

ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Внутренним фотоэффектом называется изменение проводимости в полупроводниках и диэлектриках под действием светового излучения [1]. Фотопроводимость полупроводников – увеличение электропроводности

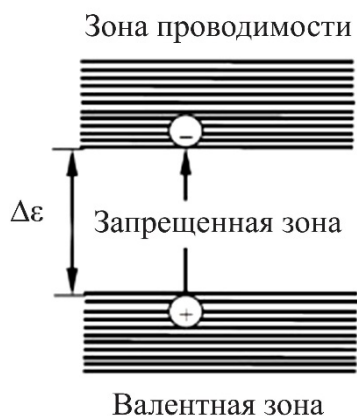


Рис. 7.1. Структура энергетических зон

полупроводников под действием электромагнитного (светового) излучения. В основе этого явления лежит переход электронов из связанных состояний в свободные при поглощении квантов излучения. Состояния электронов в атоме характеризуются только вполне определенными значениями энергии, которые называют энергетическими уровнями. В твердом теле отдельные уровни энергии электронов в атомах трансформируются в *энергетические зоны* (рис. 7.1), имеющие конечную энергетическую ширину.

Зону энергий, соответствующую наивысшему заполненному электронами уровню, называют *валентной зоной*, так как состояния с этими значениями энергии заполняются валентными электронами атомов. Ближайшую к валентной энергетическую зону, соответствующую не занятой электронами разрешенной совокупностью состояний, называют *зоной проводимости*.

Области разрешенных значений энергии отделены друг от друга областями запрещенных значений. Ширина запрещенной зоны в проводниках практически равна нулю, для создания тока в проводнике достаточно приложить электрическое поле. Чтобы обеспечить электропроводность полупроводника или диэлектрика, необходимо сообщить электронам некоторую энергию, которая определяется шириной запрещенной зоны. Так как ширина запрещенной зоны полупроводников невелика, то уже при небольшом нагревании полупроводника электроны приобретают энергию, достаточную для перехода в зону проводимости. Запрещенная зона изоляторов широка (несколько электрон-вольт), поэтому вызвать заметную электропроводность изоляторов нагреванием невозможно.

При переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости на энергетических уровнях валентной зоны образуются свободные места (дырки). Заполняясь электронами с нижележащих уровней, дырки перемещаются по направлению поля как положительные заряды.

Описанный механизм проводимости полупроводника, обусловленный как электронами, так и дырками, определяет собственную проводимость. Если в кристаллической решетке твердого тела имеются атомы примеси, то электроны этих атомов обычно размещаются не на энергетических уровнях основной решетки, а на отдельных энергетических уровнях. В зависимости от расположения примесного уровня в запрещенной зоне соответствующий атом примеси может создать электронную или дырочную примесную проводимость тела. Так, занятый электронами примесный уровень вблизи дна зоны проводимости создает электронную проводимость, а свободный уровень вблизи верха валентной зоны – дырочную проводимость.

Это краткое описание механизма проводимости полупроводников показывает, что проводящее состояние полупроводника является возбужденным. Поэтому всякое воздействие, сообщаящее энергию электронам полупроводника, влияет на его электропроводность. Наряду с тепловым механизмом возбуждения проводимости большое значение имеет механизм возбуждения проводимости фотонами.

Если энергия фотона, поглощаемого веществом, равна или больше энергии, необходимой для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости (больше или равна ширине запрещенной зоны), то в твердом теле под действием светового излучения появляются добавочные носители тока. Они обуславливают фотопроводимость и создают фототок.

Лабораторная работа 7.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [2].

Цель работы: изучение зависимости фототока, возникающего в фотосопротивлении из сернистого свинца при освещении (при внутреннем фотоэффекте), от приложенного напряжения (снятие вольт-амперных характеристик) и освещенности (снятие световых характеристик).

Приборы и принадлежности: в состав электрической схемы экспериментальной установки по исследованию внутреннего фотоэффекта (рис. 7.2) входят источник питания, фотосопротивление (ФС), микроамперметр (А), вольтметр (РВ), реостат (R), эталонная лампа накаливания (S_3).

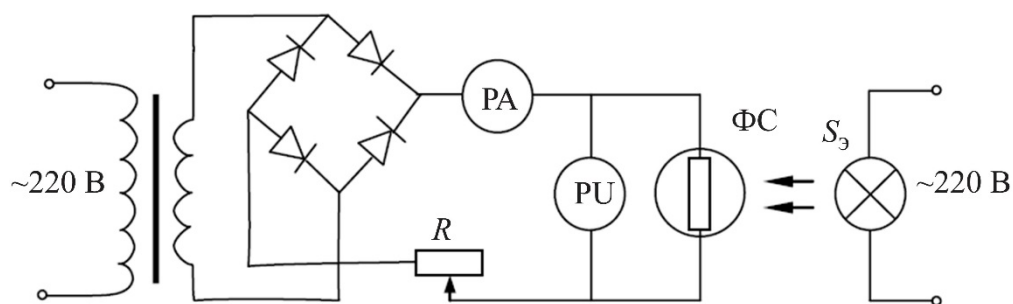


Рис. 7.2. Электрическая схема для исследования внутреннего фотоэффекта

Вид экспериментальной установки приведен на рис. 7.3.



Рис. 7.3. Экспериментальная установка по исследованию внутреннего фотоэффекта

Эталонная лампа накаливания смонтирована в кожухе с отверстием (слева на рис. 7.3). Фотосопротивление закреплено на рейтере, который может перемещаться вдоль оптической скамьи (в центре на рис. 7.3). Микроамперметр, вольтметр и ручка регулировки реостата установлены на верхней панели установки.

Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

Объектом исследования в данной лабораторной работе является *фотосопротивление* (рис. 7.4) – тонкий слой 1 полупроводникового материала, нанесенный на изолирующую пластинку 2. На краях слоя расположены электроды 3. Вся конструкция смонтирована в пластмассовом корпусе 4.

При отсутствии освещения в цепи (рис. 7.2) через фотосопротивление протекает измеряемый микроамперметром темновой ток (I_T), зависящий от приложенного напряжения и темнового сопротивления. При освещении поверхности фотосопротивления ток (I) в цепи будет больше темнового тока. Разность между этими токами

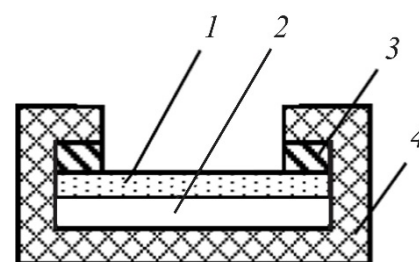


Рис. 7.4. Устройство фотосопротивления

составляет фототок $I_{\phi} = I - I_T$.

Характеристиками фотосопротивления являются интегральная чувствительность, зависимость чувствительности от длины волны падающего излучения (спектральная характеристика) и от освещенности (световая характеристика), рабочее напряжение, темновое сопротивление.

Интегральная чувствительность в общем случае вычисляется как отношение фототока (I_{ϕ}) к падающему световому потоку (Φ_E):

$$S = I_{\phi} / \Phi_E.$$

Если фотосопротивление используется для регистрации видимой части спектра, чувствительность выражают в амперах (чаще микроамперах) на люмен. Поскольку чувствительность фотосопротивления зависит от спектрального состава падающего излучения, при определении чувствительности необходимо указывать, каким источником создавалось излучение. Для определения чувствительности фотосопротивления в видимой части спектра источником излучения обычно служит лампа накаливания с вольфрамовой нитью при температуре 2840 К.

Фототок зависит не только от светового потока, но и от приложенного напряжения (U), поэтому часто используют понятие удельной чувствительности:

$$S_U = I_{\phi} / (\Phi_E U) = I_{\phi} / (ESU), \quad (7.1)$$

где $\Phi_E = ES$ – световой поток, падающий на фотосопротивление; S – площадь его поверхности; E – ее освещенность. Если известна сила света источника излучения (J), то освещенность можно найти по формуле $E = J/r^2$, где r – расстояние между источником света и фотосопротивлением.

Темновое сопротивление зависит от приложенного напряжения и определяется как $r_T = U / I_T$.

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о внутреннем фотоэффекте, ознакомиться с устройством и работой измерительной установки, с методикой эксперимента.
2. В первой части отчета отразить основные закономерности внутреннего фотоэффекта и параметры, которые будут найдены в процессе измерений.
3. Подготовить протокол с таблицами, в которые будут заноситься результаты измерений.

Указания по выполнению эксперимента

1. Включить установку, прикрыть шторкой фотосопротивление и снять вольт-амперную характеристику темнового тока (I_T), изменяя напряжение (U) на фотосопротивлении от 0 до 15 В с шагом 3 В. Результаты измерений занести в табл. 7.1.

2. Установить фотосопротивление на расстоянии $r = 20$ см от лампы, поднять шторку и снять вольт-амперную характеристику тока (I), протекающего через фотосопротивление при освещении, в зависимости от приложенного напряжения (U), изменяя его от 0 до 15 В с шагом 3 В. Результаты измерений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Вольт-амперные характеристики фотосопротивления ($J = 25$ кд)

r , см	I , мкА	Напряжение (U), В					
		0	3				15
20	Темновой ток (I_T)						
	Ток при освещении (I)						
	Фототок (I_ϕ)						
10	Темновой ток (I_T)						
	Ток при освещении (I)						
	Фототок (I_ϕ)						

3. Снять вольт-амперную характеристику для фотосопротивления (аналогично п. 2) для расстояния $r = 10$ см между фотосопротивлением и лампой.

Таблица 7.2

Световые характеристики фотосопротивления ($J = 25$ кд)

Напряжение (U), В	I , мкА	Расстояние (r), см						40
		10	15	20	25	30	35	
10	Темновой ток (I_T)							
	Ток при освещении (I)							
	Фототок (I_ϕ)							
	Освещенность (E), лк							
15	Темновой ток (I_T)							
	Ток при освещении (I)							
	Фототок (I_ϕ)							
	Освещенность (E), лк							

4. Снять световые характеристики фоторезистора при напряжении 10 и 15 В. Для этого, поддерживая напряжение (U) постоянным, изменять расстояние (r) между фотосопротивлением и источником света от 10 до 40 см через 5 см и измерять ток (I). Результаты измерений занести в табл. 7.2.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Вычислить значения фототока $I_{\text{ф}} = I - I_{\text{Т}}$ для всех столбцов табл. 7.1 и 7.2. Занести их в соответствующие строки.
2. Рассчитать значения освещенностей E_1 и E_2 для расстояний $r_1 = 20$ см и $r_2 = 10$ см по формуле $E = J/r^2$, где J – сила света, значение которой указано на установке.
3. Построить по данным табл. 7.1 графики зависимостей темнового тока ($I_{\text{Т}}$) и фототока ($I_{\text{ф}}$) от напряжения (U) на фотосопротивлении для двух значений освещенности E_1 и E_2 .
4. Вычислить темновое сопротивление, которое находится как $r_{\text{Т}} = U / I_{\text{Т}}$, для двух значений приложенного напряжения $U_1 = 10$ В и $U_2 = 15$ В.
5. Рассчитать и занести в соответствующие строки табл. 7.2 значения освещенностей E_1 и E_2 для разных расстояний r по формуле $E = J/r^2$, где J – сила света, значение которой указано на установке.
6. Построить по данным табл. 7.2 графики зависимостей фототока ($I_{\text{ф}}$) от освещенности (E) для двух значений приложенного напряжения $U_1 = 10$ В и $U_2 = 15$ В.
7. Используя данные табл. 7.2, вычислить удельную чувствительность фотосопротивления по (7.1) при рабочем напряжении $U = 15$ В и освещенности $E = 100$ лк. Площадь поверхности полупроводникового слоя $S = 96$ мм² (указана на панели установки).
8. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое валентная зона, зона проводимости, запрещенная зона?
2. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта?
3. Объясните механизм фотопроводимости собственных и примесных полупроводников.
4. Что такое фототок и темновое сопротивление фоторезистора?
5. Какова зависимость фототока от освещенности?
6. Есть ли красная граница для внутреннего фотоэффекта?
7. Что такое квантовый выход?
8. Что такое темновой ток? Чем он определяется?
9. Нарисуйте качественно вольт-амперную характеристику фотосопротивления. Объясните ее вид.

10. Как формула Эйнштейна для фотоэффекта применима к внутреннему фотоэффекту?

Лабораторная работа 7.2

ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРА

Методическое описание данной лабораторной работы разработано на кафедре общей физики Новосибирского ГТУ [3]. Макет изготовлен в ООО «Опытные приборы» (г. Новосибирск).

Цели работы: исследовать характеристики фоторезистора при внутреннем фотоэффекте; найти ширину запрещенной зоны полупроводника.

Приборы и принадлежности: модульный учебный комплекс МУК-ОК, в состав которого входят стенд с объектами исследования СЗ-ОК01, амперметр-вольтметр АВ-1, источник питания ИПС1, соединительные проводники. Явление внешнего фотоэффекта изучается с помощью вакуумного фотоэлемента, входящего в состав стенда СЗ-ОК01.

В качестве источников света в лабораторной установке используется набор светодиодов (кластер), излучающих в различных узких диапазонах длин волн. Эти диапазоны лежат в видимой и инфракрасной частях спектра.

На рис. 7.5 представлена электрическая схема экспериментальной установки.

В качестве источника ЭДС используется генератор регулируемого постоянного напряжения блока ИПС1, работающий в диапазоне $0 \dots 6,3$ В. Такое включение в схеме измерительных приборов позволяет исключить шунтирование вольтметром фоторезистора. При этом в рабочем диапазоне токов влияние внутреннего сопротивления амперметра на показания вольтметра незначительное.

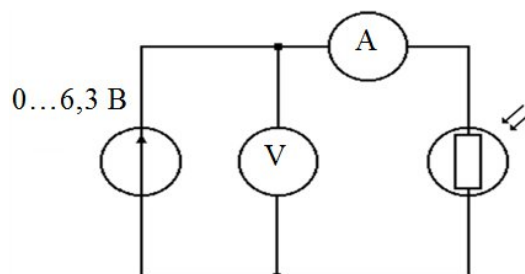


Рис. 7.5. Электрическая схема экспериментальной установки



Рис. 7.6. Модульный учебный комплекс МУК-ОК

При выполнении работы необходимо учитывать, что в лабораторной установке устанавливается не абсолютная, а относительная интенсивность излучения $\Phi = J/J_0$, где J_0 – некоторая константа, задаваемая измерительным прибором и регулируемая пользователем с помощью регулятора.

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 7.6.

Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

Принцип действия фоторезистора (фотосопротивления) основан на изменении фотопроводимости полупроводника под действием света (явление внутреннего фотоэффекта). В основе внутреннего фотоэффекта лежит переход электронов из связанных состояний в свободные при поглощении квантов светового излучения. В результате этого в полупроводниках образуются электронно-дырочные пары: освобожденный от валентной связи электрон, способный перемещаться по кристаллу, и дырка. Электрон и дырка представляют собой два типа свободных носителей зарядов, обуславливающих электронно-дырочную проводимость. С точки зрения зонной теории полупроводников разрыв валентной связи и образование свободных электрона и дырки означает переход электрона из валентной зоны в зону проводимости.

Генерация свободных носителей зарядов под действием света приводит к возникновению фотопроводимости. Кроме того, при температуре $T > 0$ К также возможен разрыв валентных связей и образование электронно-дырочных пар за счет энергии тепловых колебаний решетки полупроводника, что обуславливает наличие темновой проводимости полупроводника.

Удельную фотопроводимость полупроводника определяют как разность между удельной проводимостью при освещении и в темноте:

$$\Delta\sigma_{\Phi} = \sigma_{\text{св}} - \sigma_{\text{Т}} = e (\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p),$$

где e – заряд электрона; μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно; Δn и Δp – соответственно, концентрации избыточных электронов и дырок, появившихся в результате освещения полупроводника.

Помимо процессов генерации электронов и дырок нужно учитывать и обратный процесс – рекомбинацию (их исчезновение). В результате рассмотрения изменения концентрации электронов и дырок за счет процессов генерации и рекомбинации удельная фотопроводимость может быть представлена как

$$\Delta\sigma_{\Phi} = Ge(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p),$$

где G – скорость генерации электронно-дырочных пар в единичном объеме; τ_n и τ_p – соответственно, среднее время жизни электронов и дырок от генерации до рекомбинации.

В данной лабораторной работе исследуются такие основные характеристики фоторезистора, как вольт-амперная, световая и спектральная.

Вольт-амперной характеристикой фоторезистора называется зависимость фототока (I_{Φ}), протекающего через фоторезистор, от приложенного напряжения (U) при постоянном световом потоке (Φ): $I_{\Phi} = f(U)_{\Phi=\text{const}, \lambda=\text{const}}$. Амперметр в схеме установки регистрирует полный световой ток (I), включающий в себя темновой ток ($I_{\text{Т}}$) и фототок (I_{Φ}):

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\sigma S}{l} U = \frac{(\sigma_{\text{Т}} + \sigma_{\Phi}) S}{l} U = I_{\text{Т}} + I_{\Phi}, \quad (7.2)$$

где $R = l/\sigma S$ – сопротивление фоторезистора; S и l – площадь поперечного сечения и длина фоторезистора; σ – его удельная фотопроводимость при освещении; $I_{\text{Т}}$ – темновой ток; I_{Φ} – фототок. Из (7.2) видно, что вольт-амперная характеристика, как темновая, так и при освещении, является линейной, поскольку при постоянной температуре (T) и постоянном световом потоке (Φ) электропроводности σ_{Φ} и $\sigma_{\text{Т}}$ не зависят от напряжения (U). Следует отметить, что в области обычно реализуемых освещенностей световой ток намного больше темнового, т. е. $I \gg I_{\text{Т}}$.

Световой характеристикой фоторезистора называется зависимость фототока (I_{Φ}) от падающего светового потока (Φ) при постоянном значении приложенного к нему напряжения $I_{\Phi} = f(\Phi)_{U=\text{const}}$. Световая характеристика фоторезистора обычно нелинейная (рис. 7.7). При больших

освещенностях увеличение фототока отстает от роста светового потока, намечается тенденция к насыщению. Это объясняется тем, что при увеличении светового потока наряду с ростом концентрации генерируемых носителей заряда растет вероятность их рекомбинации, однако при небольших и средних освещенностях характеристика практически совпадает с прямой линией.

Спектральной характеристикой фоторезистора называется зависимость фототока насыщения ($I_{\phi, \text{н}}$) от длины волны λ при постоянном световом потоке $I_{\phi, \text{н}} = f(\lambda)_{\Phi=\text{const}, U=\text{const}}$. Характерный вид спектральной кривой приведен на рис. 7.8.

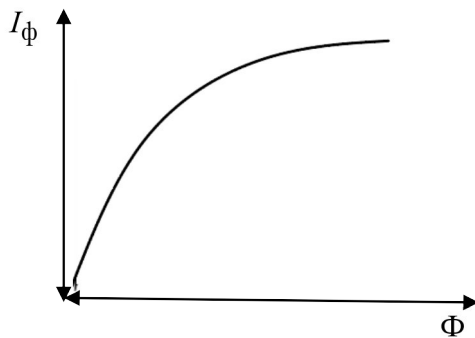


Рис. 7.7. Световая характеристика фоторезистора

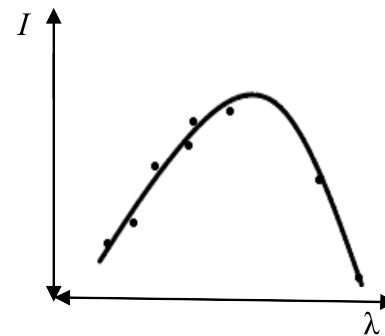


Рис. 7.8. Спектральная характеристика фоторезистора

Казалось бы, что спектральная характеристика фоторезистора должна иметь вид «прямоугольной ступени», т. е. для всех $\lambda < \lambda_{\text{гр}}$ $I_{\phi} = \text{const}$ и для $\lambda > \lambda_{\text{гр}}$ $I_{\phi} = 0$. Однако такой вид она могла бы иметь лишь при абсолютном нуле. При повышении температуры тепловое движение «размывает» край собственного поглощения функции (при $\lambda \sim \lambda_{\text{гр}}$) и характеристика принимает вид кривой с выраженным максимумом. С увеличением энергии фотона в реальной спектральной характеристике фототок быстро достигает максимума, а затем начинает уменьшаться, хотя энергии фотона более чем достаточно для возникновения фотопроводимости. Это объясняется тем, что с уменьшением λ растет коэффициент оптического поглощения, что приводит к поглощению света в тонком приповерхностном слое вещества и, следовательно, к повышению концентрации неравновесных носителей заряда. Эти носители заряда активно рекомбинируют на поверхности, не успевая диффундировать в объем полупроводника, что приводит к уменьшению фотопроводимости.

Определив край собственного поглощения спектральной кривой (красную границу фотоэффекта) $\lambda \approx \lambda_{\text{гр}}$, можно оценить ширину запрещенной зоны полупроводника:

$$\Delta\varepsilon = hc/\lambda_{\text{гр}}. \quad (7.3)$$

Таблица 7.3

Ширина запрещенной зоны полупроводников

Полупроводник	Ge	Si	JnSb	GaAs	GaP	CdS	CdSe	PbS
$\Delta\varepsilon$, эВ	0,72	1,12	0,17	1,42	2,26	2,42	1,70	0,41

Зная ширину запрещенной зоны, можно определить материал полупроводника, из которого выполнен фоторезистор (табл. 7.3).

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о внутреннем фотоэффекте, ознакомиться с устройством и работой измерительной установки, с методикой эксперимента.

Таблица 7.4

Вольт-амперные характеристики фоторезистора $I_{\Phi} = f(U)_{\Phi=\text{const}, \lambda=\text{const}}, J/J_0 = \dots, I_T =$

U , В		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
I_T , мкА													
$\lambda_1 =$	I , мкА												
	$I_{\Phi} = I - I_T$, мкА												
$\lambda_2 =$	I , мкА												
	$I_{\Phi} = I - I_T$, мкА												
$\lambda_3 =$	I , мкА												
	$I_{\Phi} = I - I_T$, мкА												

Таблица 7.5

Световые характеристики фоторезистора $I_{\Phi} = f(\Phi)_{U=\text{const}}, U = , I_T =$

J/J_0		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$\lambda_1 =$	I , мкА													
	$I_{\Phi} = I - I_T$, мкА													
$\lambda_2 =$	I , мкА													
	$I_{\Phi} = I - I_T$, мкА													

Таблица 7.6

Спектральная характеристика фоторезистора

$I_{\Phi} = f(\lambda)_{\Phi=\text{const}, U=\text{const}}, J/J_0 = \dots, U = , I_T =$

λ , нм	430	470	520	565	590	660	700	860
I , мкА								
$I_{\Phi} = I - I_T$, мкА								

2. В первой части отчета отразить основные закономерности внутреннего фотоэффекта и параметры, которые будут найдены в процессе измерений.

3. Подготовить протокол с таблицами, в которые будут заноситься результаты измерений по форме табл. 7.4–7.6.

Указания по выполнению эксперимента

1. С помощью коммутации проводников собрать электрическую схему (см. рис. 7.5)

2. Включить приборы. На блоке управления ИПС1 регулятором интенсивности излучения установить значение J/J_0 в диапазоне 1.0...1.2; выбрать режим измерения вольтметра – 6.3 В, режим измерения амперметра – 200 мкА.

3. Снять темновую характеристику фоторезистора $I_T = f(U)_{\Phi=\text{const}}$ при $\Phi = J/J_0 = 0.1$ с шагом изменения напряжения $\Delta U = 0.5$ В. Значения занести в табл. 7.4.

4. Снять семейство вольт-амперных характеристик (зависимость фототока $I_{\Phi} = I - I_T$ от напряжения U) для трех значений длины волны λ при фиксированном значении $\Phi = J/J_0$ с шагом изменения напряжения $\Delta U = 0.5$ В. Значения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и $\Phi = J/J_0$ задаются преподавателем. Результаты измерений занести в табл. 7.4. Рассчитать для каждого значения напряжения (U) истинное значение фототока, которое равно разности светового (I) и темнового (I_T) токов: $I_{\Phi} = I - I_T$.

5. Снять семейство световых характеристик (зависимость фототока от светового потока $\Phi = J/J_0$). Измерения выполнить при фиксированном значении напряжения (U) для двух длин волн с шагом по $J/J_0 = 0,1$. Фиксированные значения U, λ_1 и λ_2 задаются преподавателем. Результаты измерений, выбранные значения напряжения и темнового тока занести в табл. 7.5.

6. Снять спектральную характеристику фотоэлемента (зависимость фототока от длины волны), используя все 8 длин волн, значения которых написаны на крышке стенда СЗ-ОК1 и в табл. 7.6. Измерения выполнять при фиксированных значениях напряжения (U) и светового потока $\Phi = J/J_0$, задаваемых преподавателем. Результаты измерений, выбранные значения напряжения (U) и светового потока $\Phi = J/J_0$ занести в табл. 7.6.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Используя результаты измерений из табл. 7.4 построить на миллиметровой бумаге графики зависимостей фототока (I_{Φ}) от напряжения

(U): $I_{\Phi} = f(U)_{\Phi=\text{const}, \lambda=\text{const}}$ для трех значений длин волн (λ) (вольт-амперные характеристики фоторезистора).

2. Построить на миллиметровой бумаге световые кривые $I_{\Phi} = f(\Phi)_{U=\text{const}, \lambda=\text{const}}$ по результатам измерений из табл. 7.5.

3. По результатам измерений из табл. 7.6 построить на миллиметровой бумаге спектральную характеристику фоторезистора $I_{\Phi} = f(\lambda)_{\Phi=\text{const}}$. Определить по спектральной характеристике край собственного поглощения $\lambda_{\text{кр}}$. По (7.3) оценить ширину $\Delta E = hc/\lambda_{\text{кр}}$ запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен фоторезистор. Пользуясь табл. 7.3, определить материал полупроводника.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается внешний фотоэффект от внутреннего?
2. Что такое длинноволновая граница фотопроводимости и как ее определить?
3. Почему при освещении полупроводника его сопротивление уменьшается?
4. Что такое вольт-амперная и световая характеристики фотосопротивлений?
5. Как образуются в твердом теле зоны проводимости, валентная и запрещенная зоны?
6. Как зависит от температуры сопротивление (проводимость) полупроводников?
7. Как квантовая теория света объясняет явление внутреннего фотоэффекта?
8. Какие эксперименты демонстрируют явление внутреннего фотоэффекта?
9. Какие материалы лучше всего подходят для демонстрации внутреннего фотоэффекта и почему?
10. Чем определяется красная граница для внутреннего фотоэффекта?
11. Как формула Эйнштейна для фотоэффекта применима к внутреннему фотоэффекту?

Список литературы

1. Лабораторный практикум по физике: учеб. пособие для студентов вузов / Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков, И. А. Войцеховская и др.; под ред. К. А. Барсукова и Ю. И. Уханова. – М.: Высш. шк., 1988. – 351 с.

2. Физика атома и атомного ядра. Руководство для выполнения лабораторных работ по физике / под ред. А. Г. Граммакова; ЛЭТИ. – Л., 1965. – 174 с.

3. Квантовая физика. Методические рекомендации к лабораторным работам № 36, 38, 46 а, 47, 49 / сост.: А. М. Погорельский, А. В. Морозов, В. В. Христофоров, А. А. Шевченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 48 с.