

53(07)

П – 691

№1340а



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Технологический институт  
Федерального государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального  
образования  
"Южный федеральный университет"**

**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ "ОБРАЗОВАНИЕ"**

**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

**ПРАКТИКУМ**  
**по дисциплине ФИЗИКА**  
**раздел КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**  
(по направлениям подготовки: естественные науки  
и математика; информационная безопасность;  
техника и технологии)

Учебное пособие

**ЕГФ**

Таганрог 2007

УДК 53(076.5) +530.145(076.5)

Составители: Арзуманян Г.В. (№ 611), Гатько Л.Е. (№ 606), Доценко И.Б. (№ 604), Колпачев А.Б. (№ 612), Красюк И.Б. (№ 601), Набоков Г.М. (№ 603), Нестюрина Е.Е. (№ 603), Сапогин В.Г. (№ 602, № 610), Филипенко Н.А. (№ 604), Филипьева Н.Н. (№ 601, № 602).

Практикум по дисциплине "Физика" раздел "Квантовая физика". – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 95 с.

Практикум содержит необходимый теоретический материал для выполнения лабораторных работ по квантовой физике, схемы установок и последовательность выполнения заданий.

Табл.7. Ил. 27. Библиогр.: 4 назв.

Рецензенты:

Х.Б. Хоконов, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики конденсированного состояния КБГУ, г. Нальчик;

А.И. Жорник, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической физики ТТПИ.

## ВВЕДЕНИЕ

Квантовая физика возникла и в основном сформировалась в первой трети XX столетия. Возникновение и развитие квантовой физики связано с именами М. Планка, А. Эйнштейна, Л. де Бройля, Н. Бора, В. Гейзенберга, Э. Шредингера, В. Паули. Значительный вклад внесли советские физики Л.Д. Ландау, В.А. Фок, А.Ф. Иоффе и др.

В квантовой физике существуют несколько основных принципов.

**1. Дискретность состояний.** Физическая система (например, электрон в кулоновском поле атомного ядра) может находиться лишь в отдельных дискретных состояниях. Переход между этими состояниями может быть самопроизвольным (спонтанным) или вызванным внешними воздействиями (индуцированные переходы). В частности, состояние системы может изменяться и непрерывно (свободный электрон).

**2. Корпускулярно-волновой дуализм.** Один и тот же физический объект в некоторых физических явлениях может вести себя как волна, а в других – как поток частиц.

**3. Принцип неопределенности.** Существуют пары физических величин (импульс и координата, время и энергия), которые одновременно в одном и том же состоянии системы не могут иметь точных значений, и чем меньше интервал возможных значений одной из них, тем больше такой интервал для другой.

Существует и ряд других характерных черт квантовой физики, коренным образом отличающих ее от классической физики – физики привычных для человека пространственных масштабов, промежутков времени, значений масс, импульсов и т.д. Законы квантовой физики кажутся нам на первый взгляд парадоксальными и непонятными именно потому, что в повседневной практике мы не сталкиваемся с их проявлениями. В этом – трудность изучения квантовой физики. Помочь

студентам преодолеть эту трудность – цель предлагаемого цикла лабораторных работ.

Квантовая физика возникла не на пустом месте. К ее созданию привело развитие наших знаний об окружающем нас материальном мире. Можно выделить два основных направления развития квантовой физики.

1. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Попытка с точки зрения классической физики вычислить и объяснить распределение по частотам энергии электромагнитного излучения, находящегося в тепловом равновесии с веществом полости, внутри которой заперто излучение, привела к противоречию не только с экспериментальными данными, но и со здравым смыслом (так называемая ультрафиолетовая катастрофа). Предложенная М.Планком гипотеза о том, что излучение испускается и поглощается отдельными порциями – квантами - привела к разумной формуле, блестяще подтвержденной экспериментом. Изучению теплового излучения и его законов посвящены в нашем цикле работы № 601 и 602.

Кроме того, к концу XIX в. стали известны такие явления, как фотоэффект, эффект Комптона (упругое рассеяние электромагнитного излучения на свободных электронах), которые можно объяснить, лишь предположив, что излучение представляет собой поток частиц – фотонов. В нашем практикуме законы фотоэффекта изучаются в работе № 603.

2. Атомная физика, в частности исследование спектра испускания водорода. В предлагаемом цикле лабораторная работа № 604 посвящена этой теме.

Одним из наиболее важных разделов квантовой физики является квантовая механика. Для будущих инженеров важно познакомиться с современной физикой твердого тела, основанной на квантовой физике. Этой области физики посвящена работа № 606. В работе № 611 исследуются волновые свойства микрочастиц, в работах № 610 и 612 – некоторые вопросы атомной физики.

Следует отметить, что квантовая физика является основой многих важных разделов современной физики и техники: физики твердого тела, твердотельной электроники, лазерной физики и др. Без глубокого изучения этого раздела невозможно понять новые перспективные направления в радиотехнике и нанoeлектронике. Поэтому глубокое знание квантовой физики необходимо современному инженеру.

Авторы надеются, что практикум по квантовой физике поможет студентам глубоко овладеть этой трудной, но важной и интересной областью современной науки.

## **601. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА ИЗ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

### **601.1. Цель работы**

Опытное определение постоянной Планка.

### **601.2. Разделы теории**

Тепловое излучение. Законы Кирхгофа, Стефана – Больцмана; закон смещения Вина. Формула Планка. Излучательная и поглощательная способность, спектральная плотность, интегральная светимость. [1. Гл.1, §1 – 7]; [2. Гл. 26, §197 – 200]

### **601.3. Приборы и принадлежности**

Лабораторная установка, вольтметр, амперметр, омметр, набор светофильтров.

### **601.4. Теоретическое введение**

Принцип измерения постоянной Планка в данной работе основан на использовании законов теплового излучения.

Тепловое излучение характеризуется мощностью, излучаемой единицей поверхности тела при постоянной температуре  $T$ . Оказывается, что при данной температуре максимально возможную теоретически мощность с единицы поверхности может излучать тело, которое называется абсолютно черным. Мощность, излучаемая единицей поверхности тела при данной температуре во всем диапазоне частот, называется энергетической светимостью  $R$ . Мощность, излучаемая с единицы поверхности тела в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$  при постоянной температуре, пропорциональна интервалу частот

$$dR_{\nu,T} = r_{\nu,T} d\nu, \quad (601.1)$$

где  $r_{\nu,T}$  – излучательная способность тела (спектральная плотность энергетической светимости), являющаяся функцией частоты излучения  $\nu$  и температуры излучающей поверхности  $T$ .

Из (601.1) следует связь энергетической светимости с излучательной способностью:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu. \quad (601.2)$$

Согласно закону Стефана – Больцмана, энергетическая светимость абсолютно черного тела  $R^*$  пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$  излучающей поверхности

$$R^* = \sigma T^4, \quad (601.3)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Для реальных тел (в данной работе нить накаливания лампочки) при равных температурах энергетическая светимость  $R$  меньше энергетической светимости абсолютно черного тела  $R^*$ :

$$R = \alpha R^*, \quad (601.4)$$

где  $\alpha < 1$  – коэффициент нечерности излучающего тела.

Полная мощность  $P$ , излучаемая со всей поверхности  $S$  однородного тела, с учетом (601.3) и (601.4) может быть вычислена по формуле

$$P = \alpha \sigma T^4 S. \quad (601.6)$$

В 1900 г М. Планком была получена явная зависимость излучательной способности абсолютно черного тела  $r_{\nu,T}^*$  от частоты  $\nu$  и температуры  $T$ :

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (601.6)$$

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

Из (601.2) с учетом (601.6) может быть получена формула для энергетической светимости абсолютно черного тела

$$R^* = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4. \quad (601.7)$$

Сравнивая выражения (601.3) и (601.7), получим постоянную Стефана – Больцмана в явном виде:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}. \quad (601.8)$$

Постоянная Планка входит в выражения для постоянной Стефана - Больцмана (601.8) и излучательной способности абсолютно черного тела (601.6), что позволяет определить ее численное значение из эксперимента.

### 601.5. Описание установки и методика измерений

Экспериментальная установка состоит из обычной лампочки накаливания с вольфрамовой нитью, светофильтра и приемника излучения (фоторезистора) (рис.601.1).

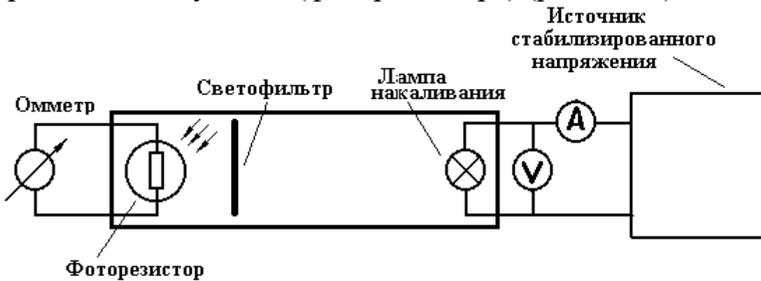


Рис. 606.1

При прохождении электрического тока, нить накаливания лампочки нагревается и излучает свет в широком диапазоне частот в видимой и инфракрасной областях спектра. Подводимая к лампочке электрическая мощность  $N$  может изменяться переключателем и измеряться с помощью амперметра и

вольтметра, включенных в цепь питания лампочки. Поскольку не вся подводимая электрическая мощность  $N$  преобразуется в световое излучение, то можно записать

$$P = \eta N, \quad (601.9)$$

где  $P$  – излучаемая лампочкой мощность (601.5);  $\eta$  – коэффициент полезного действия лампочки.

С учетом (601.5) выражение (601.9) примет вид

$$N = \frac{\alpha}{\eta} \sigma T^4 S. \quad (601.10)$$

Для лампы накаливания коэффициент полезного действия  $\eta$  и коэффициент нечерноты  $\alpha$ , а следовательно, и их отношение зависят от электрической мощности  $N$ , подводимой к лампе:

$$A = \frac{\alpha}{\eta} = A(N). \quad (601.11)$$

Тогда с учетом (601.11) выражение (601.10) примет вид

$$N = A(N) \sigma T^4 S. \quad (601.12)$$

Свет от нити накаливания проходит через светофильтр и попадает на фоторезистор, с помощью которого измеряется интенсивность света  $I_\nu$ , прошедшего через светофильтр. Измеряемая интенсивность света  $I_\nu$ , очевидно, пропорциональна интенсивности света  $I'_\nu$ , излучаемой лампочкой в диапазоне частот пропускаемых светофильтром  $I_\nu \sim I'_\nu$ , а значит, пропорциональна излучательной способности абсолютно черного тела. При условии  $\Delta\nu \ll \nu$  запишем

$$I_\nu \sim I'_\nu \sim r_{\nu,T}^* \Delta\nu = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \Delta\nu. \quad (601.13)$$

Здесь учтено соотношение (601.6). Поскольку интенсивность света  $I_\nu$  регистрируют с помощью фоторезистора путем измерения его сопротивления, то необходимо установить зависимость сопротивления  $R$  от

интенсивности света, падающего на фоторезистор  $I_v$ . Из закономерностей внутреннего фотоэффекта следует, что, с одной стороны, концентрация свободных носителей заряда  $n$  пропорциональна количеству фотонов, падающих на фоторезистор, т.е. интенсивности света  $I_v$  ( $n \sim I_v$ ). С другой стороны, сопротивление фоторезистора  $R$  пропорционально его удельному сопротивлению  $\rho$  при неизменных геометрических размерах ( $R \sim \rho$ ); удельное сопротивление  $\rho$ , в свою очередь, обратно пропорционально концентрации свободных носителей заряда  $n$  ( $\rho \sim 1/n$ ). Суммируя сказанное выше, можно заключить, что сопротивление фоторезистора  $R$  обратно пропорционально интенсивности света, падающего на фоторезистор, т.е.

$$R \sim \frac{1}{I_v}. \quad (601.14)$$

Из (601.13) и (601.14) следует, что

$$\frac{1}{R} \sim \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \Delta\nu. \quad (601.15)$$

Измерение постоянной Планка основано на использовании соотношений (601.8), (601.12) и (601.15).

Для двух значений  $N_1$  и  $N_2$  электрической мощности, подаваемой на лампочку, измеряются соответствующие величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  фоторезистора.

Кратко опишем последовательность математических преобразований, приводящих к расчетной формуле для постоянной Планка.

Из (601.15) имеем для двух значений мощности  $N_1$ ,  $N_2$  и одного и того же диапазона частот следующее соотношение:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{e^{h\nu/kT_2} - 1}{e^{h\nu/kT_1} - 1}.$$

Так как для частот  $\nu$  диапазона видимого света и температур нити накаливания лампочки  $T$  имеем  $h\nu \gg kT$ , то в числителе и знаменателе рассматриваемого равенства можно пренебречь единицей по сравнению с экспонентой, поэтому

$$\frac{R_2}{R_1} = \exp \left[ \frac{h\nu (T_1 - T_2)}{k T_1 T_2} \right].$$

Логарифмируя последнее соотношение и подставляя в него значения температур, полученные из (601.12), запишем

$$T_1 = \left[ \frac{N_1}{A(N_1)\sigma S} \right]^{1/4} \quad \text{и} \quad T_2 = \left[ \frac{N_2}{A(N_2)\sigma S} \right]^{1/4}.$$

Возведя обе части равенства в четвертую степень, получим

$$\left( \ln \frac{R_2}{R_1} \right)^4 = \left( \frac{h\nu}{k} \right)^4 \frac{\sigma S \{ [N_1 A(N_2)]^{1/4} - [N_2 A(N_1)]^{1/4} \}^4}{N_1 N_2}.$$

Подставим в это соотношение выражение (601.8), после чего для постоянной Планка  $h$  получим

$$h = \frac{15c^2}{2\pi^5 \nu^4 S} \frac{N_1 N_2}{\{ [N_1 A(N_2)]^{1/4} - [N_2 A(N_1)]^{1/4} \}^4} \left( \ln \frac{R_2}{R_1} \right)^4. \quad (601.16)$$

Из последнего соотношения видно, что для определения постоянной Планка необходимо знать зависимость коэффициента  $A(N) = \alpha / \eta$  (601.11) от величины подводимой к лампочке электрической мощности. Для лампочки, используемой в данной работе, в диапазоне рабочих мощностей  $N$  коэффициент  $A(N)$  очень слабо зависит от  $N$ , поэтому для практических расчетов используется среднее значение  $\langle A(N) \rangle = A_0$ . Поскольку используемые в работе светофильтры имеют достаточно большие полосы пропускания по частоте  $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ , то последовательный учет этого факта приводит к необходимости проводить интегрирование выражения (601.13)

$$I'_\nu \sim \int_{\nu_1}^{\nu_2} r_{\nu, T}^* d\nu.$$

Кроме того, в этом случае необходимо учитывать характеристики фоторезистора. Оба последних факта можно

учесть, введя поправочный коэффициент  $B_v$  в формулу (601.16). Тогда (601.16) примет вид

$$h = \frac{15c^2}{2\pi^5 \nu^4 S} \frac{1}{SA_0} \frac{B_v}{\nu^4} \frac{N_1 N_2}{(N_1^{1/4} - N_2^{1/4})^4} \left( \ln \frac{R_2}{R_1} \right)^4.$$

Постоянная величина  $15c^2 / 2\pi^5 = 2,20 \cdot 10^{15} \text{ м}^2/\text{с}^2$ , поэтому окончательно расчетная формула для постоянной Планка примет вид

$$h = 2,20 \cdot 10^{15} \frac{1}{SA_0} \frac{B_v}{\nu^4} \frac{N_1 N_2}{(N_1^{1/4} - N_2^{1/4})^4} \left( \ln \frac{R_2}{R_1} \right)^4. \quad (601.17)$$

### 601.6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с внешним видом установки и приборов, используемых в работе; определить, на каких пределах шкал приборов будут производиться измерения мощности и сопротивления фоторезистора. Определить цену деления шкал приборов и точность приборов. Данные занести в протокол.

2. Записать в протокол характеристики установки и используемых светофильтров:  $S$  – площадь нити накаливания лампочки;  $A_0$  – среднее значение отношения коэффициента нечерности нити накаливания к коэффициенту полезного действия лампочки в рабочем диапазоне мощностей;  $\nu_1$  – средние частоты пропускания используемых в работе светофильтров;  $B_{\nu_1}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие конечность полосы пропускания светофильтров и частотную характеристику фоторезистора. Эти данные указаны в таблице на лабораторном столе.

3. Вставить в кассету перед фоторезистором один из светофильтров.

4. Включить омметр кнопкой «Сеть». Прогреть 5-7 минут.

5. Включить блок питания установки тумблером «Сеть».

6. Выставить выбранное из рабочего диапазона значение мощности, подводимой к лампе накаливания.

**Указание.** Рабочий диапазон мощности, подводимой к лампочке, устанавливается в данной работе в пределах 6–12 Вт.

7. Через 2 - 3 минуты измерить сопротивление  $R_1$  фоторезистора, соответствующее мощности  $N_1$ . Записать в таблицу протокола значения  $N_1$  и  $R_1$ .

8. Повторить измерения, указанные в пп.6-7 для другого уровня мощности  $N_2$  и соответствующее  $R_2$  фоторезистора. Данные записать в таблицу.

9. Повторить измерения согласно пп.6-8 для других светофильтров. Данные записать в таблицу.

10. Произвести расчет постоянной Планка по формуле (601.17) для частот пропускания светофильтров, используемых в работе.

11. Оценить погрешность измерения постоянной Планка, используя данные по классу точности ваттметра и полагая, что основной вклад в погрешность вносит множитель  $N_1 \cdot N_2$ .

12. Представить результаты расчетов в стандартном виде. Сравнить полученные значения постоянной Планка с табличным значением  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с и сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип измерения постоянной Планка в данной работе?

2. Каковы особенности теплового излучения по сравнению с другими видами излучения?

3. Можно ли в данной методике измерения постоянной Планка использовать излучение нетепловых источников света, например, излучение лазера?

4. Перечислите и сформулируйте основные закономерности теплового излучения.

5. Приведите соображения, подтверждающие, что между проводимостью фоторезистора и интенсивностью света, падающего на фоторезистор, существует пропорциональная зависимость.

6. Продумайте, как в данной работе оценить влияние на результат измерения постоянной Планка того факта, что светофильтр обладает конечным диапазоном частот пропускания.

7. Как изменится расчетная формула для постоянной Планка:

а) если нить накаливания лампочки считать абсолютно черным телом?

б) если считать, что вся подводимая к лампочке электрическая мощность идет на излучение света?

8. Какой вид принимает формула Планка для низких ( $h\nu \ll kT$ ) и высоких ( $h\nu \gg kT$ ) частот?

## **602. ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТЫХ СВЕЯЩИХСЯ ТЕЛ ЯРКОСТНЫМ ПИРОМЕТРОМ**

### **602.1. Цель работы**

Ознакомиться с основными понятиями, количественными характеристиками и законами равновесного теплового излучения. Изучить методику измерения температуры вольфрама яркостным пирометром.

### **602.2. Разделы теории и эксперимента**

Равновесное тепловое излучение. Излучательная и поглощательная способности нагретых тел. Законы Кирхгофа, Стефана – Больцмана, смещения Вина, формула Планка.