

## ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Внешний фотоэффект – явление испускания электронов (фотоэлектронов) веществом под действием падающего светового излучения. Фотоэффект устанавливает связь между электрическими и оптическими явлениями. Различают внешний, внутренний фотоэффекты и фотоэффект в запирающем слое. Внешний фотоэффект был открыт в 1887 г. Генрихом Герцем, который обнаружил, что проскакивание искры между электродами разрядника сильно облегчается при облучении электродов ультрафиолетовым излучением. При внешнем фотоэффекте электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду.

Основные законы внешнего фотоэффекта [1]–[3]:

1. Максимальный фототок (фототок насыщения) при фиксированной частоте света пропорционален световому потоку, падающему на катод (закон Столетова).

2. Максимальная скорость фотоэлектронов зависит только от частоты падающего света и не зависит от светового потока. При этом скорость электронов (а следовательно, и их кинетическая энергия) увеличивается с возрастанием частоты света.

3. Для каждого вещества существует минимальная частота (так называемая красная граница фотоэффекта), ниже которой фотоэффект невозможен. Иногда красной границей называют максимальную длину волны (обратно пропорциональную частоте), выше которой фотоэффект невозможен.

Для объяснения явления внешнего фотоэффекта Эйнштейн предположил, что свет не только излучается (как в теории Планка), но и распространяется и поглощается веществом в виде квантов энергии, называемых фотонами. Энергия фотона вычисляется по формуле

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (6.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\nu$  и  $\lambda$  – частота и длина волны фотона соответственно.

При внешнем фотоэффекте энергия фотонов передается электронам проводимости в металле, которые рассматриваются как электронный газ. Часть этой энергии тратится на вырывание электрона (эта часть энергии называется работой выхода –  $A_{\text{ВЫХ}}$ ), а остаток реализуется в форме

кинетической энергии вылетевшего электрона. Этот процесс описывается уравнением

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + W_{\text{к max}}, \quad (6.2)$$

где  $W_{\text{к max}}$  – максимальная кинетическая энергия вылетевших фотоэлектронов. Уравнение (6.2) называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

Наличие работы выхода говорит о существовании определенной границы для фотоэффекта. Действительно, если энергия фотона будет меньше, чем работа выхода, то электрон не сможет вылететь из металла. Таким образом, существует граничная частота, выше которой будет возможен внешний фотоэффект. Эта частота называется *красной границей* внешнего фотоэффекта:

$$\nu_{\text{гр}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}. \quad (6.3)$$

Красная граница фотоэффекта зависит от материала фотокатода и состояния его поверхности, для щелочных металлов она соответствует энергии  $\varepsilon_0 \approx 3...5$  эВ, а для остальных металлов она значительно больше ( $\varepsilon_0 \approx 10...15$  эВ).

Наблюдение внешнего фотоэффекта реализуется с помощью фотоэлементов, принцип действия которых основан на явлении *фотоэлектронной эмиссии с катода*. Фотоэлемент монтируется в стеклянной колбе, внутри которой создается вакуум. Чистые металлы практически не используются в качестве фотоэмиттеров в электровакуумных приборах, поскольку они не фоточувствительны в видимой области спектра и, кроме того, имеют, как показывает опыт, малый квантовый выход.

Эффективные фотоэмиттеры в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра создаются на основе полупроводниковых материалов. При этом следует отметить, что, переходя от металлов к полупроводникам, нужно применять в уравнении Эйнштейна (6.2) вместо  $A_{\text{ВЫХ}}$  величину  $W$  – *порог фотоэффекта*. Это связано с более сложным, чем у металлов, характером энергетических состояний электронов, способных покинуть полупроводник при фотоэффекте. Существенное влияние на фотоэмиссию оказывает примесь, добавленная в полупроводник, и состояние его поверхности. При использовании полупроводниковых фотоэмиттеров порог фотоэффекта  $W = 1...2$  эВ.

## Лабораторная работа 6.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [4].

**Цели работы:** изучение закономерностей внешнего фотоэффекта; исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) вакуумного фотоэлемента; определение красной границы фотоэффекта, работы выхода электрона и постоянной Планка.

**Приборы и принадлежности:** вакуумный фотоэлемент, селективные фотофильтры, лампа накаливания, измерительная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.1.

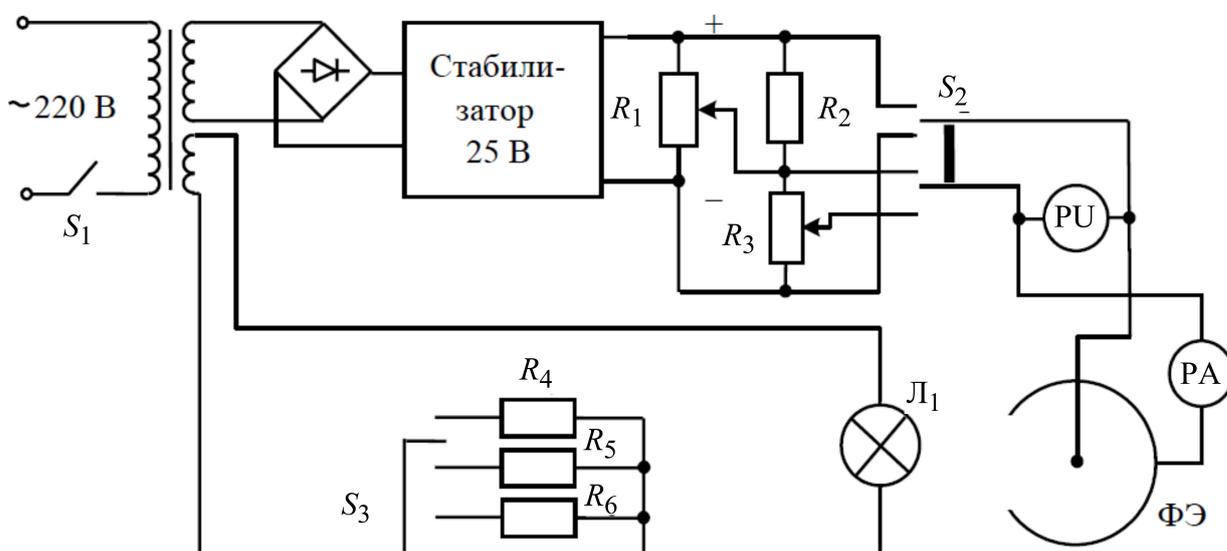


Рис. 6.1. Измерительная установка для исследования внешнего фотоэффекта

Переключателем  $S_1$  включается питание установки. Свет известной длины волны, пройдя через селективный светофильтр и прозрачное окно вакуумного диода, падает на катод фотоэлемента, где вызывает испускание фотоэлектронов. Выбитые электроны попадают на анод, создавая электрический ток (фототок) в замкнутой цепи. Переключателем  $S_2$  задается прямое или обратное напряжение на фотоэлементе (ФЭ). Переключателем  $S_3$  устанавливаются различные режимы осветителя (лампы накаливания  $L_1$ ). Потенциометры  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  служат для изменения напряжения на ФЭ. Фототок измеряется микроамперметром (РА),



Рис. 6.2. Экспериментальная установка по исследованию внешнего фотоэффекта

напряжение на фотоэлементе контролируется вольтметром (РУ).

Вид экспериментальной установки по исследованию внешнего фотоэффекта приведен на рис. 6.2.

### Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

Краткое теоретическое описание основных закономерностей внешнего фотоэффекта приведено в общих сведениях данного раздела. В этой лабораторной работе исследуются вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента при внешнем фотоэффекте.

Зависимость фототока от напряжения на фотоэлементе нелинейная. Фототок увеличивается при увеличении напряжения лишь до определенного предельного значения  $I_H$  (фототок насыщения). По закону Столетова при неизменном спектральном составе светового излучения, падающего на фотокатод, фототок насыщения пропорционален *освещенности* ( $E$ ) катода.

При подаче на анод фотоэлемента отрицательного напряжения фототок постепенно убывает, обращаясь в ноль при некотором напряжении, называемом *запирающим* ( $U_3$ ). Существование фототока при отрицательной разности потенциалов между анодом и катодом означает, что электроны вылетают из катода с некоторой скоростью, т. е. обладают кинетической энергией. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов ( $v_{\max}$ ) может быть выражена через задерживающую разность потенциалов ( $U_3$ ) из соотношения

$$W_{k \max} = mv_{\max}^2/2 = eU_3, \quad (6.4)$$

где  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона соответственно.

Уравнение Эйнштейна (6.2) для внешнего фотоэффекта с учетом соотношения (6.4) принимает вид

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + eU_3.$$

Зависимость задерживающей разности потенциалов от частоты света ( $\nu$ ) имеет вид

$$U_3 = (h/e)\nu - \varphi_{\text{ВЫХ}}, \quad (6.5)$$

где  $\varphi_{\text{ВЫХ}} = A_{\text{ВЫХ}}/e$  – потенциал выхода.

Уравнение (6.5) есть уравнение прямой линии (рис. 6.3).

Экстраполяция этой прямой до пересечения с осью ординат определяет потенциал выхода электронов ( $\varphi_{\text{ВЫХ}}$ ) из

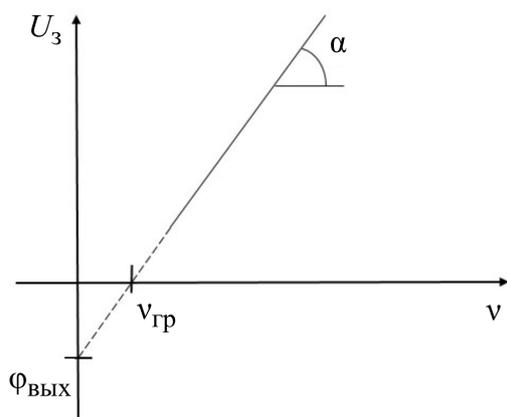


Рис. 6.3. График зависимости  $U_3(\nu)$

металла, точка пересечения прямой с осью абсцисс дает граничную частоту (красную границу) фотоэффекта ( $\nu_{\text{гр}}$ ), а тангенс угла наклона прямой к оси частот  $\text{tg } \alpha = h/e$  определяется только постоянной Планка и зарядом электрона.

### **Задания для подготовки к лабораторной работе**

1. Изучить общие сведения о внешнем фотоэффекте, ознакомиться с устройством и работой измерительной установки, с методикой эксперимента.
2. В первой части отчета отразить основные закономерности внешнего 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. Исследование прямой ветви вольт-амперной характеристики фотоэлемента.*

1.1. Включить установку. Между лампой и фотоэлементом установить зеленый светофильтр. Переключатель  $S_2$  поставить в положение «+». Переключатель  $S_3$  «Осветитель» поставить в положение 2, при котором обеспечивается освещенность фотокатода  $E_2$ . Изменяя напряжение на фотоэлементе от 0 до 20 В с шагом 1 В, снять зависимость фототока  $I_2$  от «прямого» напряжения  $U$ .

1.2. Повторить измерения фототоков  $I_3$  и  $I_4$  при освещенностях фотокатода  $E_3$  и  $E_4$  (положения переключателя «Осветитель» при этом – в положениях 3 и 4 соответственно). Данные измерений по пп. 1.1 и 1.2 занести в одну таблицу для зеленого светофильтра.

1.3. Повторить измерения пп. 1.1, 1.2 для синего светофильтра. Данные занести в таблицу измерений для синего светофильтра.

*2. Исследование вольт-амперной характеристики фотоэлемента при «обратном» напряжении.*

2.1. Переключатель «Полярность» поставить в положение «-». Переключатель  $S_3$  «Осветитель» поставить в положение 2, при котором обеспечивается освещенность фотокатода  $E_2$ . Измерить запирающее напряжение ( $U_3$ ) на фотоэлементе (при фототоке  $I = 0$  мкА) для зеленого

светофильтра ( $\lambda_1 \approx 550$  нм) и для синего светофильтра ( $\lambda_2 \approx 400$  нм) по 5 раз. Данные измерений свести в таблицу.

### Указания по обработке результатов наблюдений

1. По данным измерений пп. 1.1–1.3 построить графики зависимости фототока от прямого напряжения (вольт-амперную характеристику) на фотоэлементе для зеленого и синего светофильтров. Определить силу тока насыщения для каждого значения освещенности ( $E$ ) фотокатода. Построить графики зависимости тока насыщения от освещенности фотокатода для одного из значений прямого напряжения в области насыщения (для обоих светофильтров).

2. По данным п. 2.4 указаний по выполнению эксперимента построить график зависимости запирающего напряжения ( $U_3$ ) от частоты падающего света  $\nu = c/\lambda$ . Из угла наклона соответствующей прямой к оси частот оценить числовое значение постоянной Планка. Сравнить полученное экспериментальное значение постоянной Планка с табличным значением.

3. Экстраполяцией прямой  $U_3(\nu)$  до пересечения с осью абсцисс найти граничную частоту (красную границу) фотоэффекта ( $\nu_{гр}$ ). Рассчитать работу выхода ( $A_{вых}$ ) для материала фотокатода в соответствии с (6.3).

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.
3. Сформулируйте и объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
4. Что понимают под красной границей фотоэффекта?
5. Изобразите вольт-амперную характеристику фотоэлемента и объясните ее особенности.
6. Что такое задерживающее (запирающее) напряжение при фотоэффекте? Как и почему оно зависит от частоты света?
7. В чем заключается методика измерения постоянной Планка в данной работе?
8. Что такое фототок насыщения? От чего зависит его значение?

9. Нарисуйте зависимость запирающего напряжения на фотоэлементе от частоты электромагнитного излучения и объясните характер этой зависимости.
10. В чем сущность опытов Ф. Ленарда по внешнему фотоэффекту?

## Лабораторная работа 6.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕМЕНТА С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

Методическое описание данной лабораторной работы разработано на кафедре общей физики Новосибирского ГТУ [5]. Макет изготовлен в ООО «Опытные приборы» (г. Новосибирск).

**Цели работы:** изучение явления внешнего фотоэффекта; экспериментальное исследование вольт-амперной, световой и спектральной характеристик вакуумного фотоэлемента.

**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. Для измерения вольт-амперной, световой и спектральной характеристик вакуумного фотоэлемента применяется амперметр-вольтметр АВ-1.

На рис. 6.4 представлена электрическая схема экспериментальной установки.

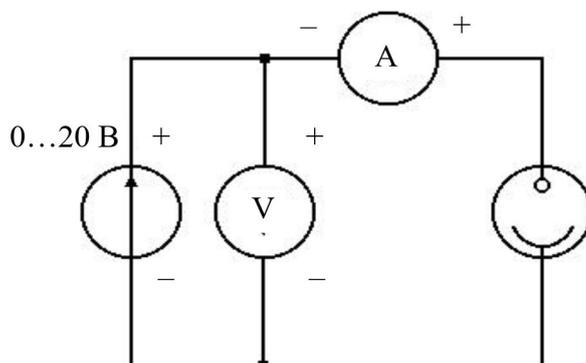


Рис. 6.4. Электрическая схема экспериментальной установки

В качестве источника ЭДС используется генератор регулируемого напряжения блока ИПС1, работающего в диапазоне 0...20 В. Следует обратить внимание на правильность подключения полярности амперметра. Такое подключение обеспечивает подавление сетевых наводок в измерительной цепи.

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 6.5.

В лабораторной установке в качестве фотоэммитера используется катод фотоэлемента (или полупрозрачный катод фотоэлектронного умножителя), изготовленный из полупроводникового вещества. Электроны, выбитые светом

из катода, попадают на анод (роль анода у фотоэлектронного умножителя играют соединенные между собой диоды). Поскольку фотоэмиттер и анод обычно изготавливают из веществ, близких по электрофизическим свойствам, контактную разность потенциалов между катодом и анодом можно считать малой.

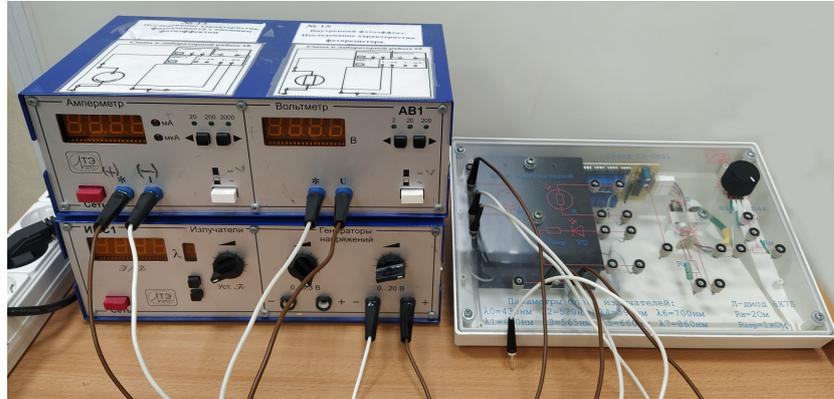


Рис. 6.5. Модульный учебный комплекс МУК-ОК

Поскольку наблюдение внешнего фотоэффекта в экспериментальной установке реализуется с помощью фотоэлементов, изготовленных из полупроводникового вещества, то нужно учитывать, что регистрируемый с помощью амперметра световой ток является суперпозицией «истинного» фототока и темнового тока  $I = I_{\text{ф}} + I_{\text{т}}$ .

При выполнении работы необходимо учитывать, что в лабораторной установке устанавливается не абсолютная, а относительная величина светового потока, которая пропорциональна относительной интенсивности излучения  $\Phi_{\text{отн}} \sim J/J_0$ , где  $J_0$  – некоторая константа, задаваемая измерительным прибором.

### Исследуемые закономерности

Краткое теоретическое описание основных закономерностей внешнего фотоэффекта приведено в общих сведениях данного раздела. В этой лабораторной работе исследуются вольт-амперная, световая и спектральная характеристики вакуумного фотоэлемента при внешнем фотоэффекте.

*Вольт-амперной характеристикой фотоэлемента* называется зависимость силы фототока в цепи фотоэлемента от напряжения между катодом и анодом для выбранных значений падающего на фотоэлемент светового потока с определенной длиной волны

$$I_{\text{ф}} = f(U)_{\Phi = \text{const}, \lambda = \text{const}}$$

На рис. 6.6 приведены ВАХ фотоэлемента, полученные для различных световых потоков ( $\Phi$ ) с одной и той же длиной волны.

С увеличением напряжения фототок возрастает, так как все большее число выбитых из катода электронов достигают анода. При некотором напряжении, соответствующем точке *A*, анода достигают все фотоэлектроны и фототок достигает насыщения (участок *AB* на рис. 6.6). При увеличении светового потока фототок насыщения ( $I_{\text{ф. н}}$ ) увеличивается.

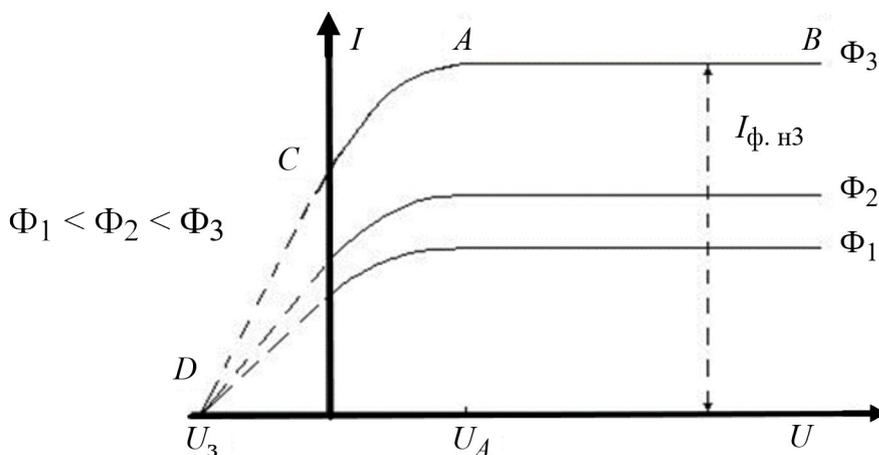


Рис. 6.6. Вольт-амперные характеристики фотоэлемента

Выбиваемые из катода фотоэлектроны обладают различной кинетической энергией, и часть из них может достигать анода даже в отсутствие ускоряющего напряжения. Этим объясняется наличие фототока при  $U = 0$ .

Напряжение обратной полярности, подаваемое на электроды, уменьшает ток фотоэффекта, поскольку электронам приходится совершать дополнительную работу по преодолению электростатических сил. Напряжение, при котором фототок полностью прекращается, называется задерживающим или запирающим напряжением ( $U_3$ ).

*Световой характеристикой фотоэлемента* называется зависимость фототока насыщения ( $I_{\text{ф. н}}$ ) от светового потока ( $\Phi$ ) при неизменном его спектральном составе и постоянном напряжении ( $U$ ) между анодом и катодом:

$$I_{\text{ф. н}} = f(\Phi)_{U=\text{const}, \lambda=\text{const}}$$

Световая характеристика вакуумного фотоэлемента (рис. 6.7) носит линейный характер (при не слишком больших световых потоках, когда не создается большого отрицательного заряда у фотокатода и может быть получен ток насыщения).

*Спектральной характеристикой фотоэлемента* называется зависимость

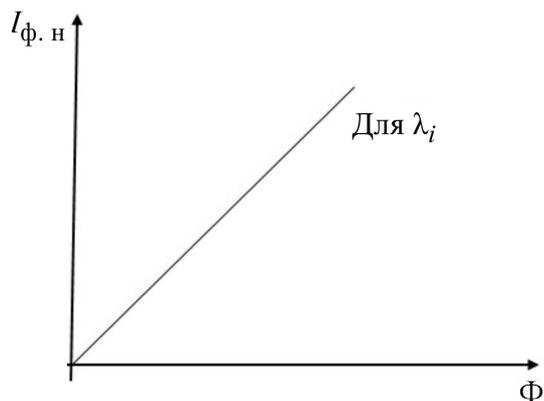


Рис. 6.7. Световая характеристика вакуумного фотоэлемента



## Указания по выполнению эксперимента

1. С помощью соединительных проводников на стенде с объектами исследования СЗ-ОК01 собрать электрическую схему экспериментальной установки (см. рис. 6.4).

На блоке амперметра-вольтметра АВ-1 выбрать режим измерения вольтметра 0...20 В и режим измерения амперметра – 20 мкА.

2. Снять темновую характеристику фотоэлемента  $I_T = f(U)_{\Phi = \text{const}}$  при значении относительного светового потока  $\Phi_{\text{отн}} \sim J/J_0 = 0.1$  и длине волны  $\lambda_4$  в диапазоне значений напряжения  $U = 0...20$  В с шагом  $\Delta U = 1$  В. Значения темнового тока занести в табл. 6.1.

3. Снять семейство вольт-амперных характеристик  $I = f(U)_{\Phi = \text{const}, \lambda = \text{const}}$  в диапазоне значений напряжения  $U = 0...20$  В с шагом  $\Delta U = 1$  В для трех значений относительного светового потока  $\Phi_{\text{отн}} \sim J/J_0$  (например, для  $(J/J_0)_1 = 0.3$ ,  $(J/J_0)_2 = 0.7$  и  $(J/J_0)_3 = 1.1$ ) при длине волны света  $\lambda_4$ . Результаты измерений занести в табл. 6.1.

4. Снять спектральную характеристику фотоэлемента  $I_{\text{ф.н}} = f(\lambda)_{\Phi = \text{const}, U = \text{const}}$  в диапазоне длин волн  $\lambda_0... \lambda_7$ , значения которых приведены на стенде СЗ-ОК1 и записаны в табл. 6.2. Измерения светового тока ( $I$ ) выполнить при фиксированном значении напряжения ( $U$ ), соответствующем фототоку насыщения (например,  $U_{\text{н}} = 20$  В) и фиксированном значении относительного светового потока (например,  $J/J_0 = 1.1$ ). Для каждого значения  $\lambda_i$  измерить также темновой ток (при  $J/J_0 = 0.1$ ,  $U_{\text{н}} = 20$  В). Результаты измерений занести в табл. 6.2.

## Указания по обработке результатов наблюдений

1. Используя результаты измерений светового ( $I$ ) и темнового ( $I_T$ ) токов в табл. 6.1 и 6.2, вычислить истинные значения фототока, которые равны разности этих токов  $I_{\text{ф}} = I - I_T$ , и занести значения  $I_{\text{ф}}$  в табл. 6.1 и 6.2.

2. По данным табл. 6.1 построить на миллиметровой бумаге графики вольт-амперных характеристик  $I_{\text{ф}} = f(U)_{\Phi = \text{const}, \lambda = \text{const}}$  в диапазоне значений напряжения  $U = 0...20$  В с шагом  $\Delta U = 1$  В для трех значений относительного светового потока  $\Phi_{\text{отн}} \sim J/J_0$  (например, для  $(J/J_0)_1 = 0.3$ ,  $(J/J_0)_2 = 0.7$  и  $(J/J_0)_3 = 1.1$ ) при длине волны света  $\lambda_4$ .

3. Определить по графикам п. 2 значения фототока насыщения ( $I_{\text{ф.н}}$ ) для каждого значения относительного светового потока  $\Phi_{\text{отн}} \approx (J/J_0)$  при  $U_{\text{н}} = 20$

В. Построить на миллиметровой бумаге световую характеристику фотоэлемента  $I_{\phi} = f(\Phi)_{U=\text{const}, \lambda=\text{const}}$ .

4. По данным табл. 6.2 построить на миллиметровой бумаге спектральную характеристику фотоэлемента  $I_{\phi, \text{н}} = f(\lambda)_{\Phi=\text{const}, U=\text{const}}$ . Экстраполяцией спектральной кривой до пересечения с осью абсцисс определить красную границу ( $\lambda_{\text{кр}}$ ) фотоэффекта (когда фототок будет равен нулю) и соответствующую ей частоту  $\nu_{\text{гр}} = c/\lambda_{\text{кр}}$ . Рассчитать порог фотоэффекта  $W_{\text{гр}} = h\nu_{\text{гр}}$ . Убедиться, что катод фотоэлемента действительно изготовлен из полупроводника (для полупроводников порог фотоэффекта  $W = 1 \dots 2$  эВ).

5. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта?
2. Объясните принцип работы фотоэлемента.
3. Что такое красная граница фотоэффекта?
4. Объясните вид вольт-амперной характеристики фотоэлемента.
5. Что такое задерживающий потенциал? От чего он зависит?
6. Каким способом измеряется максимальная скорость фотоэлектронов?
7. Назовите основные закономерности фотоэффекта. Как объяснить их на основе квантовых представлений?
8. Как из опытов по фотоэффекту определить постоянную Планка?
9. Что такое фотоны и каковы их характеристики?
10. Нарисуйте вольт-амперную характеристику для фототока при двух различных освещенностях. Объясните эти зависимости.

### Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. V: Атомная и ядерная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 784 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – СПб.: Лань, 2007. – 320 с.
3. Иродов И. В. Квантовая физика. Основные законы: учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 272 с.
4. Методические указания к лабораторным работам по атомной и ядерной физике и физике твердого тела: в 2 ч. Ч. 1 / под ред. К. А. Барсукова, Б. Ф. Алексеева; ЛЭТИ. – Л., 1985. – 34 с.

5. 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.