

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

ЧАСТЬ 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

Тверь 2021

УДК 531:534:536:539 (075.8)
ББК 22.2:22.36я7

Рецензенты: декан физико-технического факультета Тверского государственного университета, доцент кафедры «Физика конденсированного состояния», кандидат физико-математических наук Педько Б.Б.; доцент кафедры «Прикладная физика» Тверского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент Новикова О.О.

Лабораторный практикум по физике. Часть 3. Квантовая оптика, атомная и ядерная физика: учеб. пособие / А.В. Твардовский [и др.]. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. 96 с.

Включает в себя методические указания к лабораторным работам по разделам курса физики «Квантовая оптика, атомная и ядерная физика» (часть V). Приведены вопросы для получения допуска к выполнению лабораторных работ, контрольные вопросы и примеры вариантов заданий к их защите, образец оформления отчета по лабораторной работе, необходимые справочные материалы.

Предназначено для студентов первого и второго курсов факультетов ПИЭ, ИТ и ХТ ТвГТУ при освоении лабораторного практикума по курсу общей физики.

Авторы выражают глубокую признательность кандидату технических наук профессору А.В. Клингеру и кандидату технических наук Р.А. Испиряну за помощь в создании данного пособия.

ISBN 978-5-7995-1009-1

ISBN 978-5-7995-1157-9

© Тверской государственный
технический университет, 2021
© Твардовский А.В., 2021
© Дергунов П.И., 2021
© Зубкова А.В., 2021
© Испирян С.Р., 2021
© Кривенко И.В., 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу лабораторного практикума положены работы, выполняемые на кафедре общей физики ТвГТУ. Книга включает в себя общие требования к подготовке, оформлению и защите лабораторных работ.

Пятая часть лабораторных работ содержит методические указания к выполнению работ по различным разделам курса физики. К каждой лабораторной работе даны схема установки, подробное описание методики измерений с выводом расчетных формул, порядок выполнения и обработки результатов, контрольные вопросы. В конце книги приведен список рекомендуемой учебной и дополнительной литературы.

Приложения содержат необходимые справочные данные (см. прилож. 1); образец оформления отчета по лабораторной работе (см. прилож. 2); алгоритм расчета случайной и приборной погрешностей (см. прилож. 3); спектрограммы ртути и водорода (см. прилож. 4); условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов (см. прилож. 5).

Основы методики обработки результатов измерений (оценки погрешностей, построения графиков, анализа экспериментальных зависимостей) изложены в первой книге – «Лабораторный практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика». Краткий алгоритм расчета случайной и приборной погрешностей приведен в прилож. 3.

Основные характеристики и принцип действия электроизмерительных приборов, особенности измерения электрических величин и особенности расчета погрешностей электроизмерительных приборов описаны в «Лабораторном практикуме. Часть 2. Электричество, магнетизм и волновая оптика».

Нумерация рисунков, формул и таблиц – сквозная в пределах описания к каждой лабораторной работе.

В последние годы на кафедре общей физики более широко применяется, наряду с обычным, имитационное выполнение лабораторных работ на компьютерных моделях. С этой целью была создана специальная программа «Виртуальная лаборатория физики». Последовательность действий при работе на компьютерных моделях и на реальных лабораторных установках, как правило, одна и та же.

Авторы благодарны всем преподавателям и сотрудникам кафедры общей физики ТвГТУ, в разные годы принимавшим активное участие в создании лабораторных установок, в разработке и совершенствовании методик проведения работ.

ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ, ОФОРМЛЕНИЮ И ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Для подготовки к лабораторным работам и окончательного оформления отчетов по ним необходима рабочая тетрадь – **отдельная** (не совмещенная с конспектом лекций и работами по другим видам занятий) тетрадь **в клетку**. Общей тетради (лучше всего – нестандартного формата А4) достаточно для освоения всего лабораторного практикума в течение двух-трех семестров. На один семестр нужна тетрадь объемом не менее 24 листов. По согласованию с преподавателем допускается оформление работ на компьютере **при наличии заверенных подписью преподавателя или лаборанта результатов измерений и условий соблюдения всех правил оформления**. При оформлении результатов проделанной работы в электронном виде отчет об этой работе необходимо распечатать на листах белой бумаги формата А4 и подшить в папку.

Подготовка к работе

Для допуска к выполнению лабораторной работы необходимо подготовиться к ней. Подготовка включает в себя элементы:

1. Предварительное (с помощью настоящего пособия, конспекта лекций и рекомендуемой литературы) ознакомление с изучаемым в данной работе физическим явлением, экспериментальной установкой и методикой исследования. Студент должен быть готов к ответу на вопросы о том, какое явление изучается в работе; какие основные законы описывают это явление; какая физическая величина подлежит экспериментальному определению, что она собой представляет и от чего зависит. Кроме того, необходимо быть готовым показать на схеме или на реальной лабораторной установке ее основные элементы, измерительные приборы и приспособления, охарактеризовать их назначение и принцип действия.

2. Наличие конспекта лабораторной работы в тетради. В конспекте должны присутствовать номер, название и цель работы; схема установки; расчетные формулы (в описании методики измерений они, в отличие от остальных, выделены рамками) с расшифровкой всех входящих в эти формулы величин; пустые таблицы для занесения результатов измерений и расчетов.

Оформление отчета по лабораторной работе

По окончании выполнения работы отчет должен содержать (как минимум) все результаты измерений и данные для проведения дальнейших расчетов. В таком виде **отчет необходимо подписать у преподавателя или лаборанта** (в противном случае работа считается невыполненной).

В полностью оформленный отчет входят результаты всех необходимых вычислений с указанием единиц измерения размерных физических величин. Если результат заносится в таблицу, то достаточно привести подробный расчет только для одного опыта.

Графические зависимости оформляются в соответствии с правилами построения графиков, приведенными в первой части пособия, выполняются в специальной тетради с миллиметровой бумагой формата А4. Допускается оформление графиков на отдельных листах миллиметровой бумаги. В этом случае они обязательно **подклеиваются в тетрадь**. При оформлении графиков в электронном виде их необходимо распечатать на листах белой бумаги формата А5 или А4 и также подклеить в тетрадь.

При окончательной оценке лабораторной работы учитывается качество оформления: все записи должны быть аккуратными и разборчивыми, рисунки, схемы и таблицы выполнены с использованием карандаша, линейки и других необходимых чертежных инструментов. При оформлении отчета следует ориентироваться на образец, приведенный в прилож. 2.

Защита работы

Для подготовки к защите необходимо изучить теоретический материал в соответствии с контрольными вопросами, приведенными в конце руководства к каждой лабораторной работе. При этом недостаточно использовать только описание методики, содержащееся в данном пособии: следует прочитать и осмыслить соответствующие разделы конспекта лекций и рекомендуемой учебной литературы.

Вопросы, предлагаемые студенту при защите, могут касаться исследованных в работе физических явлений и законов, методики измерений и обработки результатов, требуют минимальных знаний в области теории ошибок, умения анализировать и количественно оценивать погрешности измерений. Задание для защиты может включать в себя как качественные вопросы, так и расчетные задачи, имеющие непосредственное отношение к проделанной работе.

На заключительном этапе подготовки к защите целесообразно ознакомиться и попытаться самостоятельно справиться с примерными вариантами заданий, данными в описании к лабораторным работам.

В соответствии с практикуемой на кафедре «Общая физика» ТвГТУ рейтинговой системой все элементы работы (подготовка и своевременное выполнение, оформление отчета и проверка знаний при ее защите) оцениваются в баллах. Итоговая сумма баллов, накопленная студентом к концу семестра, служит основанием для автоматического получения или неполучения зачета (допуска к экзамену); значение этой суммы может оказать влияние и на экзаменационную оценку.

ЧАСТЬ V

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

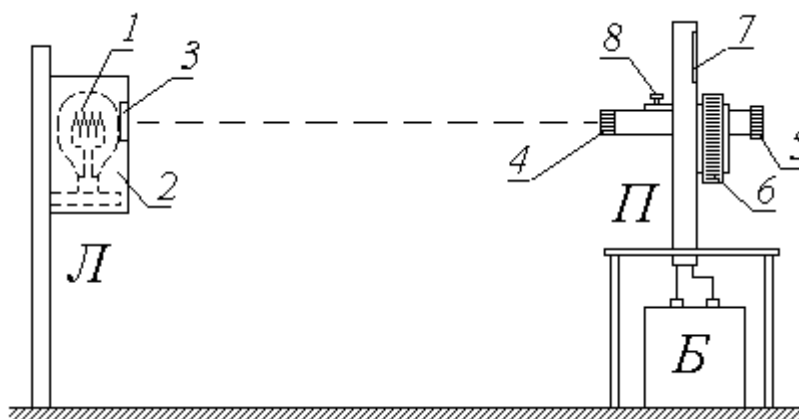
1. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Лабораторная работа 5.1 *Изучение законов теплового излучения* *с помощью яркостного пирометра*

Цели работы:

- 1) ознакомление с принципом действия яркостного пирометра и практическое измерение яркостной температуры нагретого тела;
- 2) применение закона Кирхгофа и формулы Планка для определения истинной температуры тела;
- 3) экспериментальная проверка справедливости закона Стефана – Больцмана.

Схема экспериментальной установки



- Л* – исследуемая лампа; *П* – пирометр; *Б* – батарея питания;
1 – нить накала лампы *Л*; *2* – защитный кожух; *3* – окно;
4 – объектив; *5* – окуляр; *6* – кольцо потенциометра;
7 – шкала; *8* – ввод/вывод нейтрального светофильтра

Для выполнения данной работы необходимо иметь лист миллиметровой бумаги формата А5 и чертежные принадлежности (карандаш, линейку).
--

Описание методики измерений

Схема питания лампы L от выпрямителя B изображена на рис. 1. Подаваемое на лампу напряжение регулируется с помощью потенциометра P_1 (практически это осуществляется вращением ручки на щите блока питания, в состав которого входит выпрямитель B) и измеряется вольтметром V_1 ; для измерения силы тока, протекающего по нити накала I , служит амперметр A .

Основной частью пирометра Π является вмонтированная внутри прибора пирометрическая эталонная лампа \mathcal{E} . Эталонная лампа питается от внешней аккумуля-

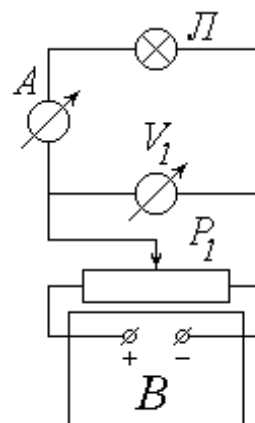


Рис. 1

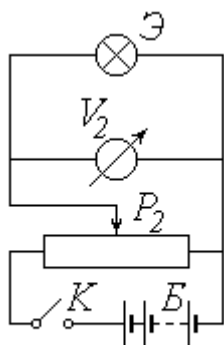


Рис. 39

Рис. 2

ляторной батареи B по схеме, изображенной на рис. 2. Цепь замыкается тумблером K , расположенным у основания пирометра. Потенциометр P_2 служит для регулирования подаваемого на лампу \mathcal{E} напряжения; на практике это осуществляется вращением кольца b на корпусе прибора. Температура нити эталонной лампы однозначно связана с подаваемым на нее напряжением; поэтому шкала 7 измеряющего его вольтметра V_2 проградуирована в градусах Цельсия.

Попадающий на объектив 4 свет от исследуемой лампы L проходит через систему линз оптической трубы пирометра (рис. 3), позволяющую наблюдать в окуляр 5 совмещенные в одной плоскости изображения нитей накала исследуемой (L) и эталонной (\mathcal{E}) ламп. Расположенный в оптической трубе красный светофильтр $K\Phi$ пропускает практически монохроматический свет с длиной волны

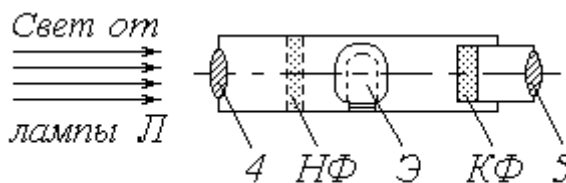


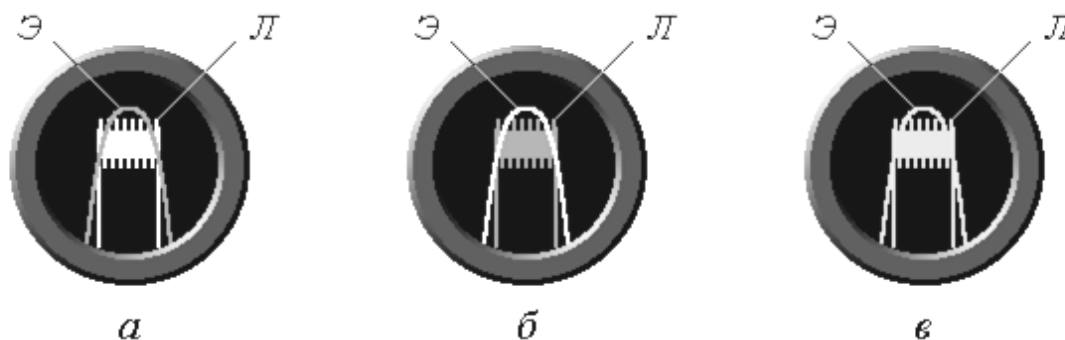
Рис. 3

$\lambda = 660 \text{ нм}$; поэтому изображения нитей имеют красную окраску.

Изменяя напряжение, подаваемое на эталонную лампу, можно добиться одинаковой яркости обеих нитей. На рис. 4 показана наблюдаемая в окуляр картина. Представлены случаи, когда яркость нити \mathcal{E} меньше (рис. 4а), больше (рис. 4б) и равна (рис. 4в) яркости нити L . В третьем случае

эталонная нить становится незаметной на фоне исследуемой (поэтому приборы такого типа называют пирометрами с исчезающей нитью).

При высокой температуре лампы $Л$ предусмотрено введение нейтрального светофильтра $НФ$ с помощью рычажка 8 на корпусе пирометра. Нейтральный светофильтр уменьшает яркость изображения нити $Л$ и позволяет уравнивать яркости наблюдаемых в окуляр нитей при меньшем напряжении на лампе $Э$. При введенном светофильтре $НФ$ показания пирометра



метра снимаются с его нижней шкалы, а при выведенном – с верхней.

Рис. 4: a – яркость нити эталонной лампы $Э$ меньше исследуемой $Л$;

$б$ – яркость нити эталонной лампы $Э$ больше исследуемой $Л$;

$в$ – яркости нитей ламп равны

В отсутствие красного светофильтра $КФ$ яркость изображения нити прямо пропорциональна ее излучательности (энергетической светимости) R , т.е. энергии излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела a во всем диапазон $б$ нм. Через светофильтр $в$ $Ф$ проходит лишь часть этой энергии – ΔR_λ , соответствующая интервалу длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$. Для достаточно узкого интервала $\Delta\lambda$ можно положить

$$\Delta R_\lambda \approx r(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda, \quad (1)$$

где $r(\lambda, T) = \frac{dR_\lambda}{d\lambda}$ – спектральная плотность излучательности (испускательная способность) тела; T – его абсолютная температура.

Проблема градуировки пирометра заключается в том, что различные тела имеют разные значения спектральной плотности излучательности при одних и тех же длине волны и температуре. Открытые экспериментально и обоснованные теоретически законы описывают тепловое излучение абсолютно черного тела ($АЧТ$). Поэтому проградуированная соответствующим образом шкала пирометра показывает не истинную температуру T нити эталонной лампы $Э$, а так называемую яркостную температуру T_λ , т.е. температуру $АЧТ$, имеющего такую же яркость. При выравнивании яркостей нитей $Л$ и $Э$ значения ΔR_λ у них становятся одинаковыми. Учитывая (1), можем записать

$$r(\lambda, T) = r_0(\lambda, T_\lambda), \quad (2)$$

где $r_0(\lambda, T_я)$ – спектральная плотность излучательности АЧТ при температуре $T_я$.

Как следует из закона Кирхгофа, спектральные плотности излучательности реального тела $r(\lambda, T)$ и АЧТ $r_0(\lambda, T)$ связаны соотношением

$$r(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \cdot r_0(\lambda, T), \quad (3)$$

где $\alpha(\lambda, T)$ – коэффициент поглощения (степень черноты) тела.

У многих тел, в частности у вольфрама, из которого изготовлена нить лампы L , коэффициент поглощения не очень сильно зависит от температуры (см. справочные данные в прилож. 1). Поэтому можно с достаточной степенью точности использовать для заданной длины волны λ осредненное в данном температурном диапазоне значение α_λ . Тогда последнее соотношение примет вид

$$r(\lambda, T) = \alpha_\lambda \cdot r_0(\lambda, T). \quad (4)$$

Приравнивая друг другу правые части выражений (2) и (4), получим

$$\alpha_\lambda \cdot r_0(\lambda, T) = r_0(\lambda, T_я). \quad (5)$$

Зависимость спектральной плотности излучательности АЧТ от длины волны и температуры (универсальная функция Кирхгофа) $r_0(\lambda, T)$ описывается формулой Планка:

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1},$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; k – постоянная Больцмана.

При сравнительно низких температурах ($T < 6000\text{ K}$) единиц в квадратных скобках можно пренебречь и формула Планка примет вид

$$r_0(\lambda, T) \approx \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right).$$

Подставляя последнее выражение в (5), получим

$$\alpha_\lambda \cdot \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right) = \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT_я}\right)$$

или (после логарифмирования)

$$\ln \alpha_\lambda - \frac{hc}{\lambda kT} = -\frac{hc}{\lambda kT_я}. \quad (6)$$

Уравнение (6) связывает истинную температуру T излучающего тела с его яркостной температурой $T_я$. Решая его относительно T , находим

$$\boxed{T = \frac{1}{\frac{1}{T_я} + C}}, \quad (7)$$

где

$$C = \frac{\lambda k \ln \alpha_\lambda}{hc} . \quad (8)$$

Как известно, тепловое излучение тел имеет место при любой отличной от абсолютного нуля температуре. Поэтому отключенная от источника питания нить лампы L излучает энергетический поток

$$\Phi_0 = S \cdot R(T_0) , \quad (9)$$

где S – площадь поверхности нити; $R(T_0)$ – ее излучательность при комнатной температуре T_0 .

После подключения лампы к сети питания ее нить разогревается за счет Джоулева тепла до температуры T и излучает энергетический поток

$$\Phi = S \cdot R(T) , \quad (10)$$

превышающий Φ_0 на величину потребляемой лампой мощности:

$$\Phi - \Phi_0 = \eta P , \quad (11)$$

где η – КПД питающей цепи, учитывающий различные энергопотери.

Мощность P легко рассчитать как

$$P = UI , \quad (12)$$

где U – питающее напряжение; I – сила тока в цепи.

С учетом (9) и (10) уравнение (11) можно переписать в виде

$$S \cdot [R(T) - R(T_0)] = \eta P . \quad (13)$$

Излучательность $R(T)$ определяется из интегрального соотношения

$$R(T) = \int_0^\infty r(\lambda, T) \cdot d\lambda$$

или с учетом (3)

$$R(T) = \int_0^\infty \alpha(\lambda, T) \cdot r_0(\lambda, T) \cdot d\lambda .$$

Считая нить лампы L *серым телом*, т.е. пренебрегая зависимостью ее коэффициента поглощения от длины волны и заменив функцию $\alpha(\lambda, T)$ ее осредненным во всем диапазоне длин волн значением α_T , получим

$$R(T) \approx \alpha_T \cdot \int_0^\infty r_0(\lambda, T) \cdot d\lambda = \alpha_T \cdot R_0(T) ,$$

где $R_0(T)$ – излучательность АЧТ.

Зависимость $R_0(T)$, согласно закону Стефана – Больцмана, имеет вид

$$R_0(T) = \sigma T^4 ,$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана.

С учетом принятых допущений выражение (13) примет вид

$$\alpha_T \cdot T^4 - \alpha_{T_0} \cdot T_0^4 = \frac{\eta}{\sigma S} \cdot P . \quad (14)$$

Значения коэффициента поглощения α_{T_0} (при температуре T_0) и α_T (при температуре T) составляют десятые доли единицы, т.е. являются величинами одного порядка, в то время как абсолютная температура раскаленной нити в четыре-пять раз превышает комнатную температуру T_0 . Таким образом, $T_0^4 \ll T^4$ и вычитаемым в левой части уравнения (14) можно пренебречь. Перепишем это уравнение в виде

$$T^4 \approx C_1 \cdot P, \quad (15)$$

где $C_1 = \frac{\eta}{\sigma S \alpha_T}$.

Логарифмируя уравнение (15) и выражая из него величину $\ln T$, получим

$$\ln T = C_2 + 0,25 \ln P, \quad (16)$$

где $C_2 = 0,25 \ln C_1$.

Из соотношения (16) следует, что график зависимости $\ln T$ от $\ln P$ должен иметь характер, близкий к линейному с угловым коэффициентом, примерно равным 0,25.

Порядок измерений и обработки результатов

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой и измерительными приборами. Определите цену деления вольтметра V_1 и амперметра A в цепи питания лампы L ; научитесь снимать показания этих приборов.

2. Подключите эталонную лампу L к батарее питания B , замкнув тумблер K у основания пирометра.

3. Вращая по часовой стрелке кольцо b потенциометра P_2 на корпусе пирометра, увеличивайте подаваемое на эталонную лампу \mathcal{E} напряжение до тех пор, пока в окуляр не будет видна нить этой лампы (имеющая форму дуги). Если это изображение наблюдается не в красном свете, то введите красный светофильтр $K\Phi$, повернув по часовой стрелке накатанное кольцо на оправе окуляра.

4. Ознакомьтесь с верхней и нижней шкалами пирометра и научитесь снимать их показания.

5. Убедитесь в том, что нейтральный светофильтр $H\Phi$ выведен (при этом рычажок δ на корпусе пирометра должен быть повернут против часовой стрелки до упора). Под руководством преподавателя или лаборанта включите в сеть цепь питания исследуемой лампы L .

6. Запишите в таблицу рекомендуемые значения напряжения U . Действуя потенциометром P_1 и наблюдая за показаниями вольтметра, установите наименьшее из этих значений.

7. Посмотрите в окуляр пирометра и убедитесь в том, что нить лампы L находится в поле зрения.

8. Снимите показания амперметра A и запишите значение силы тока в таблицу.

9. Наблюдая в окуляр пирометра изображения обеих нитей и вращая кольцо b потенциометра P_2 , добейтесь их одинаковой яркости (см. рис. 4). По шкале пирометра определите яркостную температуру нити и занесите ее значение ($^{\circ}C$) в таблицу.

10. Не глядя в окуляр, поверните кольцо b против часовой стрелки, тем самым сбив настройку пирометра.

Номер опыта	U, B	I, A	P, Bm	$\ln P$	$t, ^{\circ}C$	$T_{я}, K$	T, K	$\ln T$
1					$t_1 =$			
					$t_2 =$			
					$t_3 =$			
					$t =$			
2					$t_1 =$			
					$t_2 =$			
					$t_3 =$			
					$t =$			
3					$t_1 =$			
					$t_2 =$			
					$t_3 =$			
					$t =$			
4					$t_1 =$			
					$t_2 =$			
					$t_3 =$			
					$t =$			
5					$t_1 =$			
					$t_2 =$			
					$t_3 =$			
					$t =$			
6					$t_1 =$			
					$t_2 =$			
					$t_3 =$			
					$t =$			

11. Повторите пп. 9 и 10 еще дважды. Рассчитайте и занесите в таблицу среднее из трех значений температуры t . Переведите это значение из градусов Цельсия в градусы Кельвина и заполните следующий столбец таблицы ($T_{я}$).

12. Увеличивая напряжение U на лампе L согласно рекомендациям, выполните пп. 8–11 еще пять раз. Когда показания пирометра будут близки к концу его верхней шкалы, поворотом рычажка 8 по часовой стрелке на 90° введите нейтральный светофильтр $H\Phi$; после этого считывайте показания с нижней шкалы.

13. Для каждого из проделанных опытов рассчитайте по формуле (12) мощность P и величину $\ln P$; занесите найденные значения в соответствующие столбцы таблицы.

14. Используя справочные данные о коэффициенте поглощения вольфрама (см. график, прилож. 1), оцените его среднее в исследованном температурном диапазоне значение α_λ при длине волны $\lambda = 660 \text{ нм}$. Выразив величину λ в метрах, по формуле (8) вычислите константу C (в K^{-1}) и запишите ее в тетрадь.

15. Для каждого опыта рассчитайте по формуле (7) истинную температуру T нити накала лампы L , а также величину $\ln T$. Заполните соответствующие столбцы таблицы.

16. **Нанесите экспериментальные точки на график зависимости $\ln T$ от $\ln P$ и проведите по ним сглаживающую прямую.** Оцените (с учетом масштаба!) угловой коэффициент этой прямой. **Сделайте вывод о применимости закона Стефана – Больцмана для данного объекта исследования.**

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Расскажите о принципе действия яркостного пирометра. Что представляет собой яркостная температура?
2. Что является объектом исследования в данной работе?
3. В каком случае в этой лабораторной работе используют нейтральный светофильтр?
4. Для какой цели строят график зависимости $\ln T$ от $\ln P$?

Темы, выносимые на защиту

1. Пирометры и их назначение.
2. Тепловое излучение и его характеристики.
3. Абсолютно черное тело и его модель. Серое тело.
4. Законы теплового излучения.

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение? Каковы его свойства?
2. Опишите основные характеристики теплового излучения:

- 1) световой поток;
 - 2) энергетическая светимость;
 - 3) спектральная плотность энергетической светимости;
 - 4) поглощающая способность тела;
 - 5) отражающая способность тела.
3. Охарактеризуйте абсолютно черное тело, его модель. Приведите примеры.
4. Что такое серое тело?
 5. Изложите суть закона Кирхгофа.
 6. Каким выражением можно записать закон Стефана – Больцмана?
 7. Каким выражением можно записать закон смещения Вина? Каков график зависимости спектральной плотности излучательной способности от длины волны $r_{\lambda,T}(\lambda)$?
 8. Что означает в законе смещения Вина λ_m ? Что будет происходить с λ_m при увеличении температуры?
 9. Приведите формулу Рэлея – Джинса. Что означает понятие «ультрафиолетовая катастрофа»?
 10. Изобразите графики $r_{\lambda,T}(\lambda)$ и $r_{\nu,T}(\nu)$. В чем их различие?
 11. Как звучит квантовая гипотеза Планка?

Пример вариантов задания для защиты

Работа 5.1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА

Вариант 95

1. Как изменятся результаты лабораторной работы, если измерять температуру АЧТ? Как пройдет график зависимости $\ln T$ от $\ln P$?
2. Что такое излучательность? Каков ее физический смысл? Как ее можно рассчитать, если известна зависимость спектральной плотности излучательности от длины волны?

Работа 5.1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА

Вариант 96

1. Для какой цели в пирометре используется нейтральный светофильтр?
2. Какое тело (серое или *АЧТ*) обладает наибольшей спектральной плотностью излучения, если температура тел одинакова?

*Работа 5.1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА*

Вариант 97

1. Почему рассматриваемый способ измерения температуры является субъективным? Можно ли точно утверждать, что температуры, измеренные двумя независимыми наблюдателями, будут одинаковыми?
2. Как по кривой зависимости спектральной плотности излучательности от длины волны определить излучательность тела? Как сделать это аналитически?

*Работа 5.1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА*

Вариант 98

1. Какова истинная температура нити накаливания исследуемой лампы, если яркостная температура равна 1500° ?
2. Что такое излучательность? Каков ее физический смысл? Как ее можно рассчитать, если известна зависимость спектральной излучательной способности от длины волны?

*Работа 5.1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА*

Вариант 99

1. Для какой цели в пирометре используются объектив и окуляр?
2. Два тела (серое и АЧТ) имеют одинаковые температуры. Яркость какого тела больше?

Лабораторная работа 5.2

Фотоэффект

Цели работы:

- 1) снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) вакуумного фотоэлемента;
- 2) определение работы выхода электронов и красной границы фотоэффекта.

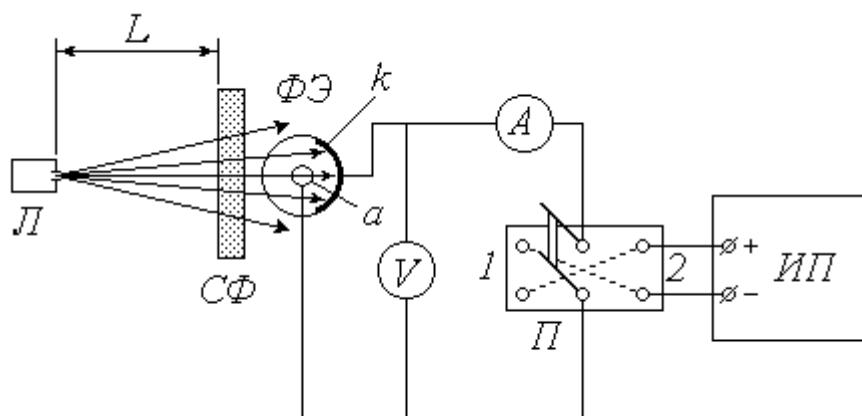


Схема экспериментальной установки

$\Phi Э$ – вакуумный фотоэлемент: k – катод; a – анод;
 $Л$ – источник света; $СФ$ – светофильтр; $ИП$ – источник питания;
 $П$ – переключатель; A – микроамперметр; V – вольтметр

Для выполнения данной работы необходимо иметь **лист миллиметровой бумаги формата А4** и **чертежные принадлежности** (карандаш, линейку).

Описание методики измерений

Для исследования явления внешнего фотоэффекта в данной установке используется вакуумный фотоэлемент $\Phi Э$. Фотоэлемент представляет собой откачанный стеклянный баллон, одна половина которого покрыта тонким слоем светочувствительного вещества k , служащего катодом. В центре баллона располагается анод a , выполненный в виде кольца или шарика. Корпус фотоэлемента снабжен специальным карманом, в который помещают

светофильтр $СФ$. Расходящийся пучок света от источника (лампы $Л$, помещенной в специальный кожух с отверстием и закрепленной на штативе) проходит через светофильтр, благодаря которому на катод падает практически монохроматическое излучение длиной волны λ . Значение λ определяется цветом выбранного светофильтра. Величину светового потока Φ , падающего на катод, можно регулировать, изменяя расстояние L между источником света и фотоэлементом.

Источник питания $ИП$ предназначен для подачи постоянного напряжения U между катодом и анодом; величина U может быть измерена вольтметром V . При замыкании переключателя $П$ в положение I на катод подается отрицательный потенциал, а на анод – положительный. В этом случае выбитые светом электроны (*фотоэлектроны*) устремляются к аноду, по цепи течет ток (*фототок*) I , для измерения которого служит микроамперметр A . Зависимость фототока I от напряжения U называется ВАХ фотоэлемента. Проанализируем вид этой зависимости исходя из теории явления фотоэффекта.

Согласно современным квантовым представлениям, монохроматическую электромагнитную (световую) волну можно рассматривать как поток особых частиц – *фотонов*, энергия каждого из которых ε_ϕ зависит от частоты ν (или от длины волны λ) излучения:

$$\varepsilon_\phi = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

Внутри металла, из которого изготовлен катод k фотоэлемента, имеется большое количество свободных электронов. При падении света на катод определенная часть фотонов взаимодействует с этими электронами, отдавая им свою энергию. Получив дополнительную энергию ε_ϕ , электрон может совершить *работу выхода* A_ϕ и покинуть катод. Величина работы выхода постоянна для данного металла, поэтому фотоэффект (выбивание электрона) возможен только при выполнении условия $\varepsilon_\phi > A_\phi$. С учетом (1) это условие принимает вид

$$\frac{hc}{\lambda} \geq A_\phi$$

и позволяет найти максимальную длину волны $\lambda_{кр}$, при которой еще возможен фотоэффект:

$$\boxed{\lambda_{кр} = \frac{hc}{A_\phi}} \quad (2)$$

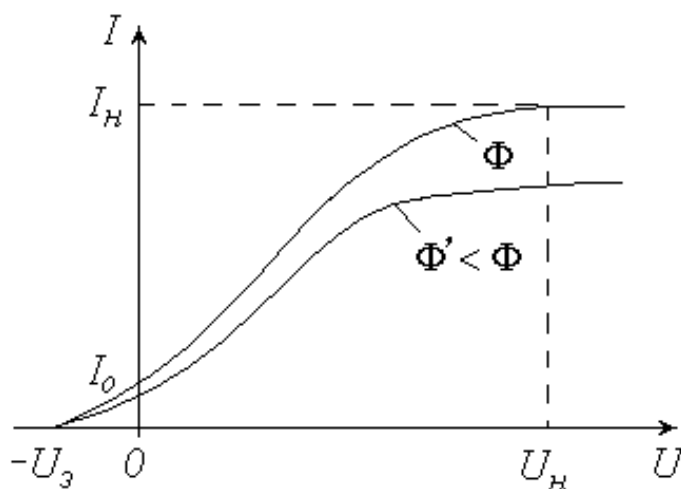
(значение $\lambda_{кр}$ называют *красной границей* фотоэффекта).

Итак, при выполнении сформулированного выше условия электрон может покинуть металл. Разница между энергией фотона и энергией, затраченной на выход, сохраняется в виде кинетической энергии W_k . Максималь-

ной кинетической энергией обладают те электроны, взаимодействие которых с фотонами произошло непосредственно у поверхности металла. Превращение энергии при фотоэффекте описывается известным *уравнением Эйнштейна*

$$\varepsilon_{\phi} = A_{\phi} + (W_k)_{\max} . \quad (3)$$

Множество покинувших катод электронов движутся во всевозможных направлениях, и некоторые из них попадают на анод. Поэтому даже при отсутствии напряжения между катодом и анодом ($U = 0$) в цепи течет малый по величине фототок I_0 (на рисунке показан примерный вид ВАХ фотоэлемента).



Уменьшить фототок I_0 можно путем подачи обратного напряжения («–» на анод, «+» на катод), что осуществляется замыканием переключателя Π в положение 2. Фототок полностью прекратится, если приложенное таким образом электрическое поле будет тормозить («загонять» обратно в катод) самые быстрые электроны. Соответствующее значение *задерживающего* (запирающего) напряжения U_3 можно найти из условия, что работа сил электрического поля при этом полностью затрачивается на «погашение» максимальной кинетической энергии электронов:

$$eU_3 = (W_k)_{\max} , \quad (4)$$

где e – элементарный электрический заряд.

С учетом (4) и (1) уравнение (3) принимает вид

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\phi} + eU_3 ,$$

откуда можно найти работу выхода электронов из металла A_{ϕ} по известным значениям длины волны излучения λ и задерживающего напряжения U_3 :

$$\boxed{A_{\phi} = \frac{hc}{\lambda} - eU_3} . \quad (5)$$

Длина волны излучения λ , как уже отмечалось, определяется цветом используемого светофильтра $СФ$. Для измерения задерживающего напряжения U_z необходимо замкнуть переключатель $П$ в положение 2 и увеличивать подаваемое обратное напряжение до тех пор, пока показания микроамперметра A не обратятся в нуль; соответствующее показание вольтметра V и будет представлять собой величину U_z .

Продолжим анализ характера зависимости $I(U)$. Подача напряжения в прямом направлении («+» на анод, «-» на катод) путем установки переключателя $П$ в положение 1 заставляет фотоэлектроны двигаться к аноду. Увеличение напряжения вовлекает в этот процесс все больше выбитых электронов, вследствие чего ток I возрастает (см. рисунок). При некотором значении $U = U_n$ все фотоэлектроны попадают на анод, и дальнейшее повышение напряжения не приводит к увеличению фототока (наступает *насыщение ВАХ*). Величина фототока насыщения I_n прямо пропорциональна общему числу выбитых электронов, а следовательно, количеству падающих на катод фотонов. Их количество, в свою очередь, определяется величиной светового потока Φ . Таким образом, квантовая теория объясняет один из экспериментально открытых А.Г. Столетовым законов фотоэффекта: фототок насыщения прямо пропорционален освещенности катода. Для проверки справедливости этого закона в данной работе предусмотрено снятие ВАХ при двух значениях светового потока – Φ и $\Phi' < \Phi$ (уменьшение освещенности катода осуществляется путем увеличения расстояния L между источником света и фотоэлементом).

Порядок измерений и обработки результатов

Упражнение 1. Снятие ВАХ фотоэлемента

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой; научитесь пользоваться источником питания и измерительными приборами.
2. Перемещая вдоль оптической скамьи расположенные на ней источник света $Л$ и фотоэлемент $ФЭ$, установите их на заданном (согласно рекомендациям к работе) расстоянии L друг от друга. Значение L запишите в левую часть табл. 1.
3. Замкните переключатель $П$ в положение 1. Источник питания $ИП$ установите на нуль снимаемого напряжения.
4. Поместите в карман на корпусе фотоэлемента светофильтр $СФ$ в соответствии с рекомендациями.
5. Включите в сеть источник питания $ИП$, цифровой вольтметр V и осветитель $Л$.
6. Увеличивая, согласно рекомендациям, подаваемое на фотоэлемент напряжение, заносите показания вольтметра U и микроамперметра I в

табл. 1 до тех пор, пока не будет достигнуто насыщение (при дальнейшем повышении напряжения фототок практически не будет изменяться).

Таблица 1

$L =$ см		$L =$ см	
$U, В$	$I, мкА$	$U, В$	$I, мкА$
	0		0
0		0	
2		2	
4		4	
6		6	
8		8	
10		10	
15		15	
20		20	
25		25	
30		30	
40		40	
50		50	
60		60	
70		70	
80		80	
90		90	
100		100	

7. Измените в соответствии с рекомендациями расстояние L и запишите его значение в правую часть табл. 1. Установите источник питания на нуль.

8. Повторите п. 6.

9. Установите источник питания на нуль снимаемого напряжения. Замокните переключатель в положение 2.

10. Увеличивайте подаваемое на фотоэлемент напряжение до тех пор, пока показания микроамперметра не обратятся в нуль. Занесите в левую и правую части табл. 1 значение задерживающего напряжения U_z (не забудьте указать знак «минус»).

11. По результатам проделанных измерений постройте на одном графике обе ВАХ. Сделайте соответствующие выводы.

Упражнение 2. Определение работы выхода электронов

1. Установите источник питания на нуль снимаемого напряжения. Убедитесь, что переключатель Π находится в положении 2. Поставьте первый из перечисленных в табл. 2 светофильтров.

2. Увеличивайте подаваемое на фотоэлемент напряжение до тех пор, пока показания микроамперметра не обратятся в нуль. Занесите в табл. 2 значение задерживающего напряжения U_z . Уменьшите показания вольтметра до нуля.

Таблица 2

Номер опыта	Свето-фильтр	λ , мкм	U_z , В	A_0 , эВ	ΔA_0 , эВ	$(\Delta A_0)^2$, эВ ²
1	Синий 1	0,43				
2	Синий 2	0,46				
3	Зеленый	0,50				
4	Желтый	0,51				
5	Желто-оранжевый	0,52				
6	Оранжево-красный	0,57				

3. Меняя светофильтры в порядке их перечисления в табл. 2, повторите п. 2.

4. Используя справочные материалы и выражая длину волны λ в метрах, по формуле (5) рассчитайте для каждого опыта работу выхода электрона A_0 . Переведите полученное значение из джоулей в электрон-вольты и занесите его в соответствующий столбец табл. 2.

5. Вычислите сумму значений A_0 и среднее \bar{A}_0 . Выполните все расчеты, необходимые для оценки случайной погрешности измерений работы выхода $\Delta_s A_0$. Найдите величину $\Delta_s A_0$, задаваясь доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

6. Пренебрегая приборными ошибками, запишите окончательный результат определения работы выхода.

7. Используя среднее значение \bar{A}_0 , по формуле (2) найдите длину волны красной границы фотоэффекта $\lambda_{кр}$.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Сформулируйте гипотезу Планка. Что такое квант света?
2. Дайте определение фотоэффекта.
3. Что представляет собой ВАХ вакуумного элемента?

4. Расскажите об устройстве вакуумного фотоэлемента и его назначении.

Темы, выносимые на защиту

1. Квантовая природа света.
2. Законы фотоэффекта.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой фотоны? Опишите их основные характеристики (массу, энергию, импульс).
2. Перечислите виды фотоэффекта. В каких веществах они наблюдаются.
3. Перечислите законы фотоэффекта.
4. Приведите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Каков его физический смысл?
5. Что представляет собой работа выхода электрона из вещества?
6. Объясните понятие «красная граница» фотоэффекта. От чего она зависит?
7. Что такое ток насыщения? Как его можно рассчитать?
8. Назовите и напишите условие возникновения фотоэффекта.
9. Что такое задерживающее (запирающее) напряжение? Как его можно рассчитать?
10. Изобразите ВАХ вакуумного фотоэлемента. Покажите на ней ток насыщения и задерживающее напряжение.
11. Как экспериментально подтверждается квантовый характер взаимодействия света с веществом (опишите любой известный опыт)?
12. Расскажите о том, как и где применяется фотоэффект.

Пример вариантов задания для защиты

Работа 5.1. ФОТОЭФФЕКТ

Вариант 96

1. В чем заключается и как объясняется явление фотоэффекта?
2. Для какого цвета (синего или красного) больше энергия фотона? Подсчитайте эти значения.

Работа 5.1. ФОТОЭФФЕКТ

Вариант 97

1. Объясните, от чего зависит запирающая разность потенциалов U . Как ее определяли в лабораторной работе?
2. Можно ли наблюдать фотоэффект, облучая литий светом с длиной волны $\lambda = 435 \text{ нм}$? Работа выхода электронов с поверхности лития $A = 2,39 \text{ эВ}$.

Работа 5.1. ФОТОЭФФЕКТ

Вариант 98

1. Почему минимальная частота, при которой возможен фотоэффект, называется границей фотоэффекта?
2. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны $\lambda = 520 \text{ нм}$? Масса покоя электрона равна $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Работа 5.1. ФОТОЭФФЕКТ

Вариант 99

1. От чего зависит величина тока насыщения I_n на ВАХ? Можно ли утверждать, что $I_n \sim \Phi$?
2. На металлическую пластинку падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,413 \text{ мкм}$. Задерживающий потенциал $U = 1 \text{ В}$. Чему равна работа выхода электронов для этого металла?

2. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

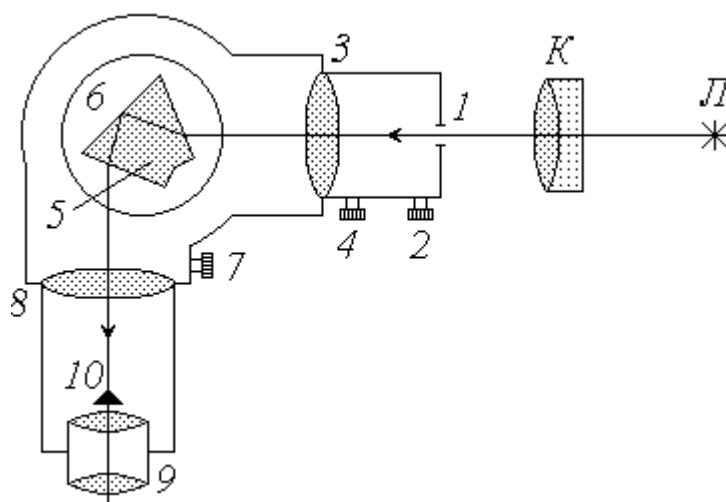
Лабораторная работа 6.1

Изучение оптических спектров испускания. Атом водорода

Цели работы:

- 1) ознакомление с устройством и принципом работы спектроскопа;
- 2) наблюдение линейчатых спектров испускания и градуировка спектроскопа;
- 3) анализ спектра излучения атома водорода на основе теории Бора.

Схема экспериментальной установки



- L – источник света; K – конденсор; 1 – входная щель;
2, 4 – микрометрические винты; 3 – коллиматорный объектив;
5 – призма; 6 – поворотный столик; 7 – отсчетный барабан;
8 – объектив; 9 – окуляр; 10 – указатель

Для выполнения данной работы необходимо иметь лист миллиметровой бумаги формата А3 и чертежные принадлежности (карандаш, линейку).

Описание установки и методики измерений

Разложить немонахроматический свет на спектр можно либо с помощью дифракционной решетки (см. работу 4.2 в «Лабораторном практикуме. Часть 2. Электричество, магнетизм и волновая оптика»), либо с помощью стеклянной призмы, используя явление дисперсии. Получаемые спектры называются соответственно *дифракционными* и *дисперсионными*. В данной работе применяется второй способ. Для наблюдения спектров и измерения длин волн спектральных линий (упражнение 1) используется высокоточный оптический прибор – универсальный монохроматор-спектрометр УМ-2, принципиальная схема которого изображена выше.

Расходящийся пучок света от источника (лампы) L собирается конденсором K и попадает на входную щель 1 монохроматора, ширина которой регулируется микрометрическим винтом 2 . Дальнейшая фокусировка пучка осуществляется в объективе 3 с помощью микрометрического винта 4 . При прохождении света через сложную стеклянную призму 5 (склеенную из трех треугольных призм) лучи различных длин волн преломляются вследствие дисперсии под разными углами. Поворотный столик 6 , на котором закреплена призма, может вращаться при помощи микрометрического винта 7 с отсчетным барабаном. При этом в объектив 8 и окуляр 9 (следовательно, и в поле зрения наблюдателя) попадают различные участки спектра. Объектив 8 совмещает в своей фокальной плоскости изображение входной щели и указатель 10 . Для того чтобы снять с барабана отсчет, соответствующий определенной линии спектра, ее необходимо совместить с указателем.

Дисперсионные спектры, в отличие от дифракционных, нелинейны: показания прибора (отсчет по шкале N) не связаны с длиной волны λ прямо пропорциональной зависимостью. Поэтому спектроскоп нуждается в предварительной градуировке. Для градуировки используется ртутная лампа (длины волн спектра ртути известны). Наблюдая в спектроскоп спектр ртути, снимают отсчеты, соответствующие отдельным линиям, а затем строят график зависимости отсчета N от длины волны λ . Этот градуировочный график позволяет потом определять неизвестные значения длин волн спектра исследуемого вещества по снимаемым показаниям данного прибора (в упражнении 1 исследуемым источником света является неоновая лампа).

Кроме спектроскопов, дающих возможность изучать спектры путем их непосредственного наблюдения, существует еще одна разновидность спектральных приборов – спектрографы, с помощью которых получают фотографии спектров на фоне шкалы прибора. В прилож. 4 приведены спектрограммы ртути и водорода. Для ртути даны две фотографии, сделанные с различной выдержкой, чтобы четко определить положение линий различной интенсивности, а также указаны соответствующие значения длин волн (как и в упражнении 1, спектр ртути используется для градуировки шкалы спектрографа). На спектрограмме водорода даны лишь порядковые номера

линий. Соответствующие длины волн необходимо определить по градуировочному графику. Так как водород «загрязнен» различными примесями, следует выделить в его спектре линии, принадлежащие чистому водороду. Для этого используется теория: значения этих длин волн должны быть близки к теоретическим, определяемым *формулой Бальмера*.

Как известно, атомы вещества излучают электромагнитные волны в оптическом диапазоне при переходе электронов внешних оболочек с более высоких энергетических уровней на более низкие. Так как при каждом конкретном переходе энергия атома уменьшается на строго определенную величину ΔW , длина волны излучаемого при этом фотона также имеет строго определенное значение $\lambda = \frac{hc}{\varepsilon_\phi} = \frac{hc}{\Delta W}$ (см. формулу (1) лабораторной ра-

боты 5.2). Поэтому спектр испускания атома имеет *линейчатый* характер, т.е. представляет собой совокупность отдельных цветных полос (в отличие от *сплошного* спектра, в котором цвета постепенно переходят один в другой).

Наиболее детально изучен спектр самого простого атома – водорода. Длина волны фотона, излучаемого при переходе электрона с k -го на n -й энергетический уровень, определяется обобщенной формулой Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (1)$$

где R – постоянная Ридберга.

Расчет показывает, что при $n = 1$ значения длин волн лежат в пределах от 0,091 до 0,122 мкм, т.е. в ультрафиолетовом диапазоне; соответствующие линии спектра образуют невидимую для человеческого глаза *серию Лаймана*. При $n > 2$ длины волн испускаемых фотонов соответствуют инфракрасному излучению ($\lambda > 0,820$ мкм) и образуют *серии Пашена* ($n = 3$), *Брэкетта* ($n = 4$), *Пфунда* ($n = 5$) и т.д. Только при переходах электрона на второй энергетический уровень излучаются фотоны видимого света – *серия Бальмера*. Положив в (1) $n = 2$, преобразуем формулу Бальмера к виду

$$\lambda = \frac{\Lambda}{1 - \frac{4}{k^2}}, \quad (2)$$

где

$$\Lambda = \frac{4}{R}. \quad (3)$$

Порядок измерений и обработки результатов

Упражнение 1. Градуировка спектроскопа

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой.

2. Включите **ртутную** лампу. Установите лампу L и конденсор K в такое положение, при котором светлое пятно от источника падает на центр входной щели 1 (источник света рекомендуется устанавливать на расстоянии 40–50 см от щели, а конденсор – примерно в 10–15 см от источника). При этом входная щель должна быть закрыта специальным колпачком.

3. С помощью микрометрического винта 2 установите ширину входной щели в пределах от 0,02 до 0,05 мм.

4. Вращая барабан 7, просмотрите в окуляр 9 весь спектр ртути. Научитесь снимать показания отсчетного барабана N по отдельным линиям спектра.

5. Проведите градуировку спектро스코па по наиболее ярким из наблюдаемых в видимой части спектра линиям, перечисленным в табл. 1. Для получения более точных результатов отсчет по каждой линии снимите трижды (сбивая настройку прибора) с последующим осреднением. Значения N_1 , N_2 , N_3 и N (среднее из трех) занесите в таблицу.

Таблица 1

Цвет линии	Длина волны λ , нм	Отсчет по шкале			
		N_1	N_2	N_3	N
Фиолетовая 1	404,7				
Фиолетовая 2	407,8				
Синяя	435,8				
Зелено-голубая	491,6				
Зеленая	546,1				
Желтая 1	577,0				
Желтая 2	579,1				
Оранжевая 1	607,3				
Оранжевая 2	612,3				
Красная	623,4				

6. По данным заполненной табл. 1 постройте в крупном масштабе на миллиметровой бумаге формата А3 градуировочный график – зависимость отсчета по шкале N от длины волны λ .

7. Поменяйте ртутную лампу на новый источник света – **гелиевую** или **неоновую** лампу. При необходимости проведите повторную настройку прибора (пп. 2, 3).

8. Выберите до пяти наиболее ярких линий в спектре гелия или неона. Для каждой линии трижды снимите отсчет по шкале барабана 7. Результаты измерений N_1 , N_2 , N_3 и N (среднее из трех) занесите в табл. 2.

Таблица 2

Цвет линии	Отсчет по шкале				λ , нм (по гра- фику)	λ , нм (см. табл. 8, прилож. 1)
	N_1	N_2	N_3	N		

9. Используя построенный ранее градуировочный график, определите длины волн выбранных линий исследуемого спектра и занесите найденные значения в предпоследний столбец табл. 2.

10. Сравните результаты исследования спектра неона с табличными данными (см. справочные материалы в прилож. 1). Наиболее близкие к полученным значениям табличные длины волн занесите в последний столбец табл. 2.

Упражнение 2. Изучение спектра атома водорода

1. Используя спектрограмму ртути (см. прилож. 4), занесите в левую часть табл. 3 длины волн линий и соответствующие отсчеты по шкале прибора.

2. По результатам измерений постройте градуировочный график спектрографа (зависимость отсчета N от длины волны λ) в крупном масштабе на миллиметровой бумаге формата А3.

3. Со спектрограммы водорода снимите отсчеты, соответствующие всем пронумерованным линиям; результаты занесите в табл. 4.

4. С помощью градуировочного графика определите длины волн спектра «загрязненного» водорода. Значения λ занесите в соответствующий (предпоследний) столбец табл. 4.

5. Используя справочные материалы, по формуле (3) вычислите константу A .

6. Задаваясь различными значениями k ($k = 3; 4; 5; \dots$), рассчитайте по формуле (2) истинные значения длин волн видимой серии спектра излучения атома водорода. Результаты расчетов занесите в табл. 4 **напротив наиболее близких к ним значений длин волн, найденных по графику** (разница может составлять ± 5 нм, но все рассчитанные длины волн должны быть найдены 1 раз).

Таблица 3

Номер линии	λ , нм	Отсчет N
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

Таблица 4

Номер линии	Отсчет N	λ , нм (по графику)	λ , нм (расчет)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

7. Напротив остальных длин волн предпоследнего столбца табл. 4 поставьте в последнем столбце прочерк, так как эти линии принадлежат атомам примеси.

8. По найденным длинам волн линий, не принадлежащих водороду, следует определить по таблице длин волн спектров различных элементов (см. справочные материалы в прилож. 1), какой элемент является примесью к водороду (все длины волн принадлежат одному элементу, который есть в таблице).

9. Сделайте выводы по работе: «На фотографии изображен спектр водорода с примесью «_____» (впишите название примеси).

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Какой свет является немонахроматическим?
2. Укажите способы разложения немонахроматического света в спектр.
3. Каковы устройство и принцип действия спектроскопа?
4. Как и для каких целей производят градуировку спектроскопа?
5. Чем отличаются дисперсионные спектры от дифракционных?

Темы, выносимые на защиту

1. Модели атома Томсона и Резерфорда.
2. Теория атома водорода по Бору.
3. Обобщенная формула Бальмера.
4. Основные серии в спектре атома водорода.

Контрольные вопросы

1. Опишите модели атома Томсона и Резерфорда. Укажите достоинства и недостатки этих моделей.
2. Почему спектр атома водорода является самым изученным по сравнению с другими веществами?
3. Запишите обобщенную формулу Бальмера для длины волны и для частоты излучения.
4. Какие серии в спектре атома водорода вы можете назвать? Чем эти серии отличаются друг от друга?
5. Сформулируйте постулаты Бора.
6. Какой спектр у атома водорода? Почему?
7. Что называют стационарным состоянием атома?

8. Приведите расчеты первой боровской орбиты атома водорода (способ расчета, численное значение).

9. Какое состояние атома называют основным, а какое – возбужденным? В каком из этих случаев атом обладает своей максимальной или минимальной энергией?

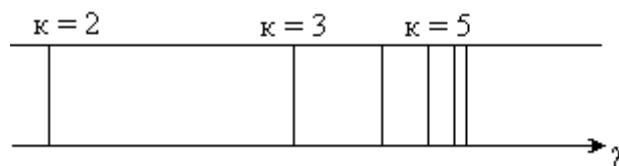
10. Перечислите достоинства и недостатки теории Бора.

Пример вариантов задания для защиты

Работа 6.1. АТОМ ВОДОРОДА

Вариант 98

1. В чем заключается градуировка спектроскопа?
2. Электрон в атоме водорода, согласно теории Бора, может иметь любую скорость. Так ли это?
3. Правильно ли изображена на рисунке спектрограмма излучения атома водорода?



Здесь λ – длина волны; n – номер орбиты, с которой переходит электрон в невозбужденное состояние.

Работа 6.1. АТОМ ВОДОРОДА

Вариант 99

1. С чем связана различная интенсивность линий спектра?
2. Почему, если использовать модель атома Резерфорда, то законами классической физики нельзя объяснить линейчатый спектр излучения атомов?
3. Можно ли рассчитать частоту излучения атома водорода, соответствующую переходу электрона с третьего уровня на второй по формуле

$$\nu = \frac{5}{36} cR, \text{ где } c - \text{ скорость света; } R - \text{ постоянная Ридберга?}$$

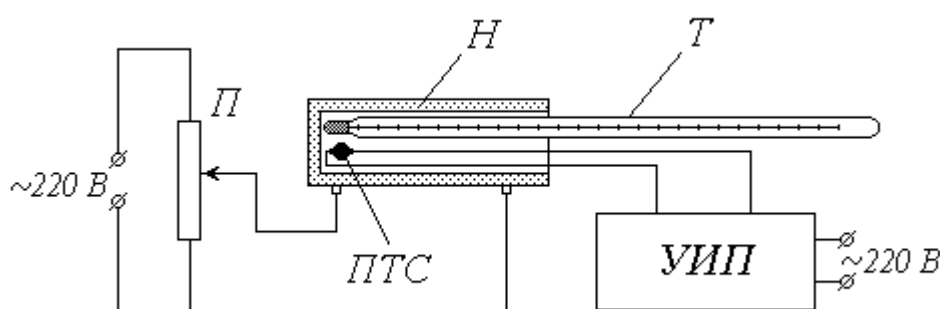
Лабораторная работа 6.2

Определение энергии активации полупроводника

Цели работы:

- 1) изучение температурной зависимости сопротивления полупроводника;
- 2) экспериментальное определение энергии активации.

Схема экспериментальной установки



Π – потенциометр; H – нагреватель; T – термометр;
 ПТС – полупроводниковое термосопротивление (термистор);
 УИП – универсальный измерительный прибор

Для выполнения данной работы необходимо иметь **лист миллиметровой бумаги формата А5** и **чертежные принадлежности** (карандаш, линейку).

Описание установки и методики измерений

Объектом исследования в данной работе является полупроводниковое термосопротивление ПТС , иначе называемое *термистором*, оно вместе со ртутным термометром T помещено в нагреватель H , питание которого осуществляется от сети переменного тока через потенциометр Π . Для измерения сопротивления термистора служит универсальный цифровой измерительный прибор УИП , также питающийся от сети; термометр позволяет контролировать температуру в зоне нагрева.

При повышении температуры полупроводника электроны, «задействованные» в ковалентных связях между атомами кристаллической решетки, получают дополнительную энергию и могут перейти в свободное состояние, т.е. стать носителями заряда и участвовать в проводимости. Минимально необходимая для этого энергия ΔW называется *энергией активации* полупроводника.

В чистых полупроводниках, состоящих из атомов одного химического элемента, электроны переходят из *валентной зоны ВЗ* (рис. 1) в *свободную зону СЗ* (ко-

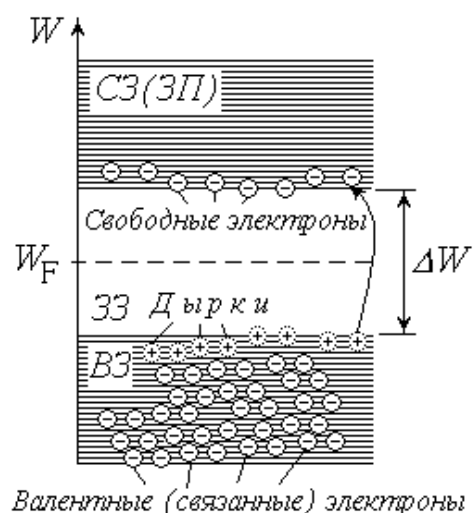


Рис. 1

торая в этом случае становится *зоной проводимости ЗП*). При этом электроны должны преодолеть энергетический барьер ΔW , равный ширине *запрещенной зоны ЗЗ*. Освободившаяся «вакансия» в ковалентной связи – так называемая *дырка* – может быть занята электроном из соседней связи и т.д. Под действием электрического поля дырка будет вести себя как положительный носитель заряда и также участвовать в проводимости. Таким образом, в чистом полупроводнике проводимость в равной степени осуществляется как отрицательными носителями (свободными электронами), так и положительными (дырками). Из приведенных выше рассуждений следует, что концентрации свободных электронов n_e в свободной зоне и дырок n_d в валентной зоне в таком полупроводнике одинаковы: $n_e = n_d$.

Как известно, внутри кристалла концентрация электронов, обладающих энергией W , определяется на основе распределения Ферми – Дирака:

$$n(W) \sim \left[\exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где W_F – энергия Ферми; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

В чистых полупроводниках уровень Ферми W_F расположен посередине запрещенной зоны ЗЗ (см. рис. 1); поэтому для электронов, перешедших в зону проводимости, разность $W - W_F = \frac{1}{2} \Delta W$. При температурах до 1000 K произведение kT не превышает 0,1 эВ, в то время как ширина запрещенной зоны составляет несколько десятых эВ, следовательно, единицей в квадратных скобках выражения (1) можно пренебречь (по сравнению с экспоненциальным слагаемым) и распределение Ферми переходит в классическое распределение *Больцмана*:

$$n_e \sim \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right). \quad (2)$$

Так как электропроводность вещества σ прямо пропорциональна концентрации носителей заряда ($\sigma \sim n$), а его электрическое сопротивление R в свою очередь обратно пропорционально электропроводности ($R \sim \frac{1}{\sigma}$), с учетом (2) можно представить температурную зависимость сопротивления полупроводника в виде

$$R = R_{\infty} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (3)$$

где величина R_{∞} характеризует сопротивление при бесконечно высокой температуре.

Аналогичные закономерности справедливы и для *примесной* проводимости полупроводников. В полупроводниках *n*-типа валентность примеси (*донора*) на единицу превышает валентность основного вещества. Поэтому «лишние» валентные электроны особенно легко переходят в свободное состояние без образования дырки в валентной зоне (рис. 2а).

Для таких полупроводников $n_d \gg n_0$ (электроны являются *основными*, а дырки – *неосновными* носителями). Уровни донорной примеси располагаются вблизи «дна» свободной зоны, и энергия активации примеси ΔW значительно меньше ширины запрещенной зоны.

В полупроводниках *p*-типа валентность примеси (*акцептора*) на единицу меньше, чем у атомов основного вещества. «Лишняя» вакансия в ковалентной связи атома примеси легко превращается в дырку без предварительного перехода электронов в свободную зону (рис. 2б); в таких полупроводниках основными носителями являются дырки, а неосновными – свободные электроны ($n_d \ll n_0$). Уровни акцепторной примеси лежат вблизи «потолка» валентной зоны, которая становится зоной проводимости (энергия активации ΔW при этом также меньше ширины запрещенной зоны).

При высоких температурах практически все донорные уровни освобождаются, а акцепторные – занимаются электронами; таким образом, исчерпывается механизм примесной проводимости. Дальнейшее повышение температуры все больше способствует переходам электронов из валентной зоны в свободную, как это имеет место в чистых полупроводниках (*собственная* проводимость).

Итак, на сопротивление полупроводников весьма существенно влияет, независимо от наличия и характера примеси, их температура. Зависимость $R(T)$ принято характеризовать *термическим коэффициентом* сопротивления α , представляющим собой относительное изменение сопротивления при изменении температуры на 1 K:

$$\alpha = \frac{dR}{R \cdot dT}. \quad (4)$$

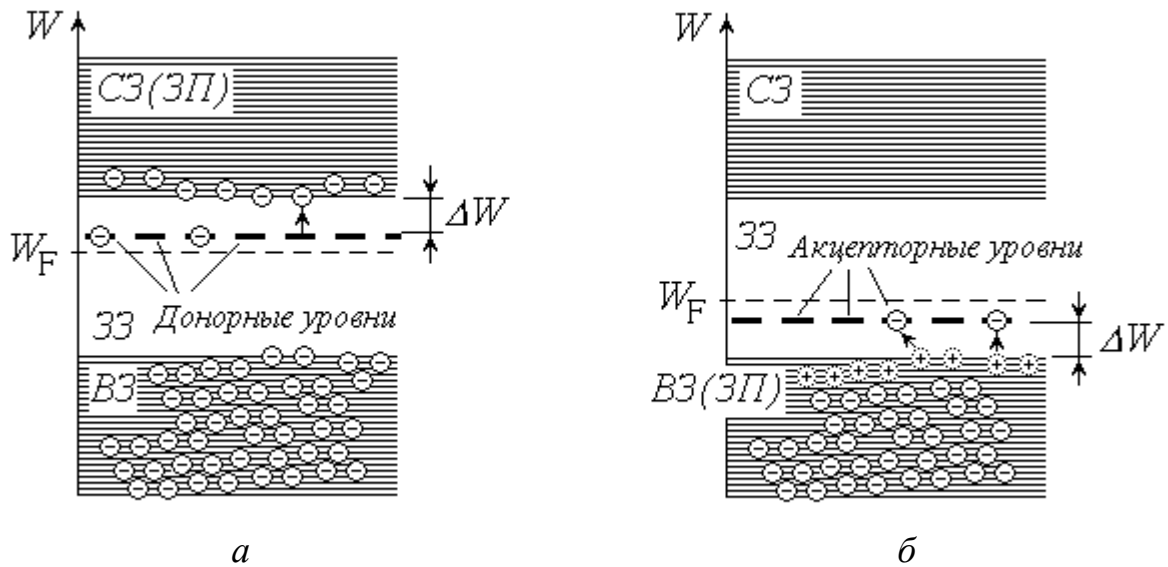


Рис. 2: а – донорная проводимость; б – акцепторная

Подставляя в (4) зависимость (3), получим

$$\alpha = -\frac{\Delta W}{2kT^2}.$$

Таким образом, в отличие от металла, у полупроводника термический коэффициент сопротивления, во-первых, отрицателен, во-вторых, не является постоянным (зависит от температуры). Это говорит о том, что сопротивление полупроводника уменьшается с ростом температуры, причем не по линейному закону.

Сам факт явно выраженной температурной зависимости сопротивления позволяет использовать ПТС в качестве датчика температуры, т.е. определять его температуру по измеренному сопротивлению. Это можно сделать либо с помощью градуировочного графика зависимости $R(T)$, либо по известным параметрам этой зависимости (значениям R_∞ и ΔW). Определение этих параметров является одной из целей данной лабораторной работы.

Для линеаризации зависимости (3) прологарифмируем ее:

$$\ln R = \ln R_\infty + \frac{\Delta W}{2kT}$$

и введем обозначения:

$$\ln R_\infty = b; \quad \frac{\Delta W}{2k} = K, \quad (5)$$

после чего получим

$$\ln R = K \cdot \frac{1}{T} + b.$$

Таким образом, величины $\ln R$ и $\frac{1}{T}$ связаны между собой линейной зависимостью. Измерив сопротивление полупроводника при различных

значениях температуры, можно найти коэффициенты K и b этой зависимости либо графическим способом, либо методом наименьших квадратов. После этого параметры исходной зависимости (3) легко определить, используя выражения (5):

$$R_{\infty} = \exp(b) ; \quad (6)$$

$$\Delta W = 2kK . \quad (7)$$

Порядок измерений и обработки результатов

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой. Определите цену деления шкалы термометра и снимите с нее начальное показание t . Результат ($^{\circ}\text{C}$) занесите в первую строку таблицы.

Номер опыта	$t, ^{\circ}\text{C}$	$R, \text{Ом}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$\ln R$	$\ln R/T, \text{K}^{-1}$	$(1/T)^2, \text{K}^{-2}$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
$\Sigma =$							

2. Подсоединив выводы *ПТС* к измерительному прибору, включите последний в сеть. Установив нужный предел измерения, найдите сопротивление термистора и запишите его в таблицу.

3. Поместите *ПТС* и термометр в нагреватель. Включите в сеть цепь питания нагревателя H (движок потенциометра P без необходимости не перемещайте).

4. Следите за показаниями термометра (температура должна медленно повышаться). Через каждые 5° (согласно рекомендациям) снимайте показания прибора *УИИП*; значения температуры t и сопротивления R заносите в таблицу. Общее количество измерений n должно быть не менее семи.

5. Выключите из сети нагреватель и измерительный прибор.

6. Переведите значения температуры в кельвины и заполните столбец « T, K » таблицы.

7. Вычислите значения $1/T$ и $\ln R$ и также занесите их в таблицу.

8. Нанесите экспериментально полученные точки на график зависимости $\ln R$ от $1/T$.

9. Определите коэффициенты K и b этой зависимости либо путем обработки графика, либо методом наименьших квадратов (в последнем случае заполните два крайних правых столбца таблицы и ее нижнюю строку сумм).

10. По формулам (6) и (7) вычислите параметры R_∞ и ΔW зависимости сопротивления полупроводника от температуры. Значение энергии активации ΔW выразите в электрон-вольтах и сравните полученный результат с положениями зонной теории.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Изобразите и опишите принцип действия экспериментальной установки.
2. Что называется энергией активации?
3. Какое вещество называют полупроводником?

Темы, выносимые на защиту

1. Зонная теория твердого тела.
2. Проводимость и сопротивление полупроводников.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается зонная теория твердого тела?
2. Опишите металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории?
3. Охарактеризуйте валентную, запрещенную и свободную зоны в кристаллах.
4. Что называют уровнем Ферми? Где располагается этот уровень?
5. Расскажите о распределении Ферми – Дирака. Как с его помощью получить зависимость концентрации электронов в полупроводнике от температуры?
6. Что такое проводимость и сопротивление вещества? Какая связь существует между ними?
7. Что такое собственная проводимость полупроводников? Чем отличается собственная проводимость и примесной?
8. Как выглядят температурные зависимости проводимости и сопротивления для чистого полупроводника?
9. Что представляет собой температурный коэффициент сопротивления?

Пример вариантов задания для защиты

Работа 6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА

Вариант 98

1. Число свободных электронов в полупроводниковом термосопротивлении при нормальной температуре равно 210^{13} . Можно ли сказать, что чистый полупроводник содержит такое же число дырок?
2. Чему равна ширина запрещенной зоны полупроводникового термосопротивления в электрон-вольтах (эВ) по результатам лабораторной работы? Можно ли по величине ΔE определить, к какому типу (диэлектрику, полупроводнику, металлу) относится данное вещество? Как соотносятся между собой по ширине запрещенной зоны диэлектрики и полупроводники? Ответ поясните с помощью энергетической диаграммы.

Работа 6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА

Вариант 99

1. Объясните, почему характер зависимости сопротивления полупроводника от температуры является нелинейным. Какая величина называется температурной чувствительностью? Как она определяется в работе и что собой характеризует?
2. По результатам лабораторной работы найдите, как и во сколько раз изменится количество носителей заряда в единице объема полупроводника при изменении его температуры от 30 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

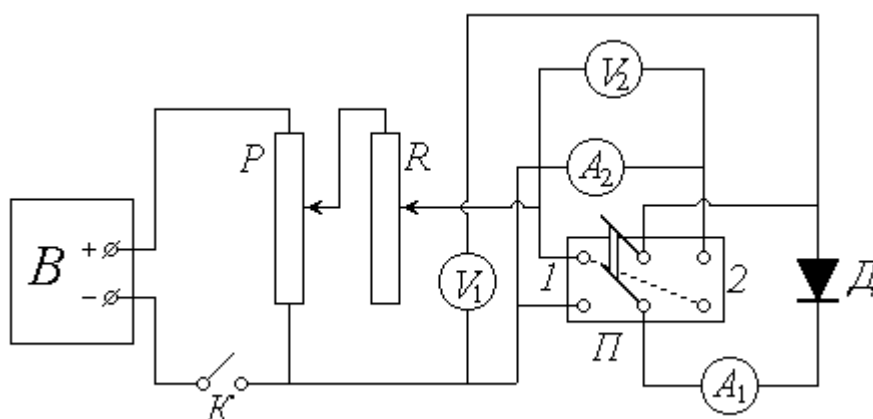
Лабораторная работа 6.3

Снятие вольт-амперной характеристики полупроводникового диода

Цели работы:

- 1) изучение контактных явлений в полупроводниках;
- 2) снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) p – n -перехода.

Схема экспериментальной установки



D – полупроводниковый диод; V_1 и V_2 – вольтметры;
 A_1 – миллиамперметр; A_2 – микроамперметр; Π – переключатель;
 P – потенциометр; R – реостат; B – выпрямитель; K – ключ

Для выполнения данной работы необходимо иметь лист миллиметровой бумаги формата А4 и чертежные принадлежности (карандаш, линейку).

Описание установки и методики измерений

На полупроводниковый диод D через переключатель Π подается постоянное напряжение от выпрямителя B . Цепь питания замыкается ключом K ; потенциометр P и реостат R позволяют регулировать подаваемое на диод напряжение. При установке переключателя Π в положение 1 диод включен в *прямом* направлении; для измерения прямого напряжения служит вольтметр V_1 , а силы тока через диод – миллиамперметр A_1 . При *обратном* включении (положение 2 переключателя) соответствующие величины измеряются вольтметром V_2 и микроамперметром A_2 .

Полупроводниковый диод представляет собой спай двух полупроводников с различным типом проводимости. Поверхность контакта полупроводника p -типа (дырочная проводимость) с полупроводником n -типа (электронная проводимость) образует так называемый p - n -переход, схематически изображенный на рис. 1. Рассмотрим подробнее явления, происходящие вблизи этой поверхности.

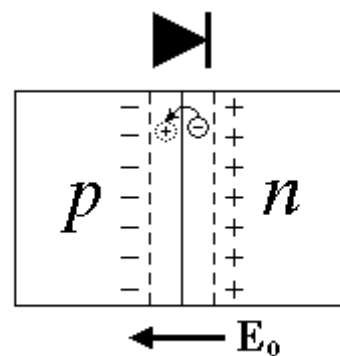


Рис. 1

Из n -области с высокой концентрацией свободных электронов происходит их диффузия в p -область, где эта концентрация очень мала. Имеющиеся там в избытке дырки легко «захватывают» пришедшие свободные электроны (т.е. эти электроны занимают вакантные места в ковалентных связях между атомами кристалла и тем самым перестают быть свободными). Таким образом, происходит *рекомбинация* – попарное исчезновение положительного (дырки) и отрицательного (свободного электрона) носителей заряда. Рекомбинация приводит к тому, что с обеих сторон поверхности раздела образуется тонкий слой, лишенный основных носителей заряда и поэтому близкий по свойствам к диэлектрику. Кроме того, уход электронов из n -области обуславливает возникновение там избыточного положительного заряда, а их появление в p -области – появление нескомпенсированного отрицательного заряда. Следовательно, p - n -переход можно уподобить микроскопическому заряженному конденсатору, который создает внутреннее электрическое поле напряженностью E_0 . Направленность этого поля препятствует дальнейшему перемещению основных носителей через p - n -переход.

Если к переходу приложить обратное напряжение, т.е. «+» к n -области, а «-» – к p -области, то внешнее поле будет сонаправлено с внутренним и высота потенциального барьера для основных носителей увеличится. Через диод будет протекать очень малый по величине обратный ток, обусловленный движением малочисленных неосновных носителей. Обратный ток $I_{обр}$ слабо зависит от приложенного напряжения $U_{обр}$; однако при некотором его значении U' наступает пробой, аналогичный пробоем диэлектрика, и ток резко возрастает. На рис. 2 показан примерный вид ВАХ полупроводникового диода; ее ход при обратном включении изображен в левом нижнем квадранте.

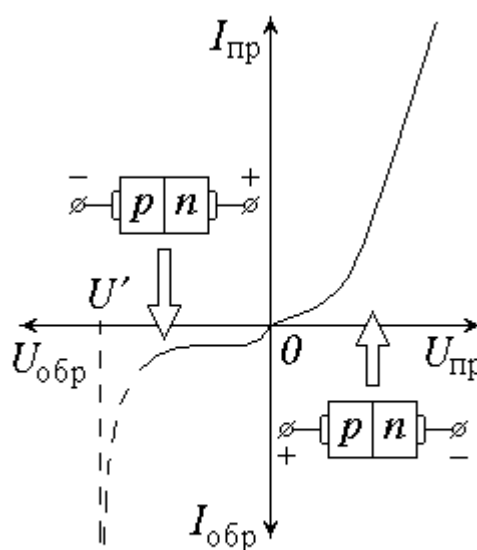


Рис. 2

Прямое включение диода («+» к p -области, «-» – к n -области) создает внешнее поле, направленное противоположно внутреннему. При этом высота потенциального барьера уменьшается, что благоприятствует движению основных носителей заряда через p – n -переход. С увеличением прямого напряжения U_{np} сопротивление перехода уменьшается, и прямой ток I_{np} быстро возрастает. Прямая ветвь ВАХ показана в правом верхнем квадранте (масштабы графиков для разных ветвей кривой по обеим осям различны между собой).

Свойство полупроводникового диода работать в «запорном» и «пропускном» режимах (в зависимости от направления приложенного к нему внешнего напряжения) позволяет использовать эти устройства для выпрямления переменного тока. При подаче синусоидального напряжения диод пропускает ток в течение одной половины периода и практически не пропускает во второй. Такое выпрямление получило название *одно-полупериодного*.

Порядок измерений и обработки результатов

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой. Определите цену деления измерительных приборов: вольтметров V_1 и V_2 , миллиамперметра A_1 и микроамперметра A_2 . Научитесь снимать их показания.

2. Установите потенциометр P на нуль снимаемого напряжения, реостат R введите полностью.

3. Установите переключатель Π в положение 1 (прямое включение диода). Замкните ключ K .

4. Руководствуясь рекомендациями, с помощью потенциометра и реостата постепенно повышайте подаваемое на диод и показываемое вольтметром V_1 напряжение U_{np} ; значение U_{np} и прямого тока I_{np} (показания миллиамперметра A_1) записывайте в левую часть таблицы.

5. Повторите п. 2, после чего установите переключатель Π в положение 2 (обратное включение).

6. Действуя потенциометром и реостатом, постепенно повышайте (в соответствии с рекомендациями) обратное напряжение $U_{обр}$, фиксируя обратный ток $I_{обр}$. Значения этих величин (показания вольтметра V_2 и микроамперметра A_2) заносите в правую часть таблицы.

7. По окончании измерений повторите п. 2 и разомкните ключ K .

8. По результатам проведенных измерений постройте на одном графике, но в разных масштабах ВАХ для прямого и обратного включений диода (см. рис. 2). Сделайте выводы.

Прямое включение			Обратное включение		
Номер опыта	$U_{np}, В$	$I_{np}, мА$	Номер опыта	$U_{обр}, В$	$I_{обр}, мкА$
1			1		
2			2		
3			3		
4			4		
5			5		
6			6		
7			7		
8			8		
9			9		
10			10		

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Что представляет собой полупроводниковый диод?
2. Что такое ВАХ?

Темы, выносимые на защиту

1. Устройство и принцип действия полупроводникового диода.
2. Примесная проводимость полупроводников.
3. $p - n$ -переход.

Контрольные вопросы

1. Какой полупроводник называется примесным?
2. Где располагаются уровни примесной проводимости на зонной диаграмме?
3. Что представляют собой полупроводники n -типа?
4. Что представляют собой полупроводники p -типа?
5. Какие явления и процессы происходят на границе контакта полупроводников с различным типом проводимости?
6. Как влияют примеси на расположение уровня Ферми?
7. Чем определяется проводимость примесного полупроводника?
8. Расскажите о практическом применении полупроводникового диода.

Пример вариантов задания для защиты

Работа 6.3. С Н Я Т И Е В А Х П О Л У П Р О В О Д Н И К О В О Г О Д И О Д А

Вариант 97

1. Рассчитайте сопротивление p – n -перехода при $U = 1 \text{ В}$ для прямого и обратного тока по результатам работы 6.3. Объясните различие полученных результатов.
2. 1. Как получают полупроводники p -типа? Изобразите диаграмму энергетических зон, характерную для полупроводников с указанным типом проводимости. Можно ли создать полупроводники p -типа, добавив к кристаллу кремния примеси атомов фосфора? Если нет, то какой элемент можно использовать в качестве примеси?

Работа 6.3. С Н Я Т И Е В А Х П О Л У П Р О В О Д Н И К О В О Г О Д И О Д А

Вариант 98

1. Как изменятся результаты лабораторной работы, если вместо одного полупроводникового диода использовать два, соединенных параллельно?
2. Почему при наличии контактной разности потенциалов на границе раздела полупроводников с различным типом проводимости в полупроводниковом диоде не протекает ток, если внешняя приложенная к диоду разность потенциалов отсутствует?

Работа 6.3. С Н Я Т И Е В А Х П О Л У П Р О В О Д Н И К О В О Г О Д И О Д А

Вариант 99

1. С какой целью используют полупроводниковый диод на практике?
2. Почему прямой и обратный токи в полупроводниковом диоде значительно отличаются по величине?

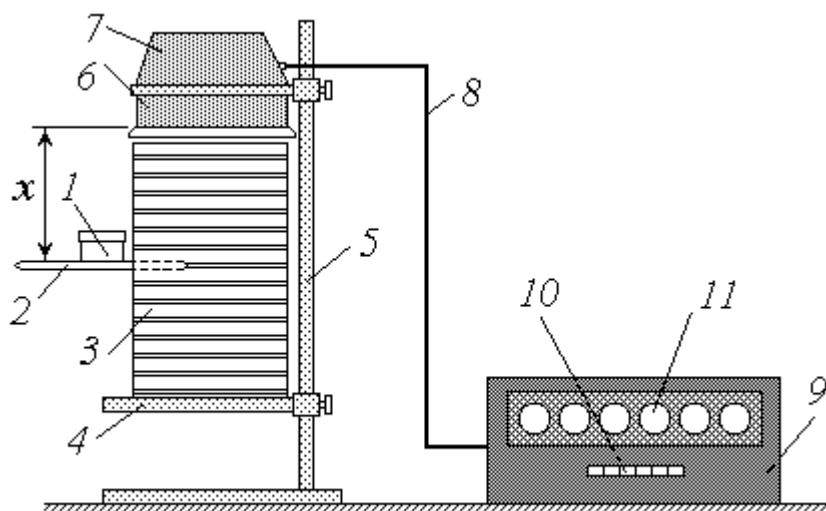
Лабораторная работа 6.4

Радиоактивность. Поглощение β -излучения в воздухе

Цели работы:

- 1) практическое ознакомление с одним из методов регистрации радиоактивного излучения;
- 2) экспериментальное определение линейного коэффициента поглощения β -излучения в воздухе, а также активности радиоактивного препарата.

Схема экспериментальной установки



1 – контейнер; 2 – полка; 3 – этажерка; 4 – столик; 5 – штатив;
6 – газоразрядный счетчик; 7 – электронный блок; 8 – кабель;
9 – счетный прибор; 10 – кнопочные переключатели; 11 – декатроны

Для выполнения данной работы необходимо иметь лист миллиметровой бумаги формата А4 и чертежные принадлежности (карандаш, линейку).

Описание установки и методики измерений

Объектом исследования в данной работе является β -радиоактивный препарат стронция $^{90}_{38}\text{Sr}$, помещенный в контейнер 1, в крышке которого имеется отверстие (рис. 1). В процессе измерений контейнер размещается на полке 2, которую можно вставить в один из пазов этажерки 3 (пазы расположены на расстоянии 1 см друг от друга). Этажерка установлена на столике 4, закрепленном на штативе 5.

Для регистрации β -излучения используется комплект электронной аппаратуры РПС2-03А, который включает в себя блок БДПС-2 и счетный одноканальный прибор ПС02-08А. Блок БДПС-2 закреплен на том же штативе 5 и состоит из газоразрядного счетчика 6 и электронного блока 7. Кабель 8 соединяет этот блок со счетным прибором 9. Для управления режимом работы последнего служит кнопочный переключатель 10, а для считывания показаний прибора – индикаторные лампы шести декатронов 11.

Радиоактивный препарат в небольшом количестве находится на дне контейнера 1. В дальнейшем будем считать препарат точечной массой, сосредоточенной в центре дна. Количество распадающихся за единицу времени ядер изотопа называется его *активностью* a . Так как при каждом распаде испускается одна β -частица, то количество частиц, излучаемых препаратом за единицу времени во всех направлениях, также равно a .

Металлический корпус контейнера не пропускает β -излучение, поэтому наружу могут выйти и быть зарегистрированными счетчиком 6 лишь те частицы, которые пролетают через отверстие в крышке контейнера. Поскольку все направления движения частиц равновероятны, количество пролетающих через отверстие можно найти из следующей пропорции: во всех направлениях, т.е. в пределах полного телесного угла 4π , за единицу времени вылетает a частиц; в направлении отверстия, т.е. в пределах телесного угла Ω (см. рис. 1), вылетает за единицу времени I_0 частиц. Решая эту пропорцию относительно I_0 , получим

$$I_0 = \frac{a\Omega}{4\pi}. \quad (1)$$

Величина телесного угла Ω связана с плоским углом θ между осью пучка и его образующей известным соотношением

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta);$$

учитывая, что

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

преобразуем (1) к виду

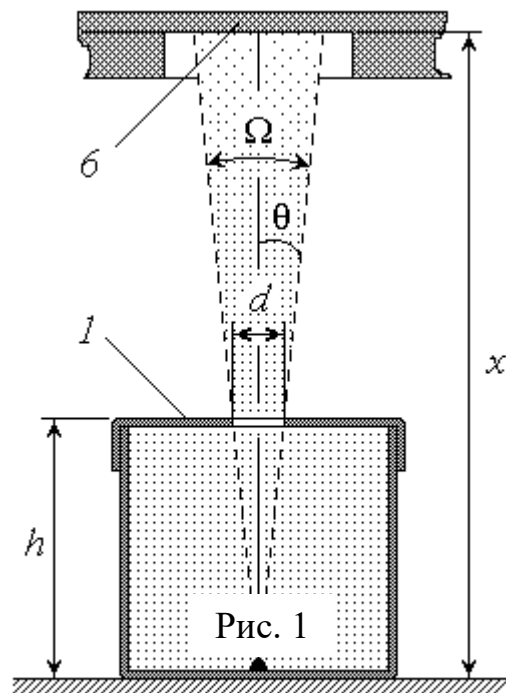


Рис. 48

$$I_0 = \frac{a \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} - 1)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}}. \quad (2)$$

Из рис. 1 видно, что

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{d}{2h}, \quad (3)$$

где h – высота контейнера; d – диаметр отверстия в его крышке.

Диаметр отверстия в несколько раз меньше высоты контейнера, поэтому величина $\operatorname{tg} \theta$ мала по сравнению с единицей. Воспользовавшись соотношением для малых углов α

$$\sqrt{1 + \alpha^2} \approx 1 + \frac{\alpha}{2},$$

избавимся от радикалов в выражении (2):

$$I_0 = \frac{a}{2 \cdot (2 \operatorname{ctg}^2 \theta + 1)}.$$

Из (3) следует, что $\operatorname{ctg} \theta = \frac{2h}{d}$. Тогда

$$I_0 = \frac{a}{2 \cdot \left[8 \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^2 + 1 \right]}.$$

Таким образом, активность a радиоактивного препарата можно найти по известным значениям h , d и I_0 как

$$a = 2I_0 \cdot \left[8 \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^2 + 1 \right];$$

Пренебрегая единицей в квадратных скобках, окончательно получим

$$\boxed{a = I_0 \cdot \left(\frac{4h}{d} \right)^2}. \quad (4)$$

Если бы β -излучение распространялось в вакууме, то счетчик регистрировал бы за единицу времени I_0 частиц. Однако наличие любой среды, в том числе воздуха, приводит к ослаблению потока излучения за счет взаимодействия его частиц с частицами вещества. Ослабление (поглощение) излучения описывается законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I_x = I_0 \cdot \exp(-\mu x), \quad (5)$$

где I_x – интенсивность излучения, прошедшего слой вещества толщиной x (в данном случае с учетом принятого ранее определения величины I_0 вели-

чина I_x эквивалентна количеству β -частиц, вылетевших из контейнера и зарегистрированных счетчиком за единицу времени); μ – *линейный коэффициент поглощения*, зависящий от природы излучения и свойств поглощающего вещества.

Логарифмируя уравнение (5), получим

$$\ln I_x = \ln I_0 - \mu x.$$

Введем обозначения:

$$\ln I_0 = b; \quad -\mu = K; \quad (6)$$

тогда

$$\ln I_x = Kx + b, \quad (7)$$

т.е. величина $\ln I_x$ зависит от толщины поглощающего слоя x по линейному закону с коэффициентами K и b . Изменяя толщину слоя воздуха между источником излучения и поверхностью счетчика (это осуществляется путем установки полки 2 с контейнером 1 в различные пазы этажерки 3) и измеряя соответствующие значения числа зарегистрированных за единицу времени импульсов I_x , можно построить зависимость (7) и определить ее коэффициенты K и b либо графическим способом, либо по методу наименьших квадратов. Значения I_0 и μ легко найти из выражений (6):

$$\boxed{I_0 = \exp(b)}; \quad (8)$$

$$\boxed{\mu = -K}. \quad (9)$$

В условиях данной лабораторной работы газоразрядный счетчик регистрирует не только частицы, образовавшиеся в результате радио-активного распада исследуемого изотопа, но и так называемый *фон* – частицы космического происхождения и обусловленные излучением среды. Поэтому реальная скорость счета (количество импульсов I , зарегистрированных за единицу времени) будет $I = I_x + I_\phi$, где I_ϕ – скорость счета фона. Если предварительно (до опытов с радиоактивным изотопом) измерить величину I_ϕ , то необходимые для подстановки в зависимость (7) значения величины I_x можно определить как

$$\boxed{I_x = I - I_\phi}. \quad (10)$$

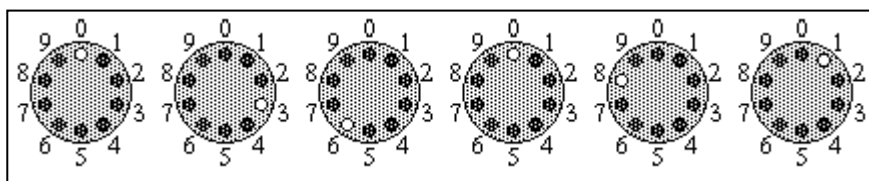
Порядок измерений и обработки результатов

Упражнение 1. Проверка счетной аппаратуры и измерение радиоактивного фона

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой. Убедитесь в том, что все кнопки (клавиши) переключателя 10 на счетном приборе 9 отжаты. Включите установку в сеть переменного тока и нажмите клавишу «Сеть» переключателя 10. При этом на панели прибора должна загореться сигнальная лампочка, а на каждом из шести декастронов 11 – засветиться по одной точке.

2. Научитесь снимать показания счетного прибора. Отсчет импульсов на декастромах ведется слева направо: сотни тысяч, десятки тысяч, тысячи, сотни, десятки и единицы. Например, рис. 2 изображает состояние декастронов, соответствующее числу зарегистрированных импульсов $N = 36081$.

Рис. 2



3. Нажмите клавишу «Сброс»: все декастроны должны показывать нули.

4. Запишите в табл. 1 рекомендуемые значения времени проверки аппаратуры t_{np} и времени измерения фона t_{ϕ} , выразив их в секундах.

Таблица 1

Проверка			Измерение фона		
t_{np}, c	N_{np}	$E, \%$	t_{ϕ}, c	N_{ϕ}	$I_{\phi}, \text{имп./с}$

5. Нажмите клавишу «Проверка» и одновременно включите секундомер (или засеките время по часам с секундной стрелкой). По истечении времени t_{np} нажмите клавишу «Стоп». Считайте с прибора число зарегистрированных импульсов N_{np} и занесите его в таблицу. Оцените относительную погрешность E работы прибора исходя из следующих соображений: в режиме проверки на вход прибора поступают импульсы от сети переменного тока с частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$, т.е. прибор должен регистрировать 50 импульсов в секунду. За время t_{np} должно быть зарегистрировано $N_0 = \nu \cdot t_{np}$ импульсов. Тогда относительная погрешность составит

$$E = \left| \frac{N_{np}}{N_0} - 1 \right| \cdot 100 \%,$$

или

$$E = \left| \frac{N_{np}}{\nu \cdot t_{np}} - 1 \right| \cdot 100 \%.$$

Используя последнюю формулу, рассчитайте величину E и запишите ее значение в табл. 1. Если относительная погрешность не превышает 5 %, то работу установки можно считать нормальной.

6. Повторите п. 3. Засеките время и нажмите клавишу «Пуск» (в этом режиме при отсутствии радиоактивного препарата счетчик регистрирует фоновое излучение). По истечении времени t_ϕ нажмите клавишу «Стоп» и запишите в табл. 1 количество зарегистрированных импульсов N_ϕ . Рассчитайте скорость счета фона как $I_\phi = \frac{N_\phi}{t_\phi}$ и занесите ее значение в табл. 1.

Упражнение 2. Определение линейного коэффициента поглощения и активности радиоактивного препарата

1. Установите полку, согласно рекомендациям, в соответствующие пазы этажерки 3. Расположите контейнер так, чтобы отверстие в его крышке находилось под счетчиком 6 против его центра. Запишите в табл. 2 расстояние x от источника излучения до счетчика.

Таблица 2

Номер опыта	$x, \text{ см}$	N	$I, \text{ имп./с}$	$I_x, \text{ имп./с}$	$\ln I_x$	$x^2, \text{ см}^2$	$x \cdot \ln I_x, \text{ см}$
1	4,5						
2	5,5						
3	6,5						
4	7,5						
5	8,5						
6	9,5						
7	10,5						
$\Sigma =$				$\Sigma =$			

2. Запишите в тетрадь рекомендуемое значение времени счета импульсов t (с).

3. Повторите п. 3 упражнения 1.

4. Засеките время и нажмите клавишу «Пуск». По истечении времени t нажмите на «Стоп»; занесите в табл. 2 количество зарегистрированных импульсов N .

5. Переместите полку 2 на 1 см ниже (в следующие пазы этажерки). Увеличенное на 1 см расстояние x запишите в табл. 2.

6. Повторите действия пп. 4–6 заданное число раз (общее количество опытов n должно быть не менее семи).

7. Нажмите клавишу «Сеть» и выключите установку, отсоединив сетевой шнур от розетки.

8. Линейкой или штангенциркулем измерьте высоту использованного вами контейнера h и диаметр отверстия в его крышке d ; результаты измерений занесите в табл. 3.

Таблица 3

$h, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$I_0, \text{расп./с}$	$a, \text{расп./с}$	$a, \text{мкКи}$

9. Для каждого из сделанных опытов рассчитайте и занесите в табл. 2 скорость счета импульсов $I = \frac{N}{t}$.

10. Используя найденное в упражнении 1 значение скорости счета фона I_ϕ , по формуле (10) вычислите величину I_x , а также найдите $\ln I_x$. Результаты расчетов занесите в табл. 2.

11. Нанесите экспериментальные точки на график зависимости $\ln I_x$ от x (ось Ox должна начинаться с нуля!).

12. Определите коэффициенты K и b зависимости (7) путем обработки построенного графика или методом наименьших квадратов. В последнем случае предварительно заполните два крайних правых столбца табл. 2 и ее последнюю строку сумм.

13. По формулам (8) и (9) рассчитайте скорость счета в вакууме I_0 и линейный коэффициент поглощения μ ; результаты занесите в табл. 3.

14. Вычислите по формуле (4) активность радиоактивного препарата a (расп./с) и переведите полученный результат в микрокюри (мкКи). Оба значения запишите в табл. 3.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Что такое радиоактивность?
2. Что представляет собой β -излучение?
3. Изложите закон Бугера – Ламберта – Бера.

Темы, выносимые на защиту

1. α , β , γ -излучение. Их состав и происхождение.
2. Основные понятия и законы ядерной физики.
3. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды радиоактивности. Опишите их свойства и различие.
2. Охарактеризуйте α , β , γ -излучение.
3. Что представляет собой радиоактивный распад? Запишите закон радиоактивного распада.
4. Какие физические законы должны выполняться при радиоактивном распаде?
5. Что такое постоянная распада? Изложите ее физический смысл.
6. Каковы период полураспада, среднее время жизни радиоактивного ядра?
7. Расскажите об активности и удельной активности радиоактивного вещества. Каковы их связь и единицы измерения?
8. Запишите правила смещения для α , β^+ , β^- -распадов.
9. Запишите и объясните закон Бугера – Ламберта – Бера.
10. Что собой характеризуют линейные коэффициенты ослабления?

Пример вариантов задания для защиты

***Работа 6.4. РАДИОАКТИВНОСТЬ.
ПОГЛОЩЕНИЕ β -ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХ***
Е

Вариант 96

1. Запишите реакцию распада $_{38}\text{Sr}^{90}$ и рассчитайте энергетический эффект этой реакции.
2. Что изменится в результатах работы, если между источником и счетчиком поместить тонкий слой фольги?

Работа 6.4. РАДИОАКТИВНОСТЬ.
ПОГЛОЩЕНИЕ β -ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХ
Е

Вариант 97

1. Период полураспада, используемого в работе радиоактивного источника, ${}_{38}\text{Sr}^{90}$ составляет 28 лет. Определите среднее время жизни ядра.
2. Что изменится в результатах работы, если расширить отверстие в контейнере с источником излучения?

Работа 6.4. РАДИОАКТИВНОСТЬ.
ПОГЛОЩЕНИЕ β -ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХ
Е

Вариант 98

1. Какое число импульсов в минуту регистрирует счетчик на высоте 10,5 см, если диаметр отверстия контейнера увеличить в два раза?
2. Как изменится график $\ln J$ от x , если измерения на различных высотах проводить через время t , соизмеримое с периодом полураспада?

Работа 6.4. РАДИОАКТИВНОСТЬ.
ПОГЛОЩЕНИЕ β -ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХ
Е

Вариант 99

1. Почему в работе методика определения коэффициента ослабления не применима для радиоактивного источника ${}_{12}\text{Mg}^{27}$, период полураспада которого $T_{1/2} = 10$ мин?

2. Что такое активность радиоактивного изотопа и как она изменяется с течением времени? Может ли активность этого изотопа увеличиваться с течением времени?

3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

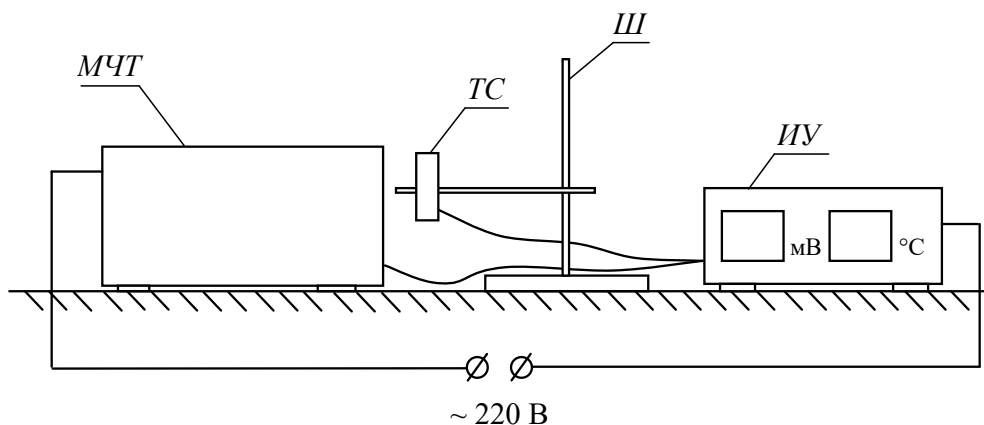
Лабораторная работа 7.1

Исследование модели абсолютно черного тела методом измерения температуры контактным и оптическим способами

Цели работы:

- 1) изучение модели абсолютно черного тела (АЧТ);
- 2) экспериментальная проверка справедливости закона Стефана – Больцмана;
- 3) определение значения константы Стефана – Больцмана.

Схема экспериментальной установки



Описание установки и методики измерений

Установка для проведения лабораторной работы состоит из объекта исследования – модели АЧТ (*МЧТ*), термостолбика *ТС* и измерительного устройства *ИУ*, выполненных в виде конструктивно законченных изделий, а также штатива *Ш* со стойкой, размещенных на лабораторном столе и соединяемых между собой кабелями.

Модель АЧТ, являющаяся объектом исследования в данной работе, представляет собой закрытую термоизолированную электропечь с отверстием для выхода излучения. В ее теплозащитный корпус встроены *нагревательное устройство*, а также *регулируемый источник питания*, предназначенный для разогревания печи до температуры 800 °С и регулирования

скорости нагрева. Внутри расположена *термопара* для измерения температуры контактным способом, а также *вентиляционная система* для ее охлаждения.

Включения питания печи и вентиляторов при ее охлаждении осуществляется при помощи выключателей «Сеть» и «Вент», расположенных на ее передней панели. Регулятор «Скорость нагрева» вынесен на верхнюю часть теплозащитного кожуха. В положении «MIN» мощность к нагревательному элементу практически не подводится, в положении «MAX» к нагревательному элементу подводится максимальная мощность.

Термостолбик *ТС* представляет собой датчик потока излучения (мощности излучения) и устанавливается с помощью стойки на штативе. В качестве термочувствительного элемента в нем применяется *батарея хромель-копелевых термопар*. Кроме того, в термостолбик встроен *нагревательный элемент*, который позволяет выполнить его калибровку в единицах лучистого потока. Для защиты от конвекционного нагрева перед термочувствительным элементом установлена *слюдяная пластина*.

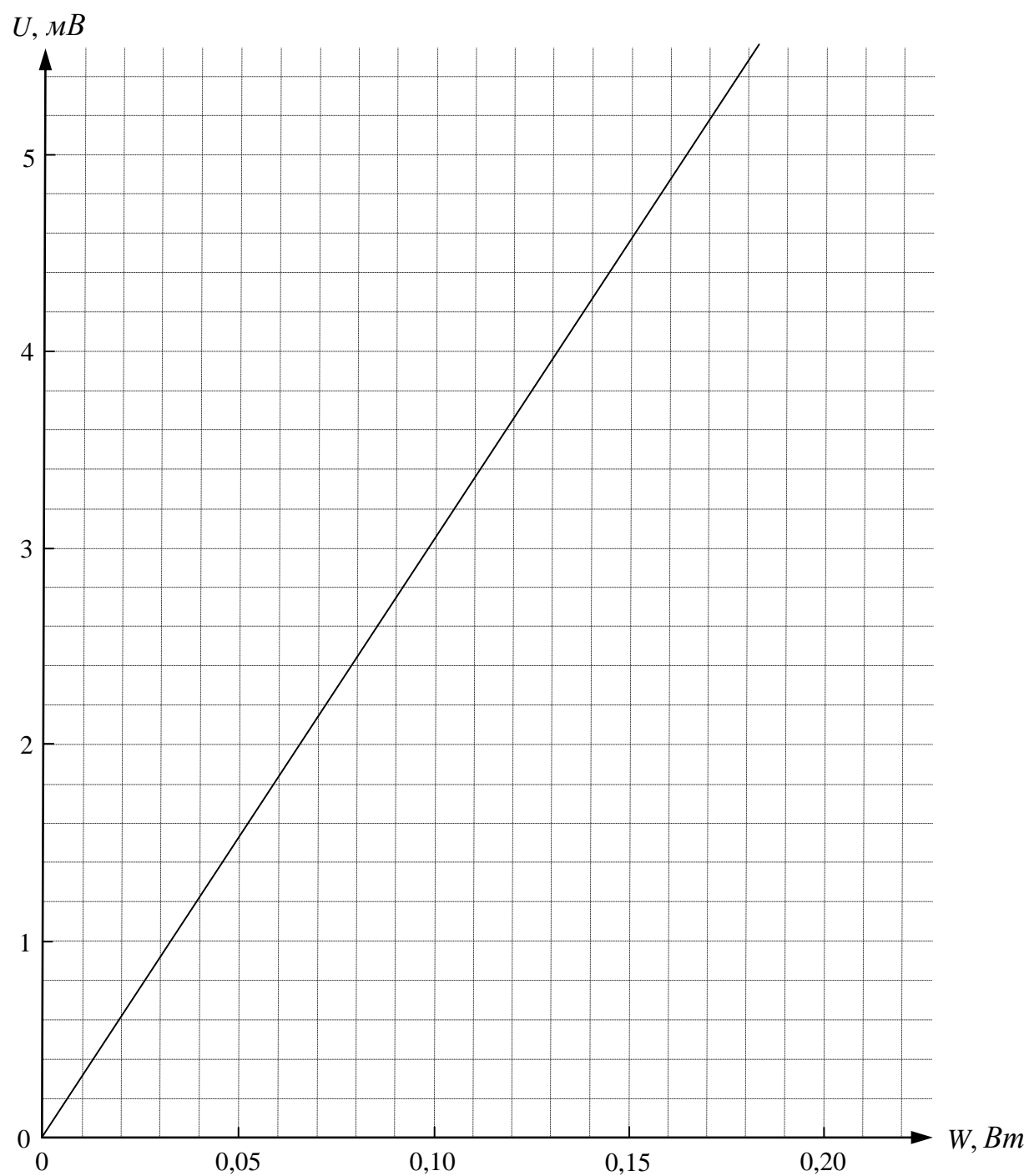
Аналого-цифровые преобразователи и нормирующие усилители для измерения и индикации температуры печи и термо-ЭДС термостолбика вынесены в лабораторной установке в измерительное устройство *ИУ*. Соответствующие индикаторы «°C» и «мВ» вынесены на переднюю панель устройства. В состав измерительного устройства также входят источники питания системы охлаждения печи.

Исследование *МЧТ* (печи) осуществляется методами измерения температуры контактным и оптическими способами. Контактным способом измеряется температура в печи (с помощью расположенной в ней термопары); оптическим – приращение потока излучения (мощности излучения) с помощью термостолбика.

Приращение потока излучения связано с определяемым экспериментально напряжением линейной зависимостью, приведенной на рисунке. Все измерения проводятся при фиксированном расстоянии $L = 0,045 \dots 0,050$ м между термостолбиком с эффективной площадью $S_{изл} = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ и выходным отверстием печи диаметром $d_{изл} = 0,01$ м.

Обратите внимание!

1. Работа термопечи возможна только при условии подключения к ней измерительного устройства.
2. Время, необходимое для прогрева измерительного устройства, составляет около 5 мин.
3. Максимальное время работы установки – 2 ч.
4. При охлаждении печи система вентиляции должна работать.
5. Время охлаждения печи составляет 15–20 мин.



Порядок измерений и обработки результатов

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой.
2. Установите термостолбик *ТС* так, чтобы втулка на его передней панели вошла в отверстие на передней панели печи.
3. Подключите сетевые шнуры объекта исследования (печи) *МЧТ* и измерительного устройства *ИУ* к электрической сети 220 В, 50 Гц.
4. Включите измерительное устройство *ИУ* выключателем «Сеть» на его задней панели и выдержите время, необходимое для его нагрева. На индикаторах «°C» и «мВ» должны установиться значения «000» и «0,00» соответственно.
5. Убедитесь, что регулятор скорости нагрева печи находится в положении «MIN». Включите термопечь с помощью выключателя «Сеть» на его передней панели, а также вентилятор системы охлаждения (с помощью выключателя «ВЕНТ» во избежание перегрева корпуса печи).
6. Используя регулятор «Скорость нагрева» добейтесь того, чтобы печь стала медленно нагреваться.
7. Постепенно нагревая печь, снимите зависимость напряжения термостолбика от температуры в печи (рекомендованные значения температуры печи приведены в графе 2 таблицы). Занесите результаты в таблицу (столбец 3).

№ п/п	$t_{печи}, ^\circ C$	$U, мВ$	T, K	T^4, K^4	$W, Вт$	$R_e, Вт/м^2$
1	500					
2	550					
3	600					
4	650					
5	700					
6	750					
7	800					

Обратите внимание!

Измерения следует производить, когда напряжение с термостолбика и температура в печи будут очень медленно меняться (изменить скорость нагрева можно с помощью регулятора «Скорость нагрева», расположенного на ее верхней панели).

Более качественные результаты можно получить, если производить отсчеты тогда, когда печь находится в тепловом равновесии – подводимая мощность к нагревательному элементу печи только компенсирует потери на ее охлаждение. Показания температуры печи и напряжения с термостолбика на соответствующих индикаторах измерительного устройства в этом случае должны оставаться постоянными.

Так как АЧТ в природе не существует, а данный объект исследования является лишь *МЧТ*, то получаемые результаты могут отличаться от теоретических значений. На эти результаты влияют отличие поглощающей способности термостолбика и печи от АЧТ, несоответствие динамических характеристик термостолбика и термопары. Кроме того, при высоких температурах, помимо излучения с выходного отверстия, появляется дополнительное излучение от нагрева внешних стенок.

8. При достижении максимально заданной температуры печи (800–850 °С) установите регулятор «Скорость нагрева» в положение «MIN» и выключите только ее питание выключателем «Сеть» на передней панели.

9. После охлаждения печи необходимо выключить систему вентиляции печи (нажать выключатель «Вент» на передней панели *МЧТ*) и измерительное устройство (выключатель «Сеть» на задней панели *ИУ*), а также отключить сетевые вилки соответствующих устройств от сети.

10. Для каждого из проделанных опытов переведите значения температуры $t_{печи}$ в K , прибавляя к полученным значениям комнатную температуру $t_{комн}$:

$$T = t_{печи} + t_{комн} + 273,15 [K].$$

11. Возведите полученные результаты в четвертую степень. Занесите результаты в таблицу (столбцы 4 и 5).

12. Получите по градировочному графику (см. рисунок) линейное уравнение зависимости напряжения термостолбика U (mB), от приращения потока излучения (мощности излучения) W (Bm).

13. Рассчитайте с помощью полученного уравнения значения мощности излучения W (Bm) в каждом опыте. Занесите результаты в таблицу (столбец 6).

14. Нанесите экспериментальные точки на график $W = W(T^4)$, отложив по осям абсцисс и ординат соответственно T^4 , K^4 и W , Bm . Постройте экспериментальную зависимость.

15. Сделайте вывод о применимости закона Стефана – Больцмана (см. формулу (6)) для данного объекта исследования (о линейном характере зависимости).

Дополнительные задания

1. Определите экспериментальное значение константы Стефана – Больцмана σ . Для этого необходимо при построении графика вместо приращения потока излучения (мощности излучения) W , Вт, отложить на оси OY рассчитанные значения интегральной энергетической светимости R_e (Вт/м²) в каждом опыте. Искомая постоянная Стефана – Больцмана в этом случае должна быть численно равна тангенсу угла наклона экспериментальной кривой.

2. Используя формулу Планка, с помощью любого пакета для математических расчетов (например, Mathcad) постройте и сопоставьте на одном графике кривые $r_{\nu,T}$ и $r_{\lambda,T}$ для одного из опытов. Выберите логарифмические масштабы по оси абсцисс таким образом, чтобы частота ν и длина волны λ были связаны известным соотношением $\lambda = c/\nu$. Проанализируйте полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. На фарфоровой тарелке на светлом фоне имеется темный рисунок. Почему, если ее быстро вынуть из печи, где она нагрелась до высокой температуры, и рассматривать в темноте, наблюдается светлый рисунок на темном фоне?

2. Чем отличается серое тело от черного?

3. В чем заключается физический смысл универсальной функции Кирхгофа?

4. Как и во сколько раз изменится энергетическая светимость черного тела, если его термодинамическая температура уменьшится вдвое?

5. Как сместится максимум спектральной плотности энергетической светимости черного тела $r_{\nu,T}$ с повышением температуры?

6. Найдите постоянную Стефана – Больцмана только с помощью формулы Планка.

7. При каких условиях из формулы Планка получаются закон смещения Вина и формула Рэлея – Джинса?

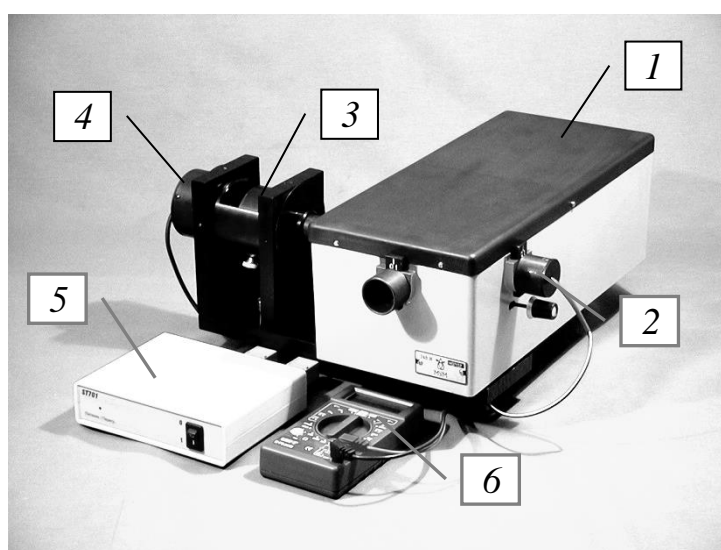
Лабораторная работа 7.2

Исследование спектров поглощения и пропускания

Цели работы:

- 1) исследование спектральных характеристик абсорбционных светофильтров на основе цветного стекла;
- 2) определение параметров светофильтров из цветного стекла.

Фотография экспериментальной установки



- 1 – монохроматор МУМ-01; 2 – узел светодиодного излучателя;
3 – кюветное отделение; 4 – фотоприемный узел;
5 – блок обработки сигнала; 6 – мультиметр

Описание установки и методики измерений

В узле излучателя 2 установлен специальный светодиод белого света, излучающий в диапазоне 400...800 нм. Узел излучателя закреплен непосредственно перед входной щелью монохроматора на его корпусе. За входной щелью установлен объектив, формирующий параллельный пучок, проходящий кюветное отделение и попадающий на фотодиод фотоприемного узла.

Оптическая схема установки приведена на рис. 1.

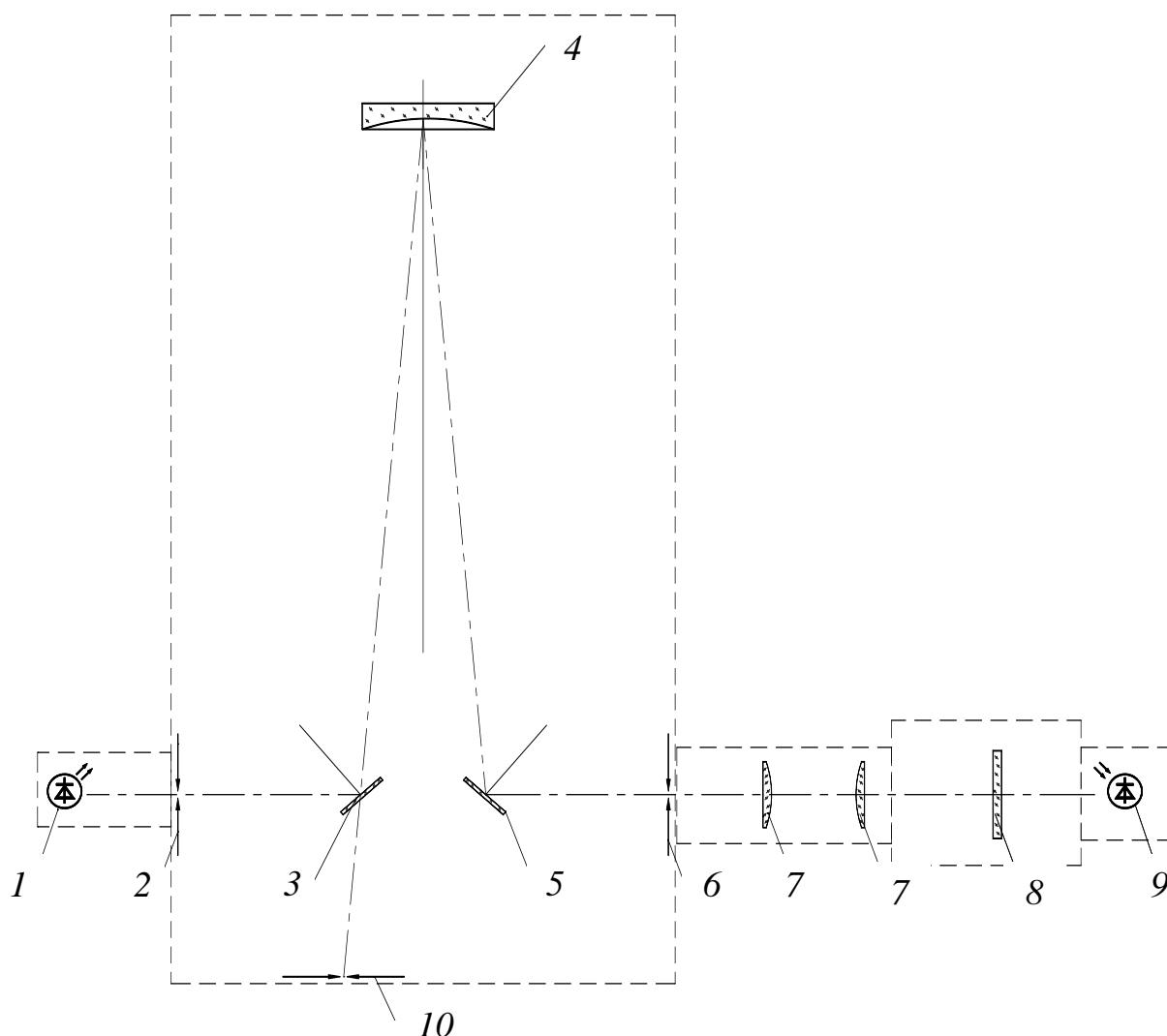


Рис. 1: 1 – светодиод; 2 – входная щель; 3 – зеркало;
4 – дифракционная решетка; 5 – зеркало; 6 – выходная щель;
7 – система линз; 8 – объектив; 9 – фотодиод; 10 – резервная входная щель

Излучение от светодиода 1 попадает на входную щель 2 и посредством зеркала 3 направляется на дифракционную решетку 4. Дифракционная решетка служит диспергирующим и фокусирующим элементом в монохроматоре. Она строит изображение входной щели 2 в плоскости выходной щели 6. Зеркала 3 и 5 осуществляют излом оптической оси системы для более компактного размещения элементов в корпусе. Кроме того, зеркало 3 может быть выведено из хода лучей с помощью рукоятки на корпусе монохроматора. В этом случае в качестве входной щели может быть использована щель 10 (в настоящей работе этот режим не используется и щель 10 является резервной). За выходной щелью 6 установлена оптическая система из линз 7, которая формирует параллельный пучок, направляемый через кюветное отделение с установленным в нем объектом исследования 8 на фотодиод 9 фотоприемного узла. Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки 4 вокруг оси 0 на угол φ в пределах от $\varphi_0 = 6^\circ 54'$ до $\varphi_k = 28^\circ 44'$

с помощью рукоятки, расположенной на торцевой стенке монохроматора. Отсчет длин волн осуществляется с помощью цифрового механического счетчика, вмонтированного в корпус монохроматора с точностью $\pm 0,2$ нм.

Абсорбция света

Поглощением (абсорбцией) света называется явление потери энергии световой волны при прохождении ее через вещество. При этом часть энергии электромагнитной волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов. Частично эта энергия вновь возвращается излучению в виде вторичных волн, возбуждаемых электронами, а частично переходит в другие виды энергии, например во внутреннюю энергию. Таким образом, интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается – свет поглощается в веществе.

Поглощение света в веществе подчиняется закону Бугера – Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

где I , I_0 – интенсивность монохроматической волны падающего и прошедшего через слой вещества излучения соответственно; α – линейный коэффициент поглощения (показатель поглощения) света веществом, зависящий от длины волны λ (или частоты ν) света, химической природы и состояния вещества и не зависящий от интенсивности света; l – толщина поглощающего слоя.

Коэффициент α различается для разных веществ. Для одноатомных газов и паров металлов, где атомы расположены на значительных расстояниях друг от друга и практически не взаимодействуют, коэффициент поглощения для большинства длин волн близок к нулю и только в узких спектральных областях (10^{-12} – 10^{-11} м) наблюдаются резкие максимумы (линейчатый спектр поглощения). Эти области резкой абсорбции атомов соответствуют частотам собственных колебаний электронов внутри атомов. Колебания атомов в молекулах расширяют спектр поглощения, образуя полосы поглощения (около 10^{-10} – 10^{-7} м).

Коэффициент поглощения для диэлектриков невелик (порядка 10^{-3} – 10^{-7} м $^{-1}$), что обусловлено отсутствием свободных электронов, однако в условиях резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомов в молекулах возникает сплошной спектр поглощения.

Для металлов значение α велико (10^3 – 10^5 см $^{-1}$), так как из-за существования свободных электронов световая энергия быстро переходит во внутреннюю. В связи с этим металлы непрозрачны для света.

Коэффициент поглощения α зависит от длины волны, поэтому поглощающие вещества окрашены. Например, стекло, слабо поглощающее красные лучи и сильно синие и зеленые, при освещении белым светом будет

казаться красным, а синим и зеленым светом – черным из-за сильного поглощения. Это явление используется при изготовлении светофильтров, которые, в зависимости от химического состава, пропускают свет только определенных длин волн, поглощая остальные. Таким образом, чем больше α для данной длины волны, тем отчетливее обнаружится ослабление соответствующих участков спектра поглощения.

Спектральные характеристики светофильтров

Светофильтры характеризуются численными значениями коэффициента пропускания, оптической плотности и показателя поглощения.

Коэффициентом пропускания τ среды называется отношение светового потока Φ , прошедшего через среду, к падающему световому потоку Φ_0 .

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} . \quad (2)$$

При учете только потерь на поглощение

$$\tau = (1 - \alpha)^l . \quad (3)$$

Коэффициент пропускания зависит от длины волны света.

Оптическая плотность D_λ стекла для монохроматического света длиной волны λ связана с коэффициентом пропускания τ_λ следующим соотношением:

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi} . \quad (4)$$

Показатель поглощения стекла k_λ для света длиной волны λ определяется из выражения

$$k_\lambda = \frac{-\lg \tau_\lambda}{l} = \frac{D_\lambda}{l} , \quad (5)$$

где τ_λ – коэффициент пропускания стекла толщиной l (мм) для монохроматического света длиной волны λ .

При расчете оптической плотности светофильтра необходимо учитывать, кроме поглощения света, потери на отражение от двух поверхностей стекла и вводить соответствующую поправку. С учетом отражения

$$\tau'_\lambda = (1 - \rho)^2 \tau_\lambda = (1 - \rho)^2 \cdot 10^{-k_\lambda l} , \quad (6)$$

где ρ – коэффициент отражения.

Обычно коэффициент отражения ρ условно принимается за постоянную для стекла каждой марки величину, зависящую только от показателя преломления этого стекла в видимой области спектра n :

$$\rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 . \quad (7)$$

Тогда оптическая плотность D_{λ}' светофильтра для данной длины волны

$$D_{\lambda}' = -\lg \tau_{\lambda}' = D_{\lambda} + D_{\rho} = k_{\lambda}l + D_{\rho} = -\lg \tau_{\lambda} + D_{\rho}, \quad (8)$$

где D_{ρ} – поправка на отражение света от двух поверхностей стекла:

$$D_{\rho} = -2\lg(1 - \rho). \quad (9)$$

Спектральными характеристиками светофильтров служат кривые зависимости коэффициента пропускания и оптической плотности от длины волны: $\tau_{\lambda} = f(\lambda)$ и $D_{\lambda} = f(\lambda)$.

По виду спектральной характеристики фильтры делят на полосовые, которые пропускают излучение в узкой полосе длин волн (рис. 2а), и отрезающие, которые пропускают свет с длинами волн большими некоторого граничного значения (рис. 2б).

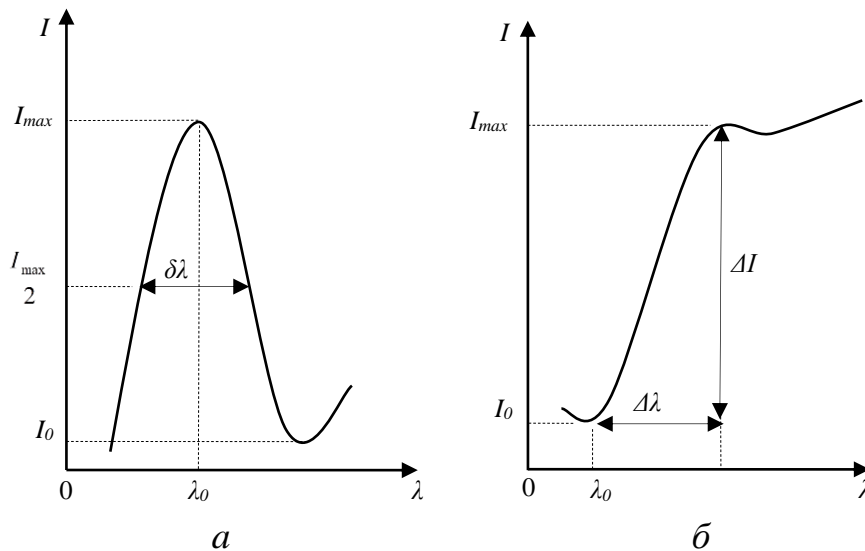


Рис. 2: а – полосовой фильтр; б – отрезающий

Параметрами полосового фильтра являются:

- 1) прозрачность в максимуме I_{max} ;
- 2) рабочая длина волны λ_0 ;
- 3) ширина полосы на половине максимальной прозрачности $\delta\lambda$;
- 4) прозрачность за пределами полосы пропускания (фон) I_0 ;
- 5) контрастность, определяемая отношением $\frac{I_{max}}{I_0}$;
- 6) добротность (разрешающая способность) $\theta = \frac{\lambda_0}{\delta\lambda}$.

Параметрами отрезающего фильтра являются:

- 1) длина волны перехода от прозрачности к непрозрачности λ_0 ;
- 2) крутизна спектральной характеристики $K = \frac{\Delta I}{\Delta\lambda}$.

Порядок измерений и обработки результатов

1. Включите источник питания и мультиметр. Установите на мультиметре предел измерений 200 мВ.

2. Подождите не менее 5 мин для стабилизации теплового режима приемника излучения.

3. Произведите калибровку оптической системы, т.е. снимите зависимость $\Phi_0 = f(\lambda)$. Для этого при пустом тубусе кюветного отделения с помощью ручки на задней стенке монохроматора измените длину волны λ в диапазоне от 460 до 700 нм с шагом 20 нм и снимите соответствующие показания мультиметра (U_0). При необходимости переключайте пределы измерения мультиметра (20 В, 2 В, 200 мВ). В данном случае напряжение, которое показывает мультиметр, пропорционально исходному световому потоку от светодиода ($U_0 \sim \Phi_0$). Значения U_0 занесите в таблицу.

4. Поместите в тубус кюветного отделения желтый светофильтр, снимите зависимость показаний мультиметра (U) от λ для данного светофильтра в том же диапазоне длин волн и запишите показания в таблицу (длину волны рекомендуется устанавливать в том же диапазоне и с тем же шагом, что и в п. 3). Значения напряжения U пропорциональны прошедшему через светофильтр световому потоку ($U \sim \Phi$).

5. Поместите в тубус кюветного отделения зеленый светофильтр и повторите для него действия, указанные в п. 4.

6. Поместите в тубус кюветного отделения красный светофильтр и повторите для него действия, указанные в п. 4.

7. Выключите источник питания и мультиметр.

8. Рассчитайте коэффициенты пропускания светофильтров для различных длин волн по формуле

$$\tau = \frac{U}{U_0}.$$

9. Постройте графики зависимости коэффициента пропускания светофильтра от длины волны $\tau = f(\lambda)$ для трех светофильтров.

10. По полученным спектральным характеристикам определите цвет и вид светофильтра (отрезающий или полосовой), для каждого светофильтра – соответствующие его виду параметры.

11. Для одного из светофильтров (по указанию преподавателя) рассчитайте по формулам (7) и (8) оптическую плотность D для различных длин волн λ с учетом потерь на отражение. Постройте график зависимости оптической плотности от длины волны $D_\lambda = f(\lambda)$. Для упрощения расчетов потери на отражение на входной и выходной гранях светофильтра предлагается принять равными $\sim 3\%$ и не зависящими от длины волны. Толщину светофильтра принять равной 2 мм.

№ опыта	λ , нм	U_0 , В	Желтый светофильтр		Зеленый светофильтр		Красный светофильтр	
			U , В	τ	U , В	τ	U , В	τ
1	400							
2	410							
3	420							
4	430							
5	440							
6	450							
7	460							
8	470							
9	480							
10	490							
11	500							
12	510							
13	520							
14	530							
15	540							
16	550							
17	560							
18	570							
19	580							
20	590							
21	600							
22	610							
23	620							
24	630							
25	640							
26	650							
27	660							
28	670							
29	680							
30	690							
31	700							
32	710							
33	720							
34	730							
35	740							
36	750							
37	760							
38	770							
39	780							
40	790							
41	800							

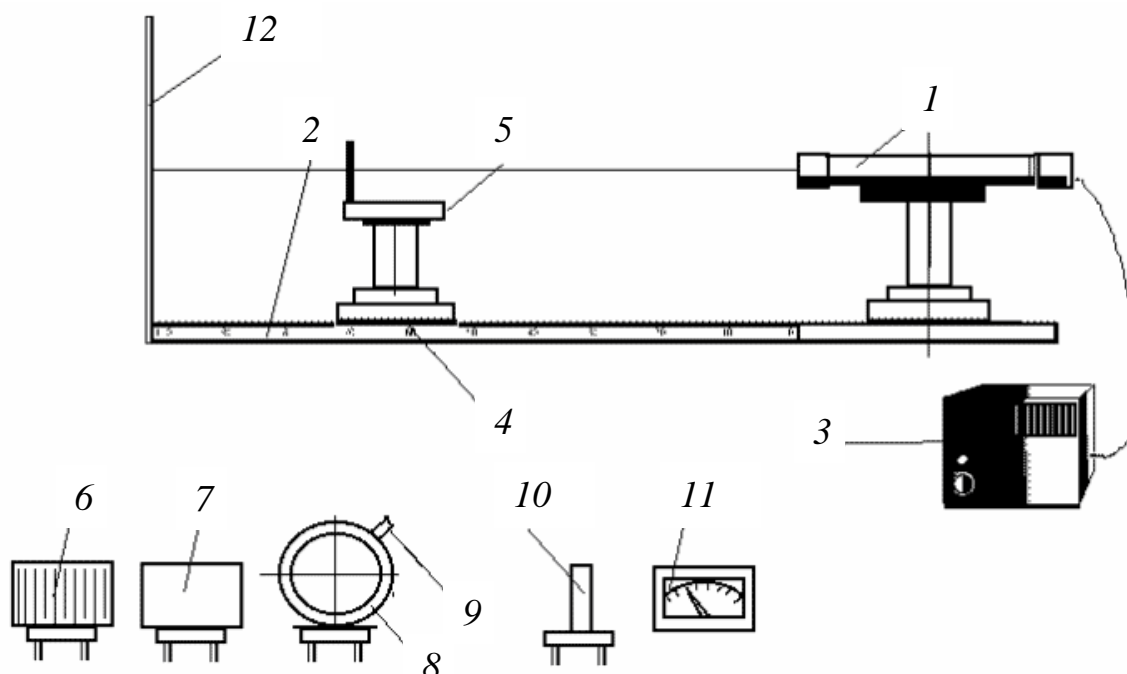
Лабораторная работа 7.3

Определение характеристик лазерного излучения

Цели работы:

- 1) изучение принципа работы и основных элементов лазера;
- 2) определение длины волны лазерного излучения;
- 3) оценка степени направленности лазерного излучения;
- 4) определение степени и вида поляризации лазера.

Схема экспериментальной установки



- 1 – лазер; 2 – оптическая скамья; 3 – блок питания; 4 – держатель;
5 – горизонтальный столик (держатель); 6 – дифракционная решетка;
7 – экран; 8 – поляроид; 9 – рычаг; 10 – фотодиод; 11 – микроамперметр;
12 – стационарный экран

Лабораторная установка представляет собой лазер 1, который установлен на оптической скамье 2. Блок питания 3 лазера расположен отдельно. На держателе 4 расположен горизонтальный столик, или держатель, 5, на который в ходе выполнения работы устанавливаются следующие детали: дифракционная решетка 6; экран 7; поляроид 8, вращение его осуществляется рычагом 9; фотодиод 10. Микроамперметром 11 измеряется ток в цепи фотодиода. Стационарный экран 12 должен быть расположен на расстоянии не менее 1,5 м от лазера.

Описание установки и методики измерений

Принцип работы лазера. В лазерах, как и в других источниках, свет излучается возбужденными атомами или молекулами при переходах электронов в них на более низкий энергетический уровень. Такой переход может осуществляться двумя способами: самопроизвольно (спонтанно) в любой момент времени и вынужденно, под действием фотона с энергией, соответствующей энергии данного перехода. При спонтанном переходе, происходящем самопроизвольно, фаза и направление излучения произвольны. Вероятность спонтанного перехода определяется только индивидуальными свойствами атома, она обратно пропорциональна среднему времени жизни атома в возбужденном состоянии τ . Вынужденное (стимулированное) излучение вызывается воздействием на возбужденный атом электромагнитного поля квантов с энергией перехода. При этом атом излучает квант, тождественный кванту, обусловившему переход. Вероятность вынужденного перехода зависит не только от свойств атома, но и от интенсивности воздействия поля, обусловившего стимулированный переход, а именно от объемной плотности излучения на частоте перехода.

Особенность излучения лазеров – концентрация основной части излучаемой энергии в узком спектральном интервале и малом телесном угле – обусловлена тем, что в лазерах излучение происходит при вынужденных (индуцированных), а не спонтанных переходах.

Характерными свойствами излучения лазеров являются когерентность (временная и пространственная); монохроматичность (степень монохроматичности $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-10}$); направленность (угол расходимости $\sim 10^{-3}$ рад).

Излучение всех иных источников – ламп накаливания, газоразрядных ламп, электрических дуг – некогерентно, распределено по всему спектру и ненаправлено.

Устройство лазера. Основные элементы лазера – активная среда, система накачки и оптический резонатор.

Под активной средой понимают вещество, атомы или молекулы которого путем подвода энергии (накачки) поддерживаются в таком возбужденном состоянии, когда населенность верхнего рабочего уровня выше нижнего (так называемая инверсная населенность). Световой сигнал, распространяясь в среде с инверсной населенностью, усиливается за счет вынужденных переходов. При этом сохраняются частота, фаза и направление распространения сигнала.

Система накачки переводит атомы активного вещества в возбужденное состояние. Для накачки могут использоваться мощные лампы или источники электрического поля.

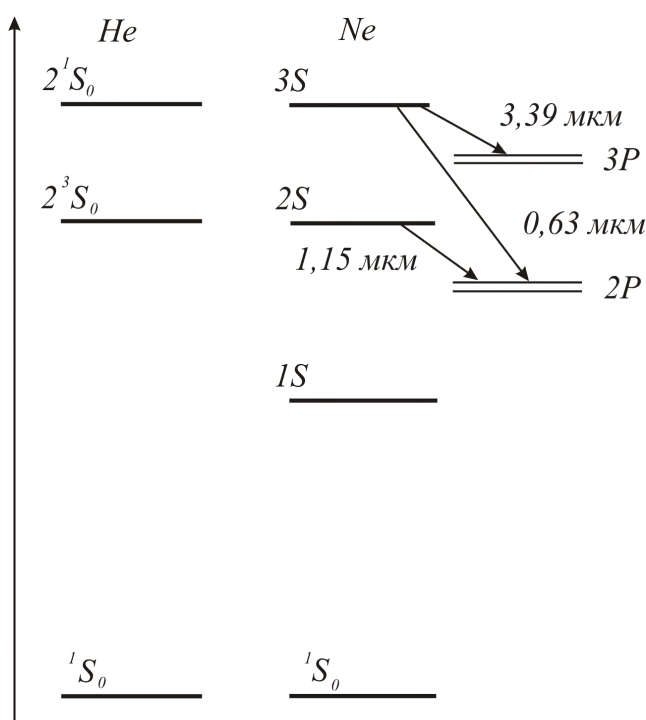
Оптический резонатор в простейшем случае представляет собой систему из двух параллельных зеркал. Одно из зеркал изготавливают с максимально возможным коэффициентом отражения, другое делают частично-прозрачным (через него выходит генерируемое излучение). Такой резонатор называется открытым, так как боковые стенки у него отсутствуют. В открытом резонаторе энергия накапливается только в виде стоячих волн, распространяющихся вдоль оси прибора (или под очень малым углом).

Основное назначение оптического резонатора состоит в создании условий, при которых вынужденное излучение вдоль оси прибора становится вероятнее, чем некогерентное, беспорядочно направленное, спонтанное. Резонатор, в основном, определяет свойства выходного излучения: его когерентность, монохроматичность, направленность и степень поляризации.

По типу активного вещества лазеры бывают газовые, твердотельные и полупроводниковые.

Гелий-неоновый лазер является примером газового лазера. Его активное вещество состоит из смеси инертных газов – гелия и неона. Рабочим газом является неон, т.е. генерация обусловлена излучением атомов неона. Гелий играет вспомогательную роль, он необходим для создания инверсной населенности рабочих уровней неона.

На рис. 1 приведена в упрощенном виде схема нижних уровней гелия и неона. Стрелками обозначены переходы, на которых возможна генерация, жирными линиями – группы близких уровней. Как видно из схемы, генерация возможна на трех переходах. Наибольшая мощность (сотни милливатт)



достигается при генерации на длине волны $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ (переход $3S \rightarrow 3P$), меньшая – при переходе $2S \rightarrow 2P$ ($\lambda = 1,15 \text{ мкм}$). Наиболее слабой является генерация на переходе $3S \rightarrow 2P$ с излучением красной линии $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. Однако именно эта линия является рабочей, так как такая видимый свет. Основной процесс, обеспечивающий достаточно высокую скорость заселения верхнего уровня неона $3S$ относительно $2P$, – резонансная передача энергии возбужденными атомами гелия атомам неона при

Рис. 1

их столкновении. Передача возможна благодаря двум обстоятельствам:

а) уровень $\text{He}(2^1S)$ почти совпадает по энергии с уровнем $\text{Ne}(3S)$, поэтому говорят о резонансной передаче энергии;

б) уровень 2^1S гелия обладает очень большим временем жизни $\tau \approx 10^{-3} \text{ с}$. Такие состояния называются метастабильными. Благодаря большому времени жизни и при надлежащем подборе давлений в смеси атомы гелия, возбужденные в состоянии 2^1S электронным ударом, успевают отдать энергию атому неона, прежде чем потеряют ее иным путем (например, при ударах о стенки).

Резонатором является запаянная длинная узкая трубка, в которой заключена смесь газов. Трубка ограничена с торцов окнами, наклоненными к оси трубки под углом Брюстера, т.е. выходящий свет является максимально поляризованным. Зеркала резонатора размещены вне разрядной трубки. Для возбуждения газов используется разряд постоянного тока, создаваемый между впаянными в трубку электродами – накаливаемым катодом и анодом.

В резонаторе происходит увеличение плотности излучения. Фотоны вынужденного излучения до выхода из резонатора многократно отражаются от ограничивающих его зеркал, многократно проходят активную его среду. В результате растет вероятность их встречи с возбужденным атомом $\text{Ne}(3S)$, сопровождающейся вынужденным переходом $\text{Ne}(3S) \rightarrow \text{Ne}(2P)$. Излученные кванты добавляются к потоку, его интенсивность лавинно растет и достигает значения, достаточного для возникновения генерации. Заметим, что резонатор усиливает только излучение, распространяющееся под малым углом к его оси. Другие фотоны покидают резонатор, пройдя малый путь и почти не вызывая вынужденных переходов.

В полупроводниковых лазерах инверсная населенность достигается за счет использования вырожденного состояния носителей заряда при прямом включении p – n -перехода. Для вынужденного излучения число электронов в зоне проводимости должно быть больше числа электронов в валентной.

Возможным способом создания инверсии населенностей может быть контакт вырожденных полупроводников p - и n -типа. Из-за повышенной концентрации электроны проводимости из n -полупроводника начинают переходить в p -полупроводник, а дырки – наоборот. Наличие неосновных носителей в p – n -переходе приводит к их рекомбинации, сопровождающейся излучением фотона определенной длины волны. Для получения непрерывного рекомбинационного излучения необходимо приложить к p – n -переходу в прямом направлении напряжение U , удовлетворяющее условию $eU > \Delta E$, где ΔE – энергия излучаемого фотона.

Оптический резонатор в рассматриваемом лазере образуется из двух противоположных граней полупроводника, перпендикулярных области p – n -перехода. Случайный фотон проходит от одной грани до другой

несколько раз и вызывает вынужденное излучение, порождая новые фотоны с такими же характеристиками. Таким образом, излучение усиливается. В момент, когда усиление начинает превосходить потери, появляется луч.

Определение характеристик лазерного излучения. В данной лабораторной работе предлагается определить длину волны лазерного излучения и оценить степень его монохроматичности, установить угол расхождения лазерного луча, найти вид и степень поляризации лазерного излучения.

Длину волны лазерного излучения можно определить, пропуская его через дифракционную решетку (рис. 2). После прохождения луча через дифракционную решетку на экране возникает дифракционная картина из пятен, соответствующих главным дифракционным максимумам нулевого, первого, второго и так далее порядков.

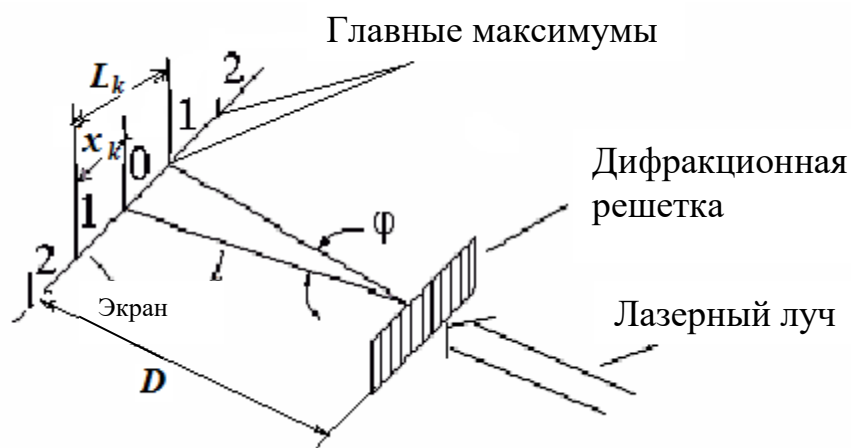


Рис. 2

Длина волны излучения определяется из условия главных дифракционных максимумов:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где d – постоянная дифракционной решетки (расстояние между ее штрихами); φ – угол дифракции; k – порядок дифракционного спектра; λ – длина волны.

Угол дифракции можно найти исходя из условия, что для малых углов

$$\sin \varphi \approx \tan \varphi = \frac{x_k}{D}.$$

где D – расстояние между экраном и дифракционной решеткой; x_k – расстояние между нулевым и k -м максимумами ($k = 1, 2, \dots$).

Экспериментально значение x_k можно найти путем обработки дифракционной картины. Для этого слева и справа от центрального максимума нужно отметить положения главных максимумов одного и того же

k -го порядка и измерить расстояние между ними L_k , после чего определить координату x_k как

$$x_k = \frac{L_k}{2}.$$

Длина волны излучения вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{x_k d}{kD}.$$

Направленность (расходимость) излучения лазера характеризуется телесным углом ω , в пределах которого распространяется большая часть излучения. Можно использовать плоский угол θ , получаемый при сечении телесного угла ω плоскостью, проходящей через ось симметрии. Эти углы связаны соотношением $\omega \approx \frac{\pi}{4} \theta$. Как уже говорилось, направленность лазерного излучения обусловлена свойствами индуцированных переходов к тем, что в открытом резонаторе могут накапливаться только волны, распространяющиеся вдоль оси прибора или под очень малым углом к ней (рис. 3).

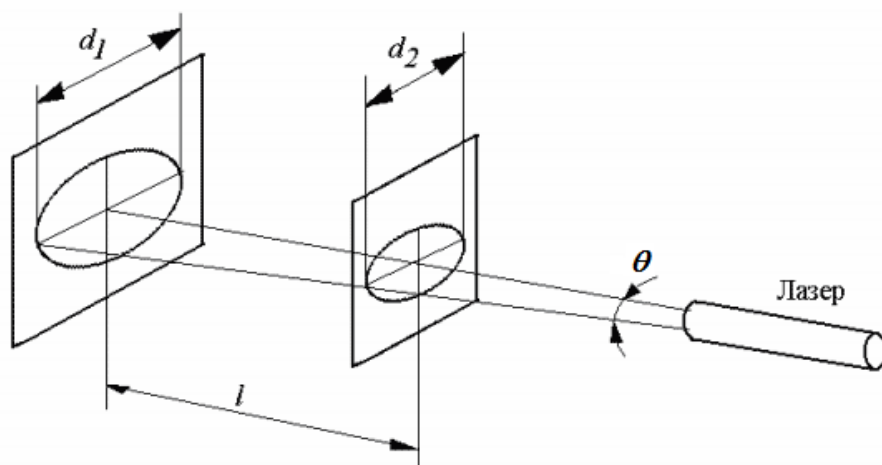


Рис. 3

Малое угловое расхождение лазерного луча можно оценить, поместив экраны на разных расстояниях от лазера и измерив радиус пятна излучения.

Зная расстояние l между экранами и диаметры d световых пятен на экранах, можно определить угловое расхождение светового пучка по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{d_1 - d_2}{2l}.$$

Поляризация лазерного излучения возникает при многократном прохождении им пространства резонатора. В отличие от естественных источников излучения, которые излучают электромагнитные волны с различно направленными колебаниями, направления колебаний лазерного излучения

имеет определенное преимущественное направление колебаний, т.е. является поляризованным в той или иной степени. Характеристики поляризации зависят от многих факторов, в том числе от параметров резонаторов, свойств и состояния активной среды, уровня накачки, температуры и т.д.

Форма кривой, описываемой концом проекции вектора излучения на плоскость, перпендикулярную направлению распространения излучения, определяет тип поляризации (рис. 4).

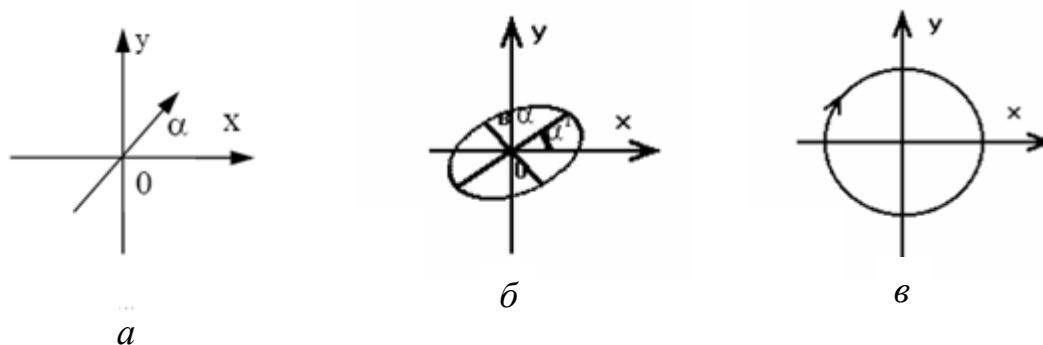


Рис. 4. *a* – линейный тип; *б* – эллиптическая; *в* – циркуляторная

По виду поляризации лазерное излучение может быть линейно-поляризованным, эллиптически-поляризованным, циркулярно-поляризованным, а также комбинированным, т.е. содержащим, например, линейно поляризованные и неполяризованные компоненты или циркулярно-поляризованные и неполяризованные.

Если резонатор лазера имеет окна, расположенные под углом Брюстера (например, гелий-неоновый лазер), то он генерирует линейно-поляризованное излучение. Степень поляризации излучения полупроводниковых лазеров существенно зависит от волноводных характеристик резонатора.

Степень поляризации определяется путем разделения пучка на два полностью поляризованных компонента с взаимно перпендикулярными направлениями колебаний вектора электрического (или магнитного) поля. Для этого используют два поляризатора. Поляризатор – это оптическое устройство, которое позволяет из неполяризованного света выделить компоненту, линейно-поляризованную в определенной плоскости. Если вращающийся поляризатор применяется для определения поляризационных параметров излучения, то он называется анализатором. Если вращать анализатор в частично-поляризованном свете, то будет наблюдаться изменение его интенсивности от максимального до минимального значений. Тогда степень поляризации

$$П = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}},$$

где P_{\max} и P_{\min} – максимальная и минимальная мощности излучения соответственно на выходе из анализатора.

Порядок измерений и обработки результатов

Упражнение 1. Определение длины волны излучения лазера

1. На столике 5 установите дифракционную решетку 6. Выведите световое пятно в центр дифракционной решетки. На экране 12 возникает дифракционная картина с ярким нулевым максимумом.
2. Измерьте расстояние L_k между дифракционными максимумами первого и второго порядков.
3. На столике 5 установите другую дифракционную решетку 6 и повторите измерения.
4. Запишите результаты измерений в табл. 1 и рассчитайте длину волны лазера.
5. Найдите среднее значение длины волны.
6. Снимите со столика дифракционную решетку.

Таблица 1

Номер опыта	D , мм	d , мкм	k	L_k , мм	x_k , мм	d , мм
1						
2						
3						
4						
5						

Упражнение 2. Оценка направленности излучения лазера

1. Установите в ход луча поляроид, который в данном упражнении используется в качестве ослабителя яркости светового луча. Выведите световое пятно в центр поляроида. Вращая поляроид рычагом 9, получите оптимальную для ваших глаз яркость пятна на экране.
2. Установите экран на расстоянии 0,8–0,9 м от лазера.
3. Приложите к экрану листок бумаги и зарисуйте сечение пятна.
4. Отодвиньте экран на расстояние не менее 1 м.
5. Зарисуйте сечение пятна на экране.
6. Измерьте диаметры пятен по своим рисункам не менее трех раз по разным направлениям.
7. Запишите результаты измерений диаметров пятен (d) и расстояние l в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	l , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	θ
-------	----------	------------	------------	------------	----------------------	----------

1						
2						

8. Рассчитайте угол расходимости излучения лазера θ .

Упражнение 3. Исследование поляризации излучения лазера

1. Вставьте поляроид в ход лазерного луча.
2. Включите милливольтметр и определите его показание в отсутствие лазерного излучения (фоновое значение) $U_{\text{ф}}$.
3. Включите лазер и убедитесь, что его луч попадает в окно фотоэлемента.
4. Вращая анализатор, добейтесь максимального показания милливольтметра.
5. Вращая анализатор по часовой стрелке, снимите зависимость показаний милливольтметра U_1 от угла поворота φ анализатора с шагом $\Delta\varphi = 10^\circ$ до возвращения к исходному значению φ . Результаты занесите в табл. 3.
6. Вращая анализатор против часовой стрелки, занесите в табл. 3 показания милливольтметра U_2 при тех же углах, что и в п. 5.
7. Рассчитайте среднее значение $U_{\text{ср}} = \frac{U_1 + U_2}{2}$ для каждого угла поворота и занесите его в табл. 3.
8. Из найденных средних значений $U_{\text{ср}}$ выделите максимальное U_{max} и заполните табл. 3 до конца.
9. Постройте на миллиметровой бумаге диаграмму зависимости величины $\frac{U_{\text{ср}} - U_{\text{ф}}}{U_{\text{max}}}$ от угла поворота анализатора φ .
10. Определите степень поляризации лазерного излучения по формуле
$$P = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}.$$
11. Сделайте выводы о виде и степени поляризации лазерного излучения.

Таблица 3

Номер опыта	U_1, B	U_2, B	U_{cp}, B	$\frac{U_{cp} - U_{\phi}}{U_{max}}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				

Контрольные вопросы

1. Чем отличается излучение лазеров от излучения других оптических источников? Чем обусловлено это различие?
2. Что такое спонтанное и индуцированное (вынужденное) излучение?
3. Что такое инверсная заселенность энергетических уровней и как она создается в гелий-неоновом лазере?
4. Почему для усиления происходящего через среду светового потока необходима инверсная заселенность энергетических уровней?
5. Каково назначение основных компонентов лазера?
6. Каков принцип работы газового и полупроводникового лазера?
7. Какие особенности энергетических состояний атомов He и Ne делают возможным создание инверсной населенности?
8. Каковы характеристики лазерного излучения? Для каких целей используется то или иное свойство лазерного излучения?
9. Зачем в газоразрядной трубке выходные окна ставятся под углом Брюстера?
10. Чем объясняется высокая направленность излучения лазера?

Пример варианта задания для защиты

Работа 7.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Вариант 99

1. Что такое спонтанное и индуцированное (вынужденное) излучение? В чем заключаются особенности индуцированного излучения?
2. Какие свойства лазерного излучения вы знаете? Где и для каких целей может применяться высокая степень поляризации лазерного излучения?

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 1. Значения коэффициента Стьюдента $t_{n,\alpha}$

α	Число измерений n										
	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
0,90	2,92	2,35	2,13	2,02	1,94	1,90	1,86	1,83	1,76	1,73	1,71
0,95	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26	2,14	2,09	2,06
0,99	9,92	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	2,98	2,86	2,80

Таблица 2. Дробные и кратные приставки к единицам измерения

Обозначение	Приставка	Множитель	Обозначение	Приставка	Множитель
n	Пико-	10^{-12}	da	Дека-	10^1
n	Нано-	10^{-9}	z	Гекто-	10^2
mk	Микро-	10^{-6}	k	Кило-	10^3
m	Милли-	10^{-3}	M	Мега-	10^6
c	Санتي-	10^{-2}	G	Гига-	10^9
d	Деци-	10^{-1}	T	Тера-	10^{12}

Некоторые константы и часто применяемые величины

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Элементарный электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Постоянная Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Постоянная Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Первая постоянная Вина $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К.

Вторая постоянная Вина $c = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м²·К⁵).

Постоянная Ридберга $R = 1,10 \cdot 10^7$ м⁻¹.

Применяемые внесистемные единицы измерения

Электрон-вольт (эВ): $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Атомная единица массы (а.е.м.): $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Кюри (Ки): $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$ расп./с.

Коэффициент поглощения (степень черноты) вольфрама α

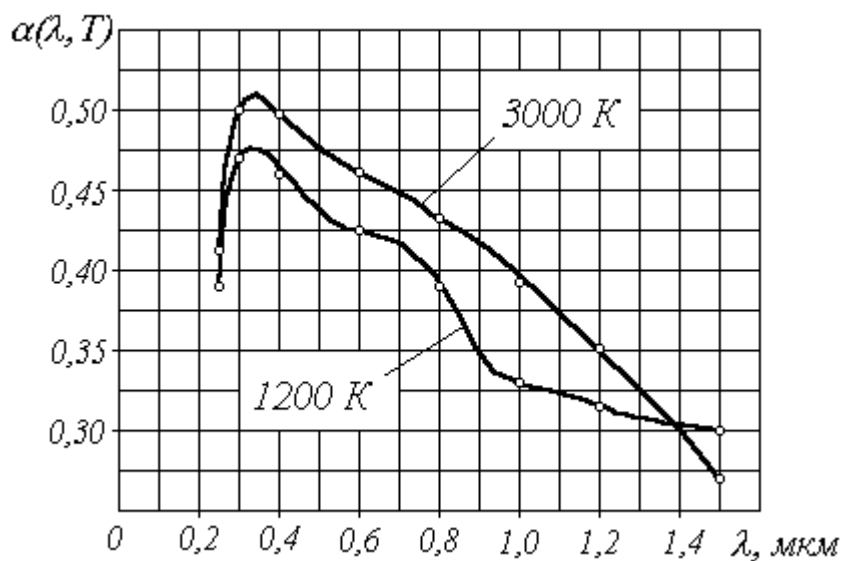


Таблица 3. Цветность чернотельного излучения

Температурный интервал, К	Цвет
До 1000	Красный
1000–1500	Оранжевый
1500–2000	Желтый
2000–4000	Бледно-желтый
4000–5500	Желтовато-белый
5500–7000	Чисто-белый
7000–9000	Голубовато-белый
9000–15000	Бело-голубой
Более 15000	Голубой

Таблица 4. Работа выхода электронов из металлов

Металл	A_0 , эВ	Металл	A_0 , эВ
Алюминий	3,74	Натрий	2,47
Железо	4,36	Платина	6,29
Калий	2,15	Серебро	4,70
Литий	2,39	Цезий	1,33
Медь	4,47	Цинк	3,94

**Таблица 5. Цветовые температуры
распространенных источников света**

Температура, К	Источник света
800	Начало видимого темно-красного свечения раскаленных тел
2000	Свет пламени свечи, натриевой лампы высокого давления
2360	Вакуумная лампа накаливания
2800–2854	Газонаполненные лампы накаливания с вольфрамовой спиралью
3200–3250	Типичные киносъемочные лампы
5500	Прямой солнечный дневной свет
6500	Стандартный источник дневного белого света
7500	Дневной свет с большой долей рассеянного от чистого голубого неба
100000	Источник с бесконечной температурой

Таблица 6. Характеристики некоторых частиц

Название частицы	Символ (обозначение)	Масса покоя		Заряд, Кл
		<i>а.е.м.</i>	<i>кг</i>	
Электрон	$e; {}_{-1}\beta^0$	0,00055	$9,11 \cdot 10^{-31}$	$-e = -1,6 \cdot 10^{-19}$
Протон	$p; {}_1\text{H}^1$	1,00728	$1,672 \cdot 10^{-27}$	$+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$
Нейтрон	${}_0n^1$	1,00867	$1,675 \cdot 10^{-27}$	0
α -частица	$\alpha; {}_2\text{He}^4$	4,00149	$6,64 \cdot 10^{-27}$	$+2e = 3,2 \cdot 10^{-19}$

**Таблица 7. Тип распада и период *T* полураспада
радиоактивных изотопов**

И з о т о п	Тип распада	T	И з о т о п	Тип распада	T
${}_{11}\text{Na}^{24}$	β^-	15 ч	${}_{84}\text{Po}^{210}$	α	138,4 сут
${}_{11}\text{Na}^{25}$	β^-	60 с	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	α	3,8 сут
${}_{12}\text{Mg}^{27}$	β^-	10 мин	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	α	1602 лет
${}_{15}\text{P}^{32}$	β^-	14,3 сут	${}_{90}\text{Th}^{229}$	α	7340 лет
${}_{27}\text{Co}^{60}$	β^-, γ	5,3 лет	${}_{92}\text{U}^{235}$	α	$7,1 \cdot 10^8$ лет
${}_{38}\text{Sr}^{90}$	β^-	27,7 лет	${}_{92}\text{U}^{239}$	β^-	23,5 мин

Таблица 8. Длины волн в спектре излучения неона

Цвет линии	Относительная яркость	Длина волны λ , нм
Красный	1	671,7
	3	667,8
	5	659,9
	5	653,3
	5	650,7
Ярко-красный	10	640,2
	10	638,3
	5	633,4
	2	630,5
	8	626,7
	3	621,7
	5	616,4
Красно-оранжевый	5	614,3
	3	609,6
	4	607,4
	2	603,0
	2	597,6
Оранжевый	3	594,5
	4	588,2
Желтый	10	585,3
	3	576,4
Зеленый	10	540,1
	5	534,1
	3	533,1
	2	503,1
Сине-зеленый	5	482,7

Таблица 9. Длины волн в спектре излучения гелия

Цвет линии	Длина волны λ , нм
Красный	705,6
	667,7
Желтый	587,6
Зеленый	504,8
	501,6
Зелено-голубой	492,2
Голубой	471,3
Синий	447,2
Фиолетовый	402,6

Таблица 10. Длины волн спектральных линий некоторых элементов

Эле- мент	λ , нм	Эле- мент	λ , нм	Эле- мент	λ , нм	Эле- мент	λ , нм
Ag Серебро	405,53	H Водород	410,174	Mg Магний	448,13	Ra Радий	434,06
	421,09		434,043		516,73		566,08
	421,27		434,050		517,27		620,03
	466,85		486,128		518,36		644,62
	520,91		486,133		552,85		648,73
	546,55		656,271	Na Натрий	466,86		698,02
	547,15		656,285		498,28		711,85
Ba Барий	455,40	He Гелий	402,62		514,91	Rb Рубидий	714,12
	493,41		447,15		515,36		722,52
	553,55		471,31		568,82		420,18
	577,77		492,19		588,996		421,57
	614,17		501,57		589,593		572,45
	649,69		587,56		615,42	Zn Цинк	607,07
	659,53		667,81		616,08		620,63
	705,99		706,57	Ne Неон	671,70		629,83
	712,03		728,13		667,83		740,82
Ca Кальций	728,03	Hg Ртуть	404,66		659,89	Sn Олово	451,13
	422,67		407,78		653,29		452,47
	445,48		434,75		650,65		563,17
	458,59		435,83		640,22		597,03
	643,91		491,60		638,30		603,77
	714,81		546,07		633,44	Cu Медь	614,97
	720,32		567,59		630,48		646,24
	732,61		576,96		626,65		405,77
Cd Кадмий	467,82		578,97		621,73		468,02
	479,99		579,07		616,36		472,22
	508,58		612,35		614,31		481,06
	609,92		690,72		609,62		518,20
	643,85		404,41		607,43		636,23
Cs Цезий	455,53	K Калий	533,97		603,00	Pb Свинец	402,27
	459,32		535,95		597,55		406,27
	584,47		578,26		594,48		453,08
	621,29		580,20		588,19		458,69
	658,65		691,13		585,25		465,11
	672,33		693,90		576,44		470,47
	687,04		766,49		540,06		510,55
	679,33		769,90		534,11		515,33
	722,85	Li Литий	413,23		533,08		521,82
			460,29		503,13		570,02
			497,20		482,73		578,22
			610,36				692,01
			624,01				757,01
			670,78				

Таблица 11. Диапазоны электромагнитного излучения

Название диапазона		Длины волн, λ	Источники
Радиоволны	Сверхдлинные	Более 10 км	Атмосферные явления, переменные токи в проводниках и электронных потоках (колебательные контуры)
	Длинные	10 км – 1 км	
	Средние	1 км – 100 м	
	Короткие	100 м – 10 м	
	Ультракороткие	10 м – 1 мм	
Оптическое излучение	Инфракрасное	1 мм – 780 нм	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях.
	Видимое	780 нм – 380 нм	
	Ультрафиолетовое	380 нм – 10 нм	Излучение атомов под действием ускоренных электронов
Ионизирующее излучение	Рентгеновское	10 нм – $5 \cdot 10^{-3}$ нм	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
	Гамма	Менее $5 \cdot 10^{-3}$ нм	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад

Таблица 12. Масса нейтральных атомов (а.е.м.)

Элемент	Изотоп	Масса	Элемент	Изотоп	Масса
Водород	${}^1_1\text{H}^1$	1,00783	Кислород	${}^{16}_8\text{O}^{16}$	15,99491
	${}^2_1\text{H}^2$	2,01410		${}^{17}_8\text{O}^{17}$	16,99913
	${}^3_1\text{H}^3$	3,01605	Фтор	${}^{19}_9\text{F}^{19}$	18,99840
Гелий	${}^3_2\text{He}^3$	3,01603	Натрий	${}^{22}_{11}\text{Na}^{22}$	21,99444
	${}^4_2\text{He}^4$	4,00260		${}^{23}_{11}\text{Na}^{23}$	22,98977
Литий	${}^6_3\text{Li}^6$	6,01513	Магний	${}^{23}_{12}\text{Mg}^{23}$	22,99414
Бериллий	${}^9_4\text{Be}^9$	9,01219	Алюминий	${}^{27}_{13}\text{Al}^{27}$	26,98154
Бор	${}^{10}_5\text{B}^{10}$	10,01294		${}^{30}_{13}\text{Al}^{30}$	29,99817
	${}^{11}_5\text{B}^{11}$	11,00931	Фосфор	${}^{32}_{15}\text{P}^{32}$	31,97391
Углерод	${}^{12}_6\text{C}^{12}$	12,00000	Калий	${}^{41}_{19}\text{K}^{41}$	40,96184
	${}^{13}_6\text{C}^{13}$	13,00335	Свинец	${}^{206}_{82}\text{Pb}^{206}$	205,97446
	${}^{14}_6\text{C}^{14}$	14,00324	Полоний	${}^{210}_{84}\text{Po}^{210}$	209,98297
Азот	${}^{13}_7\text{N}^{13}$	13,00574	Уран	${}^{235}_{92}\text{U}^{235}$	235,04393
	${}^{14}_7\text{N}^{14}$	14,00307		${}^{238}_{92}\text{U}^{238}$	238,05076

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ

ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Лабораторная работа 1.1

Изучение погрешностей измерения ускорения свободного падения

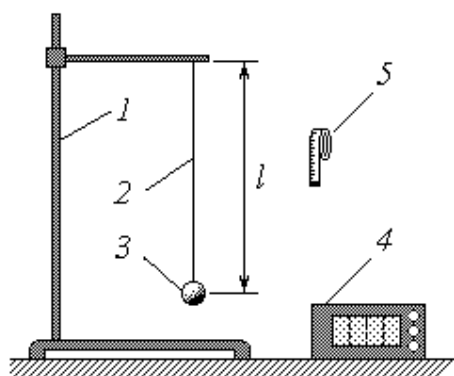
с помощью математического маятника

Цели работы:

1) изучение колебаний математического маятника: измерение периода его колебаний и определение ускорения свободного падения;

2) оценка случайной и приборной погрешностей измерения, изучение зависимости ширины доверительного интервала от числа опытов и доверительной вероятности.

Схема экспериментальной установки



1 – штатив;

2 – нить длиной l ;

3 – груз;

4 – секундомер;

5 – сантиметровая лента

Расчетные формулы

$$g = \frac{C}{t^2} ; C = (2\pi N)^2 \cdot l ,$$

где g – ускорение свободного падения; l – длина нити; N – число колебаний за время t (согласно рекомендациям $N = 5$).

Результат измерения длины нити: $l = 70,5 \text{ см} = 0,705 \text{ м}$.

Расчет константы C

$$C = (2\pi \cdot 5)^2 \cdot 0,705 = 695,807 \approx 696 \text{ м}.$$

Упражнение 1. Оценка погрешностей результата 25 измерений

Таблица 1

Номер опыта	t, c	$g, м/с^2$	$\Delta g, м/с^2$	$(\Delta g)^2, (м/с^2)^2$
1	8,16	10,46	0,69	0,4761
2	8,23	10,26	0,49	0,2401
3	8,30	10,10	0,33	0,1089
4	8,10	10,60	0,83	0,6889
5	8,75	9,09	-0,68	0,4624
6	8,05	10,75	0,98	0,9604
7	8,19	10,37	0,60	0,3600
8	8,32	10,05	0,28	0,0784
9	8,16	10,46	0,69	0,4761
10	8,29	10,13	0,36	0,1296
11	8,95	8,69	-1,08	1,1664
12	8,30	10,10	0,33	0,1089
13	8,43	9,79	0,02	0,0004
14	8,27	10,18	0,41	0,1681
15	8,58	9,44	-0,33	0,1089
16	8,64	9,32	-0,45	0,2025
17	8,60	9,42	-0,35	0,1225
18	8,55	9,51	-0,26	0,0676
19	8,54	9,54	-0,23	0,0529
20	8,33	10,02	0,25	0,0625
21	8,74	9,11	-0,66	0,4356
22	8,45	9,73	-0,04	0,0016
23	8,71	9,18	-0,59	0,3481
24	8,86	8,87	-0,90	0,8100
25	8,79	9,00	-0,77	0,5929
$\Sigma =$		244,17	$\Sigma =$	8,2298

Пример расчета

$$g = \frac{C}{t^2} = \frac{696}{8,16^2} = 10,4571 \approx 10,46 \text{ м/с}^2.$$

Расчет случайной ошибки

1. Среднее значение

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n g_i = \frac{1}{25} \cdot 244,17 = 9,7668 \approx 9,77 \text{ м/с}^2.$$

2. Среднеквадратичная ошибка

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta g_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{25 \cdot 24} \cdot 8,2298} \approx 0,117 \text{ м/с}^2.$$

3. Коэффициент Стьюдента для $\alpha = 0,95$ и $n = 25$

$$t_{n,\alpha} = 2,06;$$

4. Случайная ошибка

$$\Delta_s g = t_{n,\alpha} \cdot \sigma = 2,06 \cdot 0,117 \approx 0,241 \text{ м/с}^2.$$

Расчет приборной ошибки

1. Абсолютные ошибки прямых измерений:

1.1. Длины $\delta l = \frac{Ц}{2} = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ см} = 0,0025 \text{ м}$, где $Ц = 0,5 \text{ см}$ – цена деления сантиметровой ленты.

1.2. Времени $\delta t = Ц = 0,01 \text{ с}$, где $Ц = 0,01 \text{ с}$ – цена деления секундомера.

2. Относительные ошибки прямых измерений:

$$2.1. \text{Длины } E_l = \frac{\delta l}{l} = \frac{0,0025}{0,705} \approx 0,00355.$$

$$2.2. \text{Времени } E_t = \frac{\delta t}{t} = \frac{0,01}{8} \approx 0,00125.$$

3. Абсолютная ошибка косвенного измерения

$$\delta g = \bar{g} \cdot \sqrt{(E_l)^2 + (2E_t)^2} = 9,77 \cdot \sqrt{0,00355^2 + (2 \cdot 0,00125)^2} \approx 0,0424 \text{ м/с}^2.$$

Полная ошибка

1. Абсолютная $\Delta_s g = 0,241 \gg \delta g = 0,0424 \Rightarrow \Delta \approx \Delta_s g \approx 0,24 \text{ м/с}^2$.

2. Относительная $E = \frac{\Delta}{\bar{g}} \cdot 100 \% = \frac{0,241}{9,77} \cdot 100 \% \approx 2,5 \%$.

Окончательный результат для 25 измерений

$g = (9,77 \pm 0,24) \text{ м/с}^2 \text{ при } n = 25, \alpha = 0,95;$ $E = 2,5 \%$.

Упражнение 2. Оценка погрешностей результата 5 измерений

Из таблицы 1 (прилож. 2) выбраны результаты № 11, 12, 13, 14 и 15.

Таблица 2

Номер опыта	$g,$ $м/с^2$	$\Delta g,$ $м/с^2$	$(\Delta g)^2,$ $(м/с^2)^2$
1	10,46	-0,95	0,9025
2	10,26	0,46	0,2116
3	10,10	0,15	0,0225
4	10,60	0,54	0,2916
5	9,09	-0,20	0,0400
$\Sigma =$	48,20	$\Sigma =$	1,4682

Расчет случайной ошибки для $\alpha = 0,95$

1. Среднее значение

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n g_i = \frac{1}{5} \cdot 48,20 = 9,64 \text{ м/с}^2.$$

2. Среднеквадратичная ошибка

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta g_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{5 \cdot 4} \cdot 1,4682} \approx 0,271 \text{ м/с}^2.$$

3. Коэффициент Стьюдента для $\alpha = 0,95$ и $n = 5$

$$t_{n,\alpha} = 2,78.$$

4. Случайная ошибка

$$\Delta_s g = t_{n,\alpha} \cdot \sigma = 2,78 \cdot 0,271 \approx 0,753 \text{ м/с}^2.$$

Полная ошибка

1. Абсолютная $\Delta_s g = 0,753 \gg \delta g = 0,0424 \Rightarrow \Delta \approx \Delta_s g \approx 0,75 \text{ м/с}^2.$

2. Относительная $E = \frac{\Delta}{\bar{g}} \cdot 100 \% = \frac{0,753}{9,64} \cdot 100 \% \approx 7,8 \%$.

Окончательный результат для 5 измерений при $\alpha = 0,95$

$$g = (9,64 \pm 0,75) \text{ м/с}^2 \text{ при } n = 5, \alpha = 0,95;$$

$$E = 7,8 \%.$$

Расчет случайной ошибки для $\alpha = 0,90$

1. Коэффициент Стьюдента для $\alpha = 0,90$ и $n = 5$

$$t_{n,\alpha} = 2,13.$$

2. Случайная ошибка

$$\Delta_s g = t_{n,\alpha} \cdot \sigma = 2,13 \cdot 0,271 \approx 0,577 \text{ м/с}^2.$$

3. Полные ошибки:

3.1. Абсолютная $\Delta_s g = 0,577 \gg \delta g = 0,0424 \Rightarrow \Delta \approx \Delta_s g \approx 0,58 \text{ м/с}^2$.

3.2. Относительная $E = \frac{\Delta}{\bar{g}} \cdot 100 \% = \frac{0,577}{9,64} \cdot 100 \% \approx 6,0 \%$.

Окончательный результат для пяти измерений при $\alpha = 0,90$

$g = (9,64 \pm 0,58) \text{ м/с}^2 \text{ при } n = 5, \alpha = 0,90;$ $E = 6,0 \%.$
--

Выводы

1. Экспериментальное определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника сопряжено со значительными погрешностями.

2. Расчеты показывают, что при использовании данного метода случайная ошибка на порядок превышает приборную.

3. Полученные доверительные интервалы во всех случаях содержат в себе истинное значение величины $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$.

4. При одном и том же значении доверительной вероятности ($\alpha = 0,95$) ошибка измерений тем меньше, чем больше их число n .

5. Для одного и того же количества измерений ($n = 5$) снижение доверительной вероятности (надежности) приводит к уменьшению ширины доверительного интервала.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ

1. Расчет случайной ошибки

При расчете ошибок рекомендуется записать результаты измерений в виде

Номер опыта	...	x_i	Δx_i	$(\Delta x_i)^2$
		1	2	3
1	...			
2	...			
...	...			
n	...			
$\Sigma =$		A	$\Sigma =$	B

где n – количество опытов; x_i – текущее значение измеряемой величины; i – номер текущего измерения.

Порядок расчета:

1) рассчитайте сумму значений первого столбца $\sum_{i=1}^n x_i$ и записать в **A**;

2) рассчитайте среднее значение измеряемой величины $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{A}{n}$

и округлить его до того же количества знаков после запятой, что и x_i ; 3) заполните столбец 2, рассчитав отклонение: $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$;

4) заполните столбец 3, возведя значение Δx_i в квадрат (заполнение столбцов 2 и 3 удобно производить параллельно);

5) рассчитайте сумму значений третьего столбца $\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$ и запишите в ячейку **B**;

6) рассчитайте среднеквадратическую ошибку: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}} B$;

7) выберите значение коэффициента Стьюдента $t_{n,\alpha}$ (см. табл. 1, прилож. 1), который зависит от количества опытов n и доверительной вероятности α (как правило, $\alpha = 0,95$);

8) рассчитайте случайную погрешность: $\Delta_s x = t_{n,\alpha} \cdot \sigma$.

2. Расчет приборной ошибки

В большинстве физических экспериментов искомая величина x_i не измеряется непосредственно каким-либо одним прибором, а рассчитывается на основе измерения ряда промежуточных величин $y, k, \dots z$.

Порядок расчета:

1) определите абсолютные ошибки прямых измерений величин $y, k, \dots z - \delta y, \delta k$ и т.д. (для приборов со шкалой $\delta y = C/2$, где C – цена деления прибора; для цифровых приборов $\delta y = C$; для электроизмерительных приборов $\delta y = \frac{K \cdot \Pi}{100}$, где K – класс точности прибора, Π – его предел измерения; для некоторых приборов их абсолютная ошибка указана непосредственно на приборе или в его паспорте);

2) найдите относительные ошибки прямых измерений $E_y = \frac{\delta y}{y}$; $E_z = \frac{\delta z}{z}$ и т.д., где y, z – значения величин из самого представительного опыта таблицы (опыта с наименьшим отклонением от среднего Δx_i);

3) рассчитайте абсолютную ошибку косвенного измерения величины $x - \delta x$ (формула для расчета приборной ошибки указана в конце описания лабораторной работы и зависит от расчетной формулы для величины x).

3. Расчет полной ошибки и запись окончательного результата

1. Рассчитайте абсолютную полную ошибку, объединив случайную Δ_{sx} и приборную δx ошибки: $\Delta = \sqrt{(\Delta_{sx})^2 + (\delta x)^2}$.

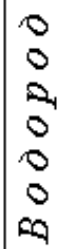
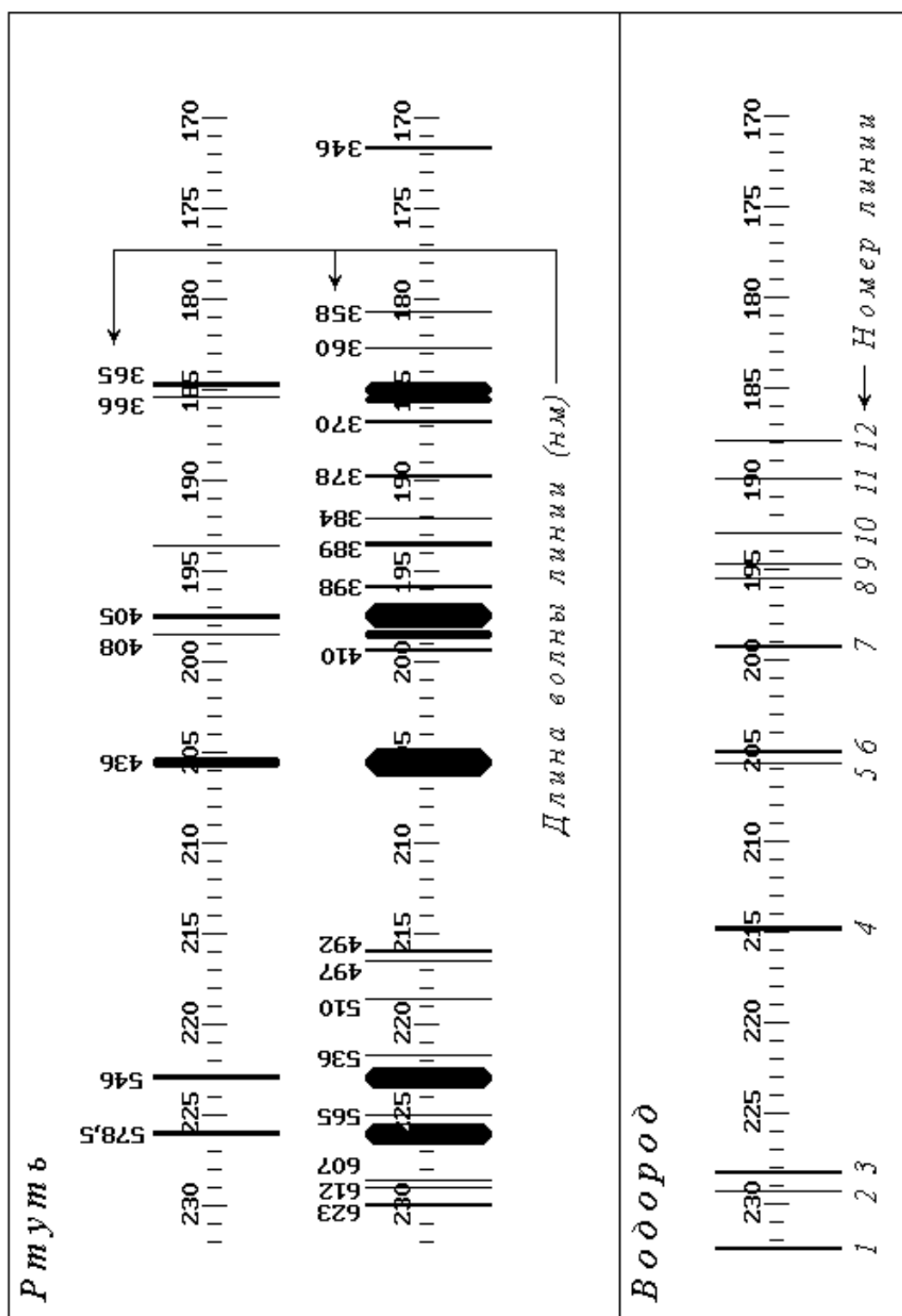
2. Рассчитайте относительную полную ошибку по формуле $E = \frac{\Delta}{\bar{x}} \cdot 100 \%$.

3. Запишите окончательный результат в виде

$$x = (\bar{x} \pm \Delta) \text{ ед при } n = \dots, \alpha = \dots; \\ E = \dots \%$$

При записи окончательного результата среднее значение искомой величины \bar{x} и абсолютная полная ошибка Δ должны быть выражены в одинаковых единицах (ед.) и округлены до равного количества знаков после запятой.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. СПЕКТРОГРАММЫ РТУТИ И ВОДОРОДА



ПРИЛОЖЕНИЕ 5. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Таблица 1. Обозначения измеряемой величины и единиц измерений приборов

Обозначение	Назначение прибора	Единицы измерения
A	Амперметр	А
mA	Миллиамперметр	мА
μA	Микроамперметр	мкА
V	Вольтметр	В
kV	Киловольтметр	кВ
Ω	Омметр	Ом
$M \Omega$	Мегаомметр	МОм
W	Ваттметр	Вт
Hz	Частотомер	Гц

Таблица 2. Обозначение системы механизма прибора

Обозначение	Система механизма прибора
	Магнитоэлектрическая
	Электромагнитная
	Электродинамическая
	Электростатическая

Если символ системы механизма прибора обведен в рамку, то прибор защищен от внешних полей. Примеры:



– прибор магнитоэлектрической системы, защищенный от воздействия магнитного поля;



– прибор электростатической системы, защищенный от воздействия электрического поля.

Обозначения класса точности прибора




1,5,  или  – класс точности прибора равен 1,5.

Таблица 3. Обозначения зажимов

Обозначение	Назначение зажима
+	Положительный зажим
-	Отрицательный зажим
*	Общий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов)
	Зажим, соединенный с корпусом прибора







	Зажим для заземления
---	----------------------

Таблица 4. Обозначение условий работы приборов

Обозначение	Условия работы
—	Прибор для измерения параметров постоянного тока
~	Прибор для измерения параметров переменного тока
≈	Прибор для измерения параметров постоянного и переменного токов
↑ или 	Прибор устанавливается в вертикальном положении
→ или 	Прибор устанавливается в горизонтальном положении
	Прибор устанавливается под углом 60° к горизонту
500 Hz	Прибор работает на частоте 500 Гц (если частота отличается от 50 Гц, которая на шкале не указывается)
45–550 Hz	Прибор работает в диапазоне частот 45–550 Гц
	Изоляция прибора испытана на напряжение 2 кВ
	Изоляция прибора испытана на напряжение 2 кВ (на старых типах приборов)
Б	Прибор, предназначенный для работы в закрытых сухих неотапливаемых помещениях*
В ₁ , В ₂ , В ₃	Приборы, рассчитанные на работу в полевых, морских условиях и в передвижных установках соответственно*
ВП	Вибропрочный прибор, способный нормально работать по прекращению вибрационной нагрузки
ВН	Вибронечувствительный прибор, способный работать в условиях воздействия вибрации, указанной в паспорте
УДП	Ударопрочный прибор, способный работать после воздействия на него ударов, предусмотренных в паспорте
Гм	Герметичный прибор
Бз	Брызгозащищенный прибор
Вз	Влагозащищенный прибор
Гз	Газозащищенный прибор
Пз	Пылезащищенный прибор
Т	Прибор, способный работать в условиях тропического климата

Примечание: * – приборы класса А, предназначенные для работы в закрытых сухих отапливаемых помещениях (лабораториях); не имеют буквенного обозначения на шкале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лабораторный практикум по физике. Ч. 1. Механика и молекулярная физика: учебное пособие / А.В. Твардовский [и др.]. Тверь: ТвГТУ, 2019. 96 с.
2. Клиnger А.В., Дергунов П.И. Сборник вопросов и заданий для подготовки к защите лабораторных работ по физике. Механика. Колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм. Тверь: ТГТУ, 2009. 32 с.
3. Клиnger А.В., Испирян Р.А., Твардовский А.В. Лабораторный практикум по физике: методические указания к лабораторным работам. Тверь: ТГТУ, 2003. 167 с.
4. Испирян С.Р., Кривенко И.В. Электроизмерительные приборы: методические указания к лабораторным работам. Тверь: ТГТУ, 2008. 32 с.
5. Гершензон Е.М. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике. М.: Академия, 2004. 464 с.
6. Описание лабораторных работ по физике. Измерительный практикум. Ч. 1. Новосибирск: НГУ, 1999. 96 с.
7. Савельев И.В. Курс общей физики: учебное пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям: в 3 т. СПб.: Лань, 2016. Т. 2. 500 с.
8. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. М.: Академия, 2015. 556 с.
9. Детлаф А.А. Курс физики. М.: Академия, 2007. 720 с.
10. Сквайрс Дж. Практическая физика. М.: Мир, 1971. 246 с.

11. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.
12. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: учебное пособие для вузов. М.: Физматлит, 2008. 640 с.
13. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. М.: Высшая школа, 1982. 224 с.
14. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.
15. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. С.-Пб.: Лань, 2005. 112 с.
16. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы. М.: Физматлит, 2006. 424 с.
17. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. М.: Физматкнига, 2005. 384 с.
18. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 479 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Требования к подготовке, оформлению и защите лабораторных работ.....	4
Часть V. Методические указания к лабораторным работам.....	6
1. Квантовая оптика.....	6
Лабораторная работа 5.1. Изучение законов теплового излучения с помощью яркостного пирометра.....	6
Лабораторная работа 5.2. Фотоэффект.....	16
2. Атомная и ядерная физика.....	24
Лабораторная работа 6.1. Изучение оптических спектров испускания. Атом водорода.....	24
Лабораторная работа 6.2. Определение энергии активации полупроводника.....	32
Лабораторная работа 6.3. Снятие вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.....	39
Лабораторная работа 6.4. Радиоактивность. Поглощение β -излучения в воздухе.....	44
3. Дополнительные работы.....	53
Лабораторная работа 7.1. Исследование модели абсолютно черного тела методом измерения температуры контактным и оптическим способами.....	53
Лабораторная работа 7.2. Исследование спектров поглощения и пропускания	59
Лабораторная работа 7.3. Определение характеристик лазерного излучения.....	66
Приложения.....	77
Приложение 1. Справочные материалы.....	77
Приложение 2. Образец оформления отчета по лабораторной работе.....	83
Приложение 3. Алгоритм расчета погрешностей.....	88
Приложение 4. Спектрограммы ртути и водорода.....	90
Приложение 5. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов.....	91
Библиографический список.....	93

**Андрей Викторович Твардовский
Павел Игоревич Дергунов
Анна Владимировна Зубкова
Светлана Рафаиловна Испирян
Ирина Валерьевна Кривенко**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

ЧАСТЬ 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 01.06.2021

Формат 60 х 84/16

Физ. печ. л. 6

Тираж 200 экз.

Усл. печ. л. 5,58

Заказ № 30

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 5,22

С – 29

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22