямителя ВС-23 и правой части блока питания усилителей. Установить напряжение на блоке $V=12$ В по шкале вольтметра, включить правый тумблер выхода напряжения на блоке.

Включить питание блока предварительного и резонансного усилителей. Установить нуль стрелочного прибора.

Включить высокое напряжение на ВС-23. Отрегулировать ручкой плавного изменения напряжения левого канала напряжение на ФЭУ-22 около 1 кВ. Наблюдая за уровнем шумов на выходном вольтметре, медленно увеличивать напряжение в пределах 1100-1200 В, заметить рост уровня шумов вследствие появления шумов ФЭУ.

Установить барабан монохроматора ЗМР-3 в положение, соответствующее предлагаемому максимуму спектра излучения диода - около 700 нм для красных и около 560 нм для зеленых диодов.

Убедиться, что изображение диода сфокусировано на щели. Заметить появление сигнала излучения образца на выходном вольтметре. Еще раз

проверить амплитуду тока диода и форму импульсов напряжения по В4-1А и осциллографу. Если сигнал излучения не наблюдается, вращать ручку барабана монохроматора в обе стороны от предполагаемого максимума, пока сигнал не обнаружится. Если сигнал мал, раскрыть до 4 мм щель на выходе и на входе так, чтобы сигнал существенно превышал уровень шумов.

Далее, медленно вращая ручку юстировки камеры образца, вывести сигнал на максимум. Если сигнал слишком велик, уменьшать ширину обеих щелей так, чтобы стрелка выходного вольтметра находилась в пределах шкалы (около 30 делений). Снова проверить соответствие положения барабана монохроматора максимуму в спектре излучения и вновь, уже при более узкой щели, юстировать на максимум выходного сигнала положение камеры образца. Отъюстировать на максимум выходного сигнала фокусировку изображения образца на щель, линзой камеры или положением рейтера.

Повторять операции юстировки на максимум по спектру и по положению камеры образца, последовательно уменьшая ширину щели до 0,15-0,30 мм (150-300 мкм). Отношение полезного сигнала к шуму при этом должно быть около 5-10. Вновь при оптимальных условиях проверить регулировку высокого напряжения на ФЭУ так, чтобы было максимальным отношение полезного сигнала к шуму. Полезный сигнал при этом можно исключать, отводя барабан монохроматора в крайние положения, далекие от полосы спектра излучения диода. Изменение напряжения на ФЭУ позволяет плавно менять амплитуду сигнала.

Когда установлены оптимальные условия, вновь вернуться к положению ручек регулировки усиления блока предварительного и резонансного усилителей, изменяя переключателем коэффициент его усиления.

Отрегулировать вновь амплитуду тока через образец, установив ее на определенное значение в пределах 20-40 ма. Воспользовавшись градуировкой осциллографа, определить при этом амплитуду импульсов

напряжения на диоде; заметить по вольтметру постоянного тока постоянную составляющую напряжения на диоде.

Вновь вернуться к регулировке ширины щели на входе и выходе монохроматора, установив их одинаковыми. Если интенсивность излучения диода велика, то можно уменьшить щели до 100 мкм

При известных и записанных значениях амплитуды импульсов тока и напряжения и постоянной составляющей напряжения на образце исследовать зависимость интенсивности излучения диода от длины волны. Для этого отвести барабан в положение, соответствующее коротким длинам волн (около 500 нм) и медленно вращать его до тех пор, пока на фоне шумов не станет заметен малый сигнал излучения. Для того чтобы на измерения не влияли люфты в механической системе передачи вращения барабана вращению зеркала монохроматора, необходимо при измерениях вращать барабан строго в одну сторону. Если надо промерить точку вторично, следует вернуться к коротким длинам волн и подходить к данному положению барабана только с коротковолновой стороны. При отсчете показаний $I^*(\lambda.)$ выходного прибора вычитать показания, соответствующие уровню шумов $I^*_{\text{ш.}}$

При медленном изменении сигнала с изменением длины волны точки следует ставить приблизительно через 10 нм или реже, при быстром - через одно или половину деления барабана. Всего на спектральной полосе должно быть 20-30 точек. Особенно важно точно определить положение максимума и точки с обеих сторон от него, соответствующие половине максимальной интенсивности. Обратить внимание на возможность проявления структуры вблизи максимума зеленой полосы.

Составить табл. 1 результатов измерений, предусмотрев в ней графы для их дальнейшей обработки.

Таблица 1

λ , нм	$I^*(\lambda)$	$I^*(\lambda) - I_0$	$h\nu$, эВ	$\frac{I^*(\lambda) - I_0}{S(\lambda)}$	$\frac{\Phi(h\nu)}{\Phi(h\nu_M)}$

Увеличить амплитуду тока через диод в 1,5 - 2 раза, изменив в соответствии с величиной сигнала в максимуме спектра положение переключателя усилителей или уменьшив щели. Определить и записать амплитуду напряжения по осциллографу и постоянную составляющую напряжения. Повторить исследование спектра излучения при новом значении тока и напряжения.

Если в спектре диода имеется и красная, и зеленая полоса излучения, необходимо провести измерения в оптимальных условиях для каждой полосы. Для этого барабан монохроматора выставляется на максимум менее интенсивной полосы при узкой щели. Затем щель расширяется так, чтобы сигнал вырос до максимума отклонения выходного прибора, и измерения проводятся так же, как и для более интенсивной полосы.

После выполнения упражнения вывести до минимума ручки грубой и плавной регулировки амплитуды тока через диод, выключить тумблер питания генератора.

Задание 2.

Исследование спектра излучения люминесцентного диода из арсенида галлия

Подготовка установки к работе и осмотр приборов, точно такие, как и для упр. 1. Если упр.2 выполняется непосредственно за первым, то при смене образцов из других приборов достаточно выключить только тумблер высокого напряжения ВС-23. Вынуть из камеры держатель образца с диодом

из фосфида галлия и заменить его держателем с диодом из арсенида галлия; обратить внимание на положение диода относительно центра держателя.

Если это упражнение выполняется независимо, осмотр и настройку установки проводить так же, как и для упр.1, кроме пункта, касающегося фокусировки светового пятна от диода в центр перекрестия входной щели монохроматора. Поскольку излучение арсенида галлия лежит в инфракрасной области спектра, эту фокусировку следует проводить только по показаниям выходного прибора.

Настройку установки проводить, так же, как и для упр.1. Однако барабан монохроматора следует установить в положение, соответствующее предполагаемому максимуму спектра излучения диода около 930 нм.

Операции юстировки образца в камере, подстройки барабана на максимум спектра, и уменьшения щели монохроматора проводить, как в упр.1. Следует обратить внимание на фокусировку изображения образца на щель; поскольку линза камеры - держателя может иметь для ИК - излучения другое фокусное расстояние, нужно найти оптимальное положение рейтера относительно щели.

Арсенид галлия - полупроводник с прямыми межзонными переходами, квантовый выход излучения в нем при комнатной температуре, как правило, на один-два порядка выше, чем в фосфиде галлия. Поэтому спектр излучения диодов из арсенида галлия оказывается возможным исследовать со значительно большим разрешением. В настоящей работе можно уменьшить щель монохроматора до 50 мкм.

Задание 3.

Наблюдение формы сигналов импульсов излучения на осциллографе.

Это упражнение можно выполнять либо после первого, либо после второго, не выключая установки, соответственно для диодов из фосфида или арсенида галлия. Здесь сравниваются формы импульсов тока через диод и

импульсов напряжения на ФЭУ. Сигнал от ФЭУ подается на осциллограф непосредственно, минуя блок предварительного и резонансного усилителей.

Для этого при включенных приборах следует настроить положение барабана монохроматора на максимум в спектре излучения, затем подключить кабель от выходной фишки ФЭУ к входу осциллографа.

Расширить щели монохроматора до 4 мм, увеличить усиление осциллографа и высокое напряжение питания ФЭУ так, чтобы на экране осциллографа можно было наблюдать импульсы сигналов излучения.

Убедиться и том, что формы импульсов тока и излучения совпадают. Небольшие искажения могут быть связаны с зарядом паразитных емкостей выходной цепи ФЭУ.

После проведения измерений вывести до минимума ручки грубой и плавной регулировки тока через диод. Выключить тумблер питания генератора тока, высокое напряжение и переключатель сети на ВС-23, блок усилителей, тумблеры правой и левой части и тумблер сети блока питания, осциллограф.

Задание 4.

Зависимость интенсивности излучения светодиода от тока и напряжения; измерение η .

Выполняется на светодиодах, спектры излучения которых известны из упр.1 и 2. Перед началом работы проверить подключение амперметра и вольтметра постоянного тока; подключение микроамперметра для измерения тока короткого замыкания коробочки из фотоэлементов. В начале все приборы должны быть выключены в соответствии с указаниями в конце упр.3.

Исследуемый светодиод должен быть вставлен в камеру с коробочкой из фотоэлементов так, чтобы он находился приблизительно в ее центре; кабель от блока генератора и переключателей подключить к светодиоду; тумблер рода работы на этом блоке перевести в положение «постоянный».

Ознакомиться с описанием микроамперметра М-95. Включить в сеть освещение его шкалы.

Проверить, что ручка регулировки левой половины источника питания и ручка регулировки постоянного тока на блоке генератора выведены влево до отказа. Включить сетевое питание источника, проверить по вольтметру левой половины блока, что напряжение равно нулю. Установить переключатели шкал амперметра в положение, соответствующее 10 ма, и вольтметра в положение, соответствующее 1,5 в для GaAs или 3 в для GaP. Включить тумблеры «вкл.» в нижней части левой половины блока питания и в правой части блока генератора и переключателей.

Медленно, следя за показаниями вольтметра источника питания и амперметра постоянного тока через диод, вводить напряжение на левой части блока питания до ~2в так, чтобы ток через диод достиг значения около 1 ма для светодиода из GaAs и 3-5 ма для светодиода из GaP; значения напряжений на светодиоде при этих условиях должны быть около 0,9 в для GaAs и 1,8 в для GaP.

Установить переключатель шкалы М-95 в положение «наружный шунт» и переключатель, шкалы наружного шунта в положение 100 мка для GaAs и 0,1 мка для GaP. Медленно вращая ручку левой части источника питания (не более 2,5 в) или ручку регулировки постоянного тока на блоке генератора, наблюдать по амперметру за изменением тока через светодиод и появлением тока через фотоэлементы (по микроамперметру).

Измерить одновременно зависимость тока короткого замыкания фотоэлементов 1кз, пропорционального интенсивности излучения, от тока через диод и от напряжения на диоде; следить за тем, чтобы шаг по напряжению был не более 10 мв. В области малых токов (до ~ 10 ма) обратить внимание на проявление степенной зависимости интенсивности от тока I ; перейти в область линейной зависимости, увеличивая ток до ~ 100 ма для GaAs и до 50 ма для GaP, переключая соответственно шкалы амперметра.

В случае малых интенсивностей изменять положение шкал М-95 или переключателя наружного шунта.

Необходимо обратить внимание на то, что переключение этих шкал может изменить внутреннее сопротивление прибора, так что не будет выполняться условие $R \ll r_{\text{ф}}$. Для измерений с GaAs это условие заведомо выполнено на шкале 100 мка, на других шкалах надо брать пропорциональную поправку, считая правильными показания на шкале 100 мка. Результаты измерений представить в виде табл. 2, предусмотрев в ней графы для их последующей обработки.

Таблица 2

V, в	I, ма	I _{кз} , кма	η	η_p	P, мвт

Проделать измерения сначала для светодиодов из GaAs, а затем из GaP.

Обработка экспериментальных данных и анализ результатов измерений

1. Перевести значения длин волн в значения энергий: $h\nu[\text{эв}] = hc/\lambda = 1239/\lambda$ [нм]. Ввести поправку на спектральную чувствительность ФЭУ, считая, что $\Phi(h\nu)$ пропорционально $I^*(h\nu)/S(h\nu)$, где $I^*(h\nu)$ - показание прибора, $S(h\nu)$ - спектральная чувствительность ФЭУ. Построить спектр в виде графика $\Phi(h\nu)/\Phi(h\nu_m)$, отложив по ординате значение интенсивности, нормированное к интенсивности в максимуме, а по оси абсцисс - $h\nu$ (на параллельной оси указать значение λ). Зная дисперсию прибора (44 Å/мм) и ширину щели (мм), указать на графике спектральную ширину щели. Отметить стрелкой положение максимума $h\nu_m$ (или нескольких максимумов). Определить и отметить на графике ширину полосы на половине

интенсивности $\Delta(h\nu)_{1/2}$. Указать точность определения $h\nu_m$ и $\Delta(h\nu)_{1/2}$. Сравнить спектры, снятые при разных токах.

Сравнить ширину полос с величиной kT ; имеет ли смысл на основе развитой во вводной части простой теории (формулы (6 - 8)) проводить анализ экспериментальных данных для фосфида галлия? Можно ли в спектре зеленой полосы заметить дополнительные максимумы, свидетельствующие о сложном характере экситонного механизма излучательной рекомбинации? Сравнить положение максимумов зеленой и красной полос со значением ширины запрещенной зоны GaP (2,26 эВ при комнатной температуре).

2. Провести обработку результатов измерений для GaAs так же, как и для упр.1. Если $\Delta(h\nu)_{1/2}$ близко к 1,8 кТ (формула (8)), то сравнить форму экспериментальной кривой с кривой, рассчитанной по формуле (6), совместив максимумы этих кривых: Как отличается экспериментально наблюдаемая форма кривой от рассчитанной по простой модели? Каковы возможные причины этих расхождений? Предполагая, что излучение определяется переходами из зоны проводимости на акцепторный уровень (примеси Si в GaAs), определить $\Delta\varepsilon_{ac}$ и $\Delta\varepsilon_{av}$ (формула (7)), считая $\Delta\varepsilon_i = 1,44$ эВ. Какова точность этой оценки?

3. Построить зависимость интенсивности излучения от тока в линейном и двойном логарифмическом масштабе. В какой области токов соблюдается пропорциональность и в какой действует более общий степенной закон (18)?

Построить зависимость логарифма интенсивности излучения от напряжения; в какой области выполняется экспоненциальная зависимость (17)? Определить в этой области показатель экспоненты, сравнить его с теоретической величиной.

Если в области больших токов наблюдается отклонение от экспоненты, ввести поправку на то, что измеряется полное падение напряжения V , а в формулу (17) входит напряжение на р-п-переходе $U = V - IR_s$. Для введения поправки (т. е. построения зависимости $\Phi(U)$) определить R_s из вольт-амперной характеристики.

Пользуясь формулами (19)-(24) и градуировочной кривой кремниевых фотоэлементов вычислить внешний квантовый выход η , коэффициент полезного действия η_p и мощность P излучения светодиода в зависимости от тока. Как отличаются полученные результаты для GaAs и GaP? Чем объяснить это различие?

Литература

1. Гаррисон Дж. и др. Практическая спектроскопия. Изд. Иностранной литературы, 1950, с. 179
2. Татевский В.М. Спектроскопия. Изд. Московского университета, 1951, с. 5
3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М. «Энергия». 1973
4. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М. «Сов. радио». 1969.