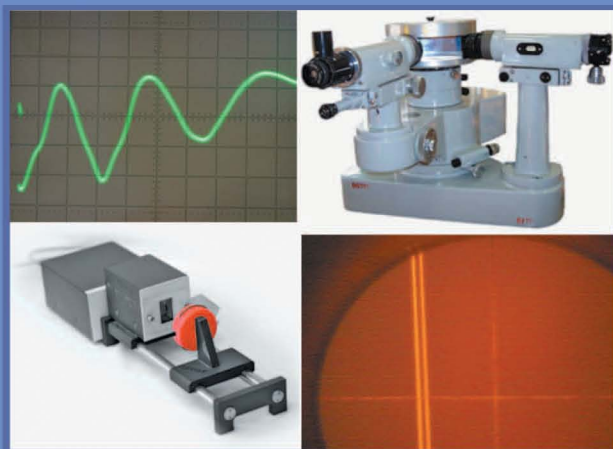


МОСКОВСКИЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ



Москва
2015

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский педагогический государственный университет»**



Н. Б. Виноградова, А. Б. Казанцева

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**МПГУ
Москва • 2015**

УДК 37.012.7
ББК 22.33
В491

Рецензенты:

Г. Н. Гольцман, доктор физико-математических наук, профессор, МПГУ

О. Н. Коротаев, доктор физико-математических наук, профессор, МПГУ

Виноградова, Наталия Борисовна.

В491 Квантовая физика : Лабораторный практикум / Н. Б. Виноградова, А. Б. Казанцева. – Москва : МПГУ, 2015. – 148 с. : ил.

ISBN 978-5-4263-0224-2

Данное пособие содержит описания лабораторных работ по физике атома, атомного ядра и элементарных частиц, которые выполняются в учебной лаборатории квантовой физики Института физики, технологии и информационных систем МПГУ. Пособие отвечает требованиям программы по курсу общей физики ФГОС ВПО нового поколения и предназначено для студентов 3-го курса факультета физики и информационных технологий МПГУ.

Авторы систематизировали результаты многолетней работы сотрудников кафедры общей и экспериментальной физики, принимавших участие в создании лабораторного практикума по общей физике.

УДК 37.012.7
ББК 22.33

ISBN 978-5-4263-0224-2

© МПГУ, 2015

© Виноградова Н. Б., Казанцева А. Б., 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
<i>Лабораторная работа № 1</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ.....	6
<i>Лабораторная работа № 2</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА МЕТОДОМ ЗАДЕРЖИВАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА.....	11
<i>Лабораторная работа № 3</i> ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА	20
<i>Лабораторная работа № 4</i> ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	29
<i>Лабораторная работа № 5</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА	41
<i>Лабораторная работа № 6</i> ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ.....	52
<i>Лабораторная работа № 7</i> ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ПОСТУЛАТОВ БОРА.....	60
<i>Лабораторная работа № 8</i> СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	72
<i>Лабораторная работа № 9</i> СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ДЛЯ ФОТОНОВ	83

<i>Лабораторная работа № 10</i> ИЗУЧЕНИЕ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА	89
<i>Лабораторная работа № 11</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА РАДОНА.....	99
<i>Лабораторная работа № 12</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩЕГО ИЗОТОПА КАЛИЯ	109
<i>Лабораторная работа № 13</i> ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ И ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ..	119
<i>Лабораторная работа № 14</i> ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ МИООНОВ	134
СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ	140

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие содержит описания лабораторных работ по физике атома, атомного ядра и элементарных частиц, которые выполняются в учебной лаборатории квантовой физики Института физики, технологии и информационных систем Московского государственного педагогического университета (МПГУ).

Большинство лабораторных работ являются результатом труда коллектива преподавателей и инженеров кафедры общей и экспериментальной физики¹. Авторами пособия была проведена работа по обновлению имеющихся лабораторных работ и постановке новых.

В описании каждой лабораторной работы сформулированы цели эксперимента, представлен перечень используемых приборов и оборудования, дано краткое теоретическое введение, подробно описаны порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов, а также сформулированы вопросы к защите работы. К некоторым работам предпослано более подробное теоретическое введение, помогающее глубже разобраться в физике изучаемых процессов. Помимо рисунков и схем приводятся фотографии лабораторных установок (выполненные Ю. Зачесовой и Н. Виноградовой), рабочие таблицы, графики и справочные материалы.

Пособие соответствует рабочим программам учебных дисциплин «Атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, а также «Общая и экспериментальная физика (раздел Квантовая физика)» для направления подготовки 44.03.05 Педагогическое образование, профили «Физика и информатика», «Физика и иностранный язык».

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ за поддержку в работе.

¹ В основу пособия положен 4-й раздел книги: В. Н. Александров, С. В. Бирюков, И. А. Васильева, Н. Б. Виноградова и др. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: Учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / Под. ред. Е. М. Гершензона и А. Н. Мансурова. – М.: «Академия», 2004.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: ознакомление с внешним фотоэффектом и фотоэлементами; определение зависимости фототока от анодного напряжения и освещенности; расчет чувствительности фотоэлементов и квантового выхода фотоэффекта.

Приборы и принадлежности: вакуумный и газонаполненный фотоэлементы; оптическая скамья, лампа накаливания, источник питания для фотоэлементов, вольтметр, амперметр, люксметр, каретка для фотоэлементов.

ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлементы, действие которых основано на внешнем фотоэффекте, бывают вакуумные и газонаполненные. Последние заполнены инертным газом при давлении порядка 0,005–1 мм рт.ст.

Фототок в вакуумном фотоэлементе (при постоянном световом потоке) при увеличении анодного напряжения достигает насыщения. Фототок в газонаполненном фотоэлементе при увеличении анодного напряжения плавно возрастает. При некотором достаточно большом напряжении сила тока резко увеличивается и начинается самостоятельный разряд. Возникновение самостоятельного разряда недопустимо, так как при этом разрушается светочувствительный слой.

Отношение фототока I к световому потоку Φ , падающему на фотоэлемент, называют *чувствительностью* фотоэлемента:

$$\gamma = \frac{I}{\Phi} . \quad (1)$$

Чувствительность фотоэлемента зависит от анодного напряжения и спектрального состава света. За единицу чувствительности принимают микроампер на люмен (мкА/лм).

Отношение числа фотоэлектронов, вылетевших из катода, к числу фотонов падающего монохроматического света называется *квантовым выходом* фотоэффекта δ .

Число вылетевших в одну секунду электронов можно найти, измерив фототок I в режиме насыщения, а число фотонов можно определить, зная падающий на фотоэлемент световой поток Φ . Квантовый выход, таким образом, будет равен

$$\delta = \frac{\left(\frac{I}{e}\right) K_m}{\left(\frac{\Phi}{h\nu_0}\right)}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, $K_m = 683$ лм/Вт – световая эффективность потока излучения при $\lambda_0 = 550$ нм, $h\nu_0$ – энергия соответствующего фотона.

Световой поток Φ , падающий на фотоэлемент, можно найти по показаниям люксметра, дающего значение освещенности E при фиксированном расстоянии r , и известному диаметру окна фотоэлемента d :

$$\Phi = \frac{\pi d^2}{4} E. \quad (3)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из источника питания, двух фотоэлементов: 1) СЦВ-4 – сурьмяно-цезиевый вакуумный, 2) ЦГ-4 – цезиевый газонаполненный; источника света – лампы накаливания; вольтметра и микроамперметра.

Приборы собраны по схеме, показанной на рис. 1.1. Общий вид установки показан на рис. 1.2.

Для проведения измерений фотоэлементы располагают на оптической скамье в подвижной каретке, имеющей указатель расстояния от источника света.

Источник света в данной работе можно считать точечным, так как размер нити накаливания мал по сравнению с расстоянием r от лампы до фотоэлемента. Для измерения освещенности используется люксметр.

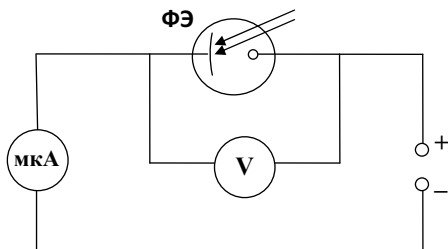


Рис. 1.1

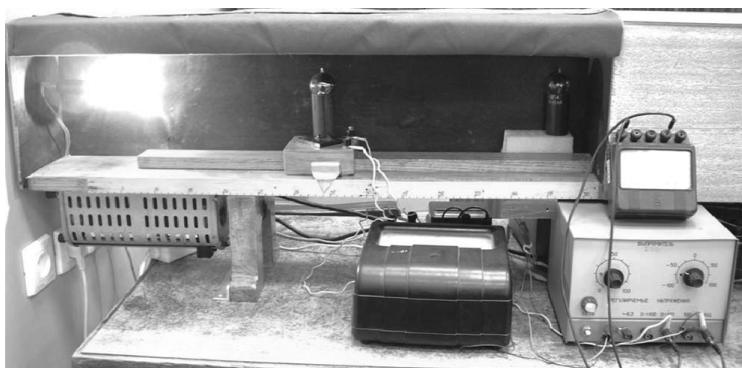


Рис. 1.2

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Определение зависимости тока фотоэлемента от анодного напряжения (ВАХ).

1. Расположите вакуумный фотоэлемент СЦВ-4 в каретке на некотором фиксированном расстоянии от источника света (20 или 25 см).
2. Включите выпрямитель.
3. При постоянном световом потоке от лампы накаливания измерьте фототок, текущий через фотоэлемент, при 10–12 значениях анодного напряжения (вольт-амперная характеристика фотоэлемента). Напряжение меняйте от 0 до 120 В.
4. Проведите аналогичные измерения с газонаполненным фотоэлементом ЦГ-4.

- Результаты измерения силы тока I при различных значениях анодного напряжения занесите в таблицу 1.
- По результатам измерений постройте графики функций $I = f(U)$ для обоих фотоэлементов.

Таблица 1

$U, \text{В}$		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
СЦВ-4	$I, \text{мкА}$													
ЦГ-4	$I, \text{мкА}$													

Задание 2. Определение зависимости тока фотоэлемента от освещенности катода.

- Установите фотоэлемент СЦВ-4 в каретку на оптической скамье на фиксированном расстоянии от лампы (см. задание 1).
- При постоянном световом потоке лампы подайте на фотоэлемент анодное напряжение, соответствующее режиму тока насыщения.
- Перемещая каретку с фотоэлементом по оптической скамье с шагом в 5 см, измерьте фототок для 6–8 положений фотоэлемента.
- Проведите аналогичные измерения с фотоэлементом ЦГ-4.
- Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

	$r, \text{см}$								
	$I/r^2, \text{см}^{-2}$								
СЦВ-4	$I, \text{мкА}$								
ЦГ-4	$I, \text{мкА}$								

- Постройте графики функций $I = f(1/r^2)$ для вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.

Задание 3. Расчет чувствительности фотоэлементов.

- При помощи люксметра измерьте освещенность E окна фотоэлемента. Для этого отодвиньте каретку фотоэлемента в конец оптической скамьи, расположите приемник люксметра на оптической скамье на расстоянии

- от источника света, используемом в задании 1. Установите предел измерений люксметра 500 лк (со снятой матовой крышкой). Измерьте значение освещенности в данной точке.
2. Пользуясь формулой (1), рассчитайте чувствительность фотоэлементов. Расчет чувствительности для вакуумного фотоэлемента произведите при токе, соответствующем току насыщения.

Задание 4. Оценка квантового выхода фотоэффекта для вакуумного фотоэлемента.

Используя формулы (2) и (3) и значение тока насыщения, полученное в задании 1, рассчитайте квантовый выход фотоэффекта для сурьмяно-цезиевого вакуумного фотоэлемента.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Почему в фотоэлементах, работающих в области видимого света, светочувствительный слой делают из щелочных металлов?
2. Как объяснить отличие вольт-амперных характеристик вакуумных и газонаполненных фотоэлементов?
3. Как объяснить различный характер зависимости фототока от освещенности в вакуумном и газонаполненном фотоэлементах?
4. Докажите, что зависимость величины фототока от $1/r^2$ (r – расстояние между фотоэлементом и точечным источником света) должна быть линейной.
5. При каком токе рассчитывается чувствительность газонаполненного фотоэлемента?
6. Перечислите эмпирические закономерности фотоэффекта. Какие закономерности не удается объяснить с позиции волновой теории света?
7. Что называется красной границей фотоэффекта и от чего зависит ее значение?
8. Почему квантовый выход много меньше единицы? Может ли квантовый выход фотоэффекта быть больше единицы?
9. Объясните устройство и принцип действия фотоумножителя. В чем состоит преимущество фотоумножителя перед обычным фотоэлементом?
10. Какие экспериментальные факты свидетельствуют о неделимости энергии фотона?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА МЕТОДОМ ЗАДЕРЖИВАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА

Цель работы: определение красной границы фотоэффекта и постоянной Планка.

Приборы и принадлежности: вакуумный фотоэлемент, монохроматор УМ-2, лампа накаливания, вольтметр, чувствительный микроамперметр (Ф-195), набор светофильтров, выпрямитель.

ВВЕДЕНИЕ

При взаимодействии фотона с электроном, находящимся в веществе, выполняется закон сохранения энергии. В результате поглощения света энергия электрона возрастает на величину, равную энергии фотона. Если это изменение энергии превышает работу выхода электрона из вещества, то электрон может покинуть вещество и стать свободным. Такой электрон называется фотоэлектроном. Для фотоэлектрона можно записать закон сохранения энергии в виде

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = h\nu - A_{вых}, \quad (1)$$

где v_{max} – максимальная скорость вылетевшего электрона; $A_{вых}$ – работа выхода; ν – частота поглощенного света.

Это соотношение называется *уравнением Эйнштейна*. Если фотоэлектрон отдает часть своей энергии атомам вещества, то его скорость после вылета будет меньше, чем v_{max} . Из уравнения (1) видно, что вылет электрона возможен, если энергия фотона будет больше, чем работа выхода. Минимальную частоту света ν_{cp} , при которой возможен фотоэффект, называют красной границей фотоэффекта. Величина ν_{cp} находится из условия

$$h\nu_{гр} = A_{вых}. \quad (2)$$

Так как при частоте света, превышающей красную границу, фотоэлектроны обладают некоторой скоростью, то через фотоэлемент будет протекать

фототок и при напряжениях, при которых анод будет иметь отрицательный потенциал относительно фотокатода. Такое напряжение называют *задерживающим*, потому что электрон отталкивается от анода и, если его скорость невелика, то может вернуться на фотокатод.

Общий вид вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента изображен на рис. 2.1.

Задерживающие напряжения представляют область отрицательных напряжений. При некотором напряжении фототок обращается в нуль.

Значение этого напряжения определяется соотношением

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3, \quad (3)$$

и уравнение Эйнштейна для этого случая принимает вид

$$U_3 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A_{\text{вых}}}{e}. \quad (4)$$

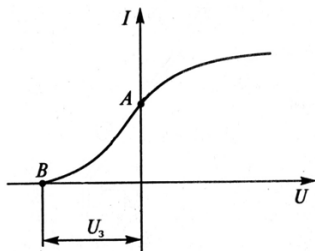


Рис. 2.1

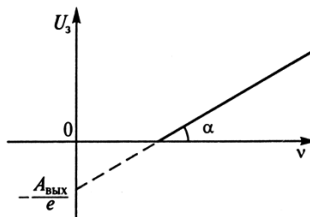


Рис. 2.2

График зависимости U_3 от частоты падающего на фотокатод света представлен на рис. 2.2. Из этого графика можно определить постоянную Планка

$$h = e \frac{U_2 - U_1}{\nu_2 - \nu_1} \quad (5)$$

и работу выхода

$$A_{\text{вых}} = e \frac{U_2 \nu_1 - U_1 \nu_2}{\nu_2 - \nu_1}, \quad (6)$$

где U_1 и U_2 — задерживающие напряжения, когда фототок обращается в нуль при частотах света ν_1 и ν_2 соответственно.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе используется вакуумный фотоэлемент $\Phi Э$, катод которого сделан из сурьмяно-цезиевого сплава. Электрическая схема установки изображена на рис. 2.3, общий вид установки – на рис. 2.4а и 2.4б.

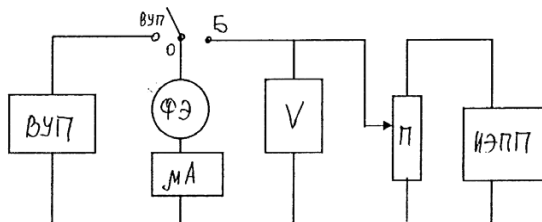


Рис. 2.3

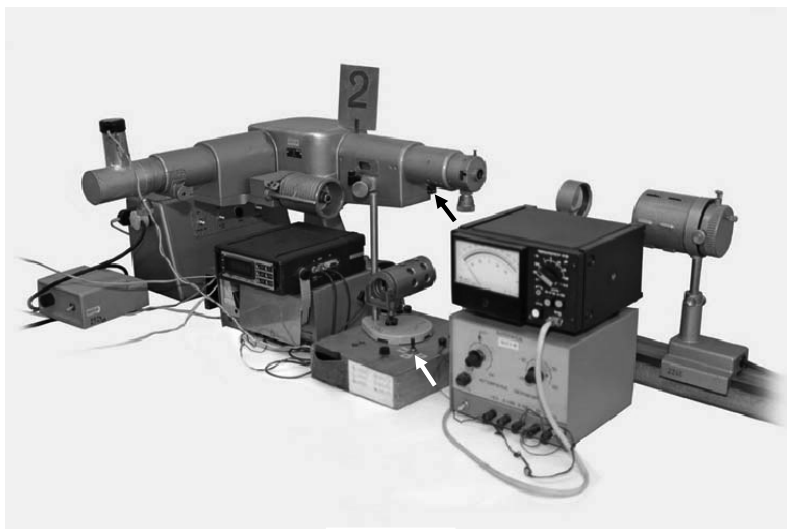


Рис. 2.4а

Для определения красной границы фотоэффекта фотоэлемент закрепляется в патроне (с учетом полярности) и вставляется в специальный кожух на выходе монохроматора (рис. 2.4а).

Виноградова Наталия Борисовна
Казанцева Алла Борисовна

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Редактор *Дубовец В. В.*
Оформление обложки *Удовенко В. Г.*
Компьютерная верстка *Дорожкина О. Н., Ковтун М. А.*

Управление издательской деятельности
и инновационного проектирования МПГУ
119571, Москва, Вернадского пр-т, д. 88, оф. 446.
Тел.: (499) 730-38-61
E-mail: izdat@mpgu.edu

Подписано в печать 20.12.2015. Формат 60х90/16.
Бум. офсетная. Печать цифровая. Объем 9,25 п. л.
Тираж 500 экз. Заказ № 393.

ISBN 978-5-4263-0224-2

