УДК 535

Исследование фотоэффекта и измерение постоянной Планка: Описание к лабораторной работе/ Сост. Скворцов В.А., Захаров Ю.Н., ред. Сорокин Ю.М., — Нижний Новгород: ННГУ, 2003. 18 с.

Описание предназначено для студентов 3-го курса радиофизического факультета ННГУ, проходящих лабораторный практикум по курсам «Физика строения вещества» и «Атомная физика».

Рис. 7. Библиогр. назв. 5

Составители: **Скворцов В.А., Захаров Ю.Н.**
Редактор: **Сорокин Ю.М.**

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2003

ФОТОЭФФЕКТ

В настоящее время в науке, технике и быту широкое применение получили фотоэлементы – электровакуумные или полупроводниковые приборы, преобразующие энергию электромагнитного излучения оптического диапазона в электрическую. Действие этих приборов основано на использовании фотоэлектрических эффектов (фотоэффектов). Существует два вида фотоэффекта: внешний и внутренний. Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) заключается в испускании поверхностью тела электронов во внешнее пространство (вакуум или газ) под действием падающей на эту поверхность световой энергии. Внутренним фотоэффектом называется изменение под действием световой энергии проводимости тел вследствие появления добавочных электронов проводимости, либо эффект разделения зарядов в облучаемом светом теле, что приводит к возникновению электродвижущей силы (фотогальванический эффект). Внешний фотоэффект используется в вакуумных и газонаполненных фотоэлементах, а также в фотоумножителях; внутренний - в полупроводниковых фотоэлементах: фоторезисторах, фотодиодах и фототранзисторах (в том числе, в солнечных батареях).

В данной работе исследуется внешний фотоэффект. При этом используется вакуумный фотоэлемент, имеющий два электрода - катод, эмитирующий электроны под действием света, и анод - коллектор электронов. Если на анод подать положительный потенциал, то во внешней цепи прибора потечет ток, называемый фототоком. Величина фототока зависит от интенсивности света и материала катода. При увеличении потенциала анода фототок сначала увеличивается, а затем достигает насыщения (все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, и при дальнейшем увеличении анодного напряжения величина тока не меняется).

Основные законы внешнего фотоэффекта, установленные экспериментально, состоят в следующем.

1. Величина фототока в режиме насыщения при неизменном спектральном составе излучения прямо пропорциональна интенсивности падающего света (закон Столетова).

2. Для каждого вещества существует длинноволновая ("красная") граница фотоэффекта λ_0, за которой (при $\lambda > \lambda_0$) фотоэмиссия не наблюдается.

3. Максимальная кинетическая энергия электронов W_{max} при фотоэффекте линейно возрастает с увеличением частоты падающего света ν и не зависит от его интенсивности: $W_{max} \propto \nu$.

Эти законы просто объясняются на основании квантовой теории света и электронной теории твердого тела. Согласно квантовой теории, свет имеет дуальную природу: он обладает не только волновыми свойствами, но и свойствами частиц и может быть представлен в виде потока квантов света (фотонов). Энергия одного фотона пропорциональна частоте соответствующей волны: $E = h\nu$, где h - постоянная Планка, по современным данным равная $6{,}6260755(40)\cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Излучение и поглощение света на элементарном уровне идет отдельными квантами. Рассмотрим процесс фотоэмиссии из металла. Поскольку каждый фотон действует на электроны твердого тела независимо от других фотонов, причем существует определенная вероятность P того, что это действие приведет к эмиссии электрона, то при попадании на катод N фотонов в секунду электронный ток с него составит $n = N\cdot P$ электронов в секунду. Интенсивность падающего на фотокатод света согласно квантовой теории также пропорциональна N: $I \propto N\cdot h\cdot\nu$. Таким образом объясняется закон Столетова.

Согласно электронной теории твердого тела, электроны проводимости в металле находятся в потенциальной яме и при достаточно низкой температуре равномерно распределены по энергиям, заполняя потенциальную яму до некоторого уровня (см. рис. 1).

Наименьшая энергия, необходимая электрону для выхода в вакуум, называется работой выхода: $A_{вых} = e\varphi$, где e - заряд электрона. То же название обычно употребляют и для потенциала φ, так как энергию в атомной физике принято измерять в электронвольтах. Максимальная энергия, которую может получить электрон при соударении с фотоном, равна $h\nu$. Очевидно, при $h\nu < e\varphi$

фотоэмиссия невозможна, что объясняет существование красной границы.

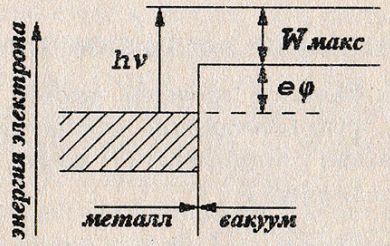

Рис. 1

Из рис. 1 также следует, что максимальная кинетическая энергия электрона равна

$$W_{max} = h\nu - e\varphi. \qquad (1)$$

Это уравнение (уравнение Эйнштейна) объясняет третий закон фотоэффекта. Электроны, выбиваемые с более глубоких энергетических уровней, имеют меньшую кинетическую энергию.

Максимальную кинетическую энергию электронов W_{max} можно определить, если между анодом и катодом фотоэлемента создать тормозящее электроны поле. Для этого на анод подается отрицательный по отношению к катоду потенциал V. Вылетевшие из фотокатода электроны имеют различные энергии. Те электроны, энергия которых удовлетворяет условию $W < e\cdot V$, не могут достичь анода. Поэтому при увеличении $|V|$ фототок уменьшается. При некотором значении $V = V_з$ (потенциал запирания) даже наиболее быстрые электроны не смогут достичь анода, и ток прекратится. При этом

$$W_{max} = e\cdot V_з. \qquad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) найдем линейное соотношение между потенциалом запирания и частотой падающего света

$$V_з = \frac{h}{e}\nu - \varphi. \qquad (3)$$

Экспериментальная проверка формулы Эйнштейна была впервые осуществлена Ричардсоном и Комптоном в 1912 г., более тщательно - Милликеном в 1916 г. Обе работы подтвердили формулу (3). Наиболее точная проверка была проведена Лукирским и Прилежаевым в 1926 г.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью работы является проверка законов фотоэффекта, а также измерение фундаментальной константы – постоянной Планка - на основании соотношения (3) между потенциалом запирания $V_з$ и частотой света ν.

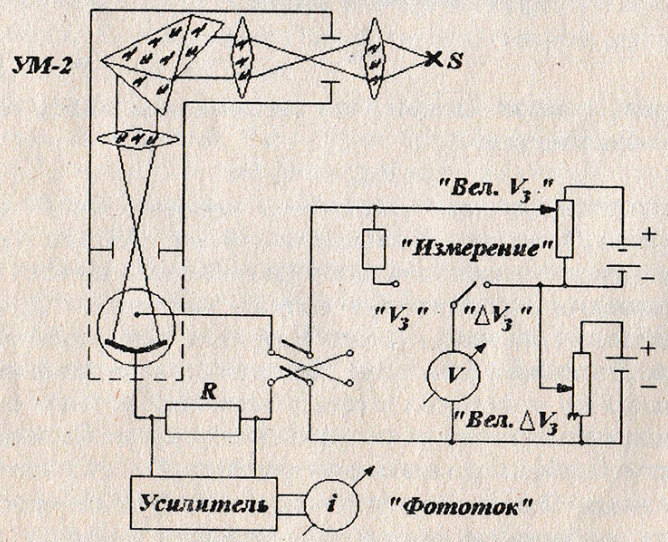

Рис. 2

Схема установки приведена на рис. 2. Свет от лампы накаливания или ртутной лампы фокусируется конденсором на входную щель призменного монохроматора УМ-2. В монохроматоре свет через входную щель, регулирующую световой поток, падает на объектив коллиматора и параллельным пучком проходит диспергирующую призму. Ввиду того, что фокусное расстояние объектива для каждой длины волны изменяется, предусмотрена возможность фокусировки объектива коллиматора. Фокусировочное движение осуществляется маховичком и контролируется по миллиметровой шкале с нониусом. В трубе коллиматора между щелью и объективом помещен затвор, с помощью которого можно прекратить доступ света в прибор. Под углом 90° к падающему пучку света располагается выходная труба монохроматора. Поворачивая призменный столик на различные углы относительно падающего пучка света, получают свет различной длины волны, распространяющийся параллельно оси выходной трубы. Фокусируя свет в выходную плоскость, выделяют с помощью выходной щели узкий спектральный интервал. Прямо на выходной щели крепится фотоэлемент типа Ф-5, помещенный в металлический экран, предохраняющий от попадания паразитного света и от электрических наводок. Таким образом, поворачивая призму монохроматора, можно изменять частоту освещающего фотоэлемент света. На измерительном барабане поворотного механизма нанесены относительные деления-градусы поворота барабана. Отсчет читается против индекса, скользящего по спиральной канавке. Частота (длина волны) определяется по отсчету барабана монохроматора и градуировочному графику. Для градуировки прибора служит ртутная лампа.

Потенциал анода фотоэлемента можно менять с помощью двух потенциометров "*Вел.* $V_з$" и "*Вел.* $\Delta V_з$". Величина потенциала измеряется вольтметром при положении переключателя "*Измерение*" на "$V_з$" (шкала вольтметра при этом соответствует 2,5 В). В положении переключателя "$\Delta V_з$" измеряется лишь часть анодного напряжения, подаваемая с потенциометра "*Вел.* $\Delta V_з$" (шкала вольтметра на 0,25 В). Имеется переключатель знака анодного напряжения.

Возникающий в фотоэлементе ток при отрицательном потенциале анода (режим задержки) очень мал (порядка 10^{-11} А) и не может быть измерен непосредственно. Для его измерения служит балансный электрометрический усилитель. На вход усилителя подается напряжение, пропорциональное величине фототока, которое образуется на большом (порядка 10^{9} Ом) сопротивлении

R, включенном в цепь фотоэлемента. Поэтому показания микроамперметра на выходе усилителя пропорциональны величине фототока.

Потенциал запирания определяется величиной тормозящего электроны анодного напряжения в момент исчезновения фототока ($I_ф = 0$). Следует подчеркнуть, что измеренное $V_з$, отличается от истинного значения

$$V_0 = V_з + C. \qquad (4)$$

Величина поправки "C" зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются наличие обратного тока, вызванного вторичной электронной эмиссией с анода, и контактная разность потенциалов между анодом и катодом. Это приводит к большой погрешности при определении постоянной Планка по зависимости $V_з$ от ν.

С целью увеличения точности опыта можно провести измерения для двух близких значений частоты света ν_1 и ν_2. Если частоты достаточно близки, то поправка "C" практически не изменится (все остальные условия опыта останутся без изменения). Тогда разность $\Delta V_з = V_з(\nu_2) - V_з(\nu_1)$ будет совпадать с разностью истинных потенциалов запирания и, согласно уравнению (3), для определения постоянной Планка можно воспользоваться соотношением

$$\Delta V_з = \frac{h}{e}\Delta\nu; \qquad (5)$$

где $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$.

В этом методе необходимо достаточно точно знать значения частот ν_2 и ν_1. Точность определения частот по градуировочному графику монохроматора в случае применения источника белого света (лампа накаливания) невелика, поэтому необходимо использовать источник с линейчатым спектром, для которого частоты излучения измерены с высокой точностью. В данной работе применена ртутная лампа ДРШ-250. Оптический спектр излучения ртути приведен на рис. 3, и, более подробно, в области вблизи сильных линий: 4046,56 Å - на рис. 4, 4358,33 Å, - на рис. 5, 5460,73 Å - на рис. 6 и 5769,60/5789,66 Å - на рис. 7.

4047
4358 4400
5461 ≈ 5500
5800

(5780 Å)

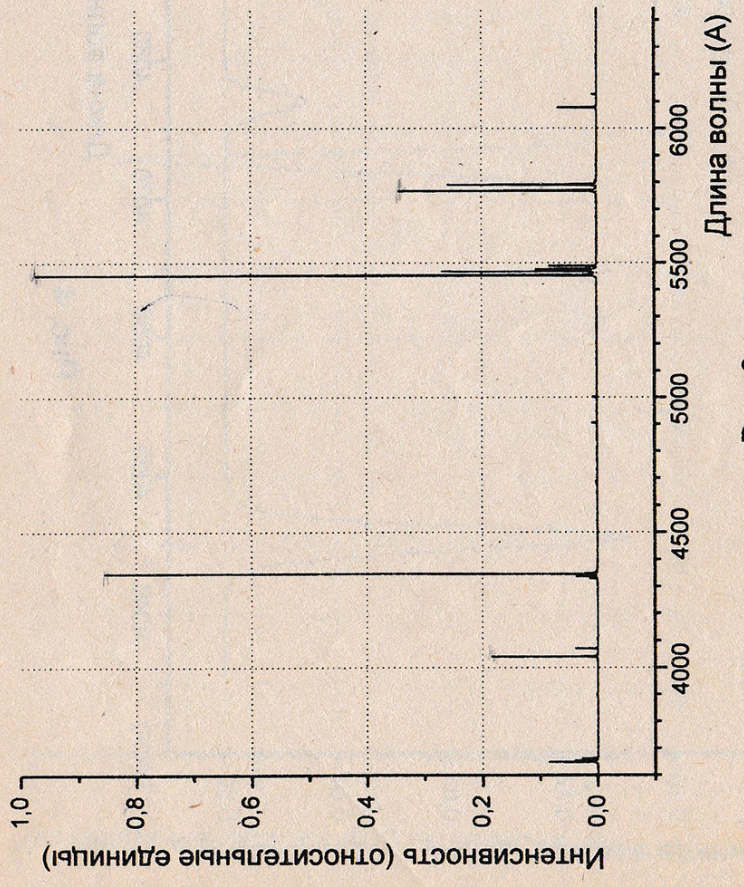

Рис. 3

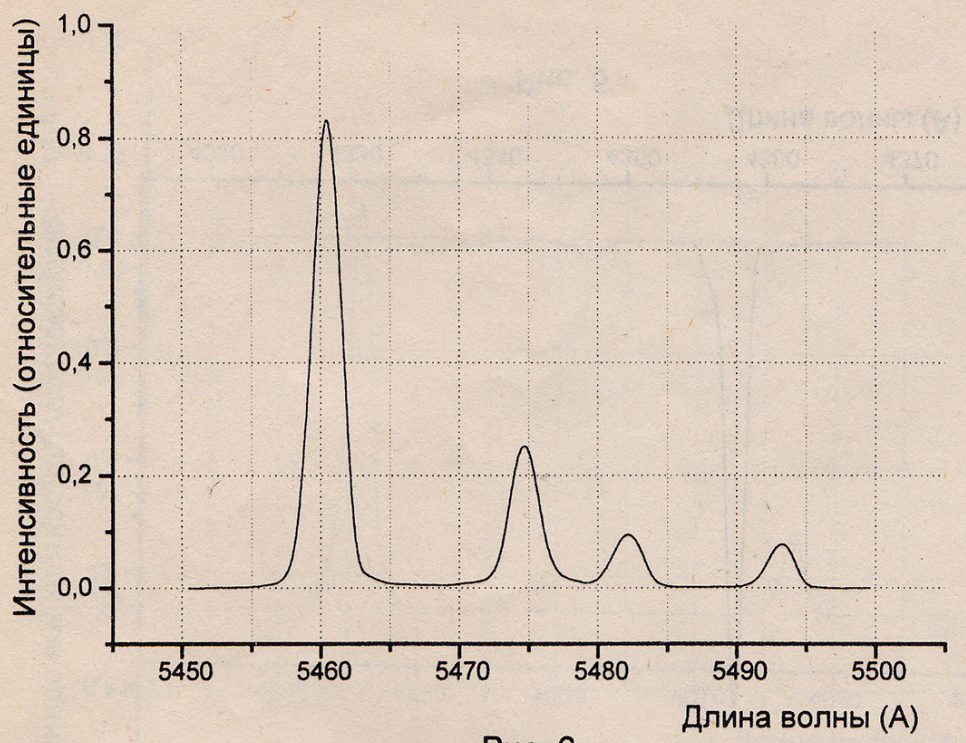
Интенсивность (относительные единицы)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
5450
5460
5470
5480
5490
5500
Длина волны (А)

Рис. 6

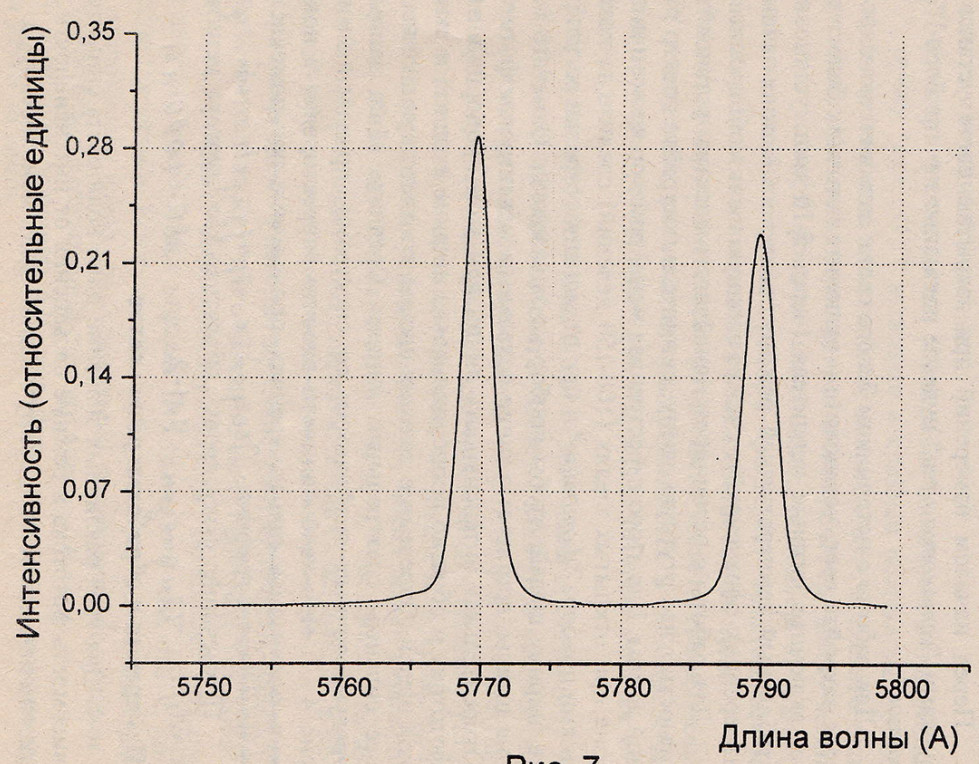
Интенсивность (относительные единицы)
0,35
0,28
0,21
0,14
0,07
0,00
5750
5760
5770
5780
5790
5800
Длина волны (А)

Рис. 7

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка экспериментальной установки

Ознакомьтесь с установкой, выясните назначение всех ручек, переключателей и приборов.

Перед началом измерений при закрытом свете установите ручками *"установка нуля"* нулевое показание на приборе *"фототок"*.

Для работы с источником белого света: затвором монохроматора закройте свет, установите и включите источник белого света, включите питание усилителя (через 5-10 мин. установится стабильный температурный режим, после чего можно начинать измерения); сфокусируйте свет на входную щель монохроматора.

Для работы с источником линейчатого спектра: установите и отъюстируйте ртутную лампу; снимите и постройте спектр ртутной лампы. Для этого перестраивая монохроматор во всем диапазоне при открытых щелях (100-150 делений) следите за показаниями прибора *"фототок"* и при отклонении стрелки регулируйте ширину щелей, чтобы прибор не зашкаливал. Отметьте деления шкалы, соответствующие локальным максимумам фототока. Относительная интенсивность линии при этом пропорциональна фототоку и обратно пропорциональна ширине входной и выходной щелей. Определите деления шкалы, соответствующие наиболее сильным спектральным линиям. Сравните ваши данные ~~с градуировочным графиком и~~ со спектрами, приведенными на рис. 4 - 7. ~~При необходимости вносите корректировку в показания, получаемые при измерениях, проводимых при помощи градуировочного графика.~~ Постройте градуировочный график.

Примечание: фокусировку объектива коллиматора менять не следует. Диапазон УМ-2 380-1000 нм

Измерения и обработка результатов

1. Для трех различных значений длин волн света снимите зависимость фототока в режиме насыщения от интенсивности света, изменяя для этого ширину входной щели монохроматора.

Сначала подберите ширину выходной щели монохроматора так, чтобы стрелка прибора *"фототок"* отклонилась на всю шкалу, когда ширина входной щели равна 100 делениям. Затем проведите 10 измерений величины фототока для значений ширины входной щели от 10 до 100 делений.

2. Снимите зависимость тока фотоэлемента от частоты света, используя источник белого света.

Для этого переключатель *"Измерение"* поставьте в положение "$\Delta V_з$", ручку "*Вел.* $\Delta V_з$ " выведите в крайнее положение против часовой стрелки, а на анод подайте максимальное положительное напряжение. Найдите, перестраивая монохроматор, длину волны света, при которой фототок максимален, и подберите ширину щелей так, чтобы стрелка прибора *"фототок"* отклонилась на всю шкалу. Отметьте положения равенства фототока нулю.

Затем снимите зависимость фототока от частоты света, сделав 10-12 измерений, равномерно распределенных в тех пределах диапазона перестройки монохроматора, для которых фототок отличен от нуля.

3. С помощью источника белого света измерьте величину $V_з$ для 8-10 значений частоты света. Частоты выберите равномерно распределенными в интервале заметного фотоэффекта по результатам предыдущего задания. По градуировочному графику установите соответствие частоты делениям на шкале монохроматора. Начинайте измерения, установив ширину обеих щелей монохроматора по 20-30 дел. Переключатель *"Знак* $V_з$*"* поставьте в положение "–" (тормозящее поле); переключатель *"измерение"* - в положение " $V_з$".

При измерении $V_з$ важно тщательно контролировать равенство нулю фототока. Для этого закройте свет, проверьте установку нуля, вновь откройте свет - стрелка прибора *"фототок"* должна едва заметно отклониться вправо. Это говорит о том, что $V_з$ подобрано правильно. Если стрелка прибора совсем не отклонилась или отклонилась влево, то тормозящий потенциал анода велик; при значительном отклонении стрелки вправо - $V_з$ мало.

4. Измерьте величину $\Delta V_з$, используя в качестве источника света ртутную лампу.

Используя полученный вами и эталонный спектр ртути, выберите те пары спектральных линий, для которых измерения постоянной Планка будут наиболее точными. Обоснуйте свой выбор.

Переключатель *"измерение"* поставьте в положение "$\Delta V_з$", а потенциометр "*Вел.* $\Delta V_з$" в крайнее положение против часовой стрелки. Измерения выполните для трех значений ширины щелей монохроматора: 30, 60, 90 дел.

При нулевом потенциале анода настройтесь на самую длинноволновую линию и отъюстируйте ртутную лампу, добиваясь максимального значения фототока. Установив нужное значение на отсчетном барабане монохроматора, подстройте это положение, добиваясь максимума фототока. Затем потенциометрами "*Вел.* $V_з$" установите фототок равным нулю. Тщательно, как в предыдущем задании, проверьте установку фототока на нуль. После этого перестройте монохроматор на соседнюю спектральную линию и вновь тщательно установите фототок равным нулю, пользуясь потенциометром "*Вел.* $\Delta V_з$" и не меняя положение потенциометра "*Вел.* $V_з$". Показания вольтметра будут равны разности потенциалов запирания $\Delta V_з$ для этой пары линий.

Аналогичным образом измерьте $\Delta V_з$ для каждой пары спектральных линий.

5. Обработайте полученные результаты.

5.1. Постройте зависимость фототока насыщения от интенсивности. Установите точность выполнения закона Столетова.

5.2. Постройте зависимость тока фотоэлемента от частоты света при использовании лампы накаливания. Объясните вид полученной зависимости. Определите красную границу фотоэффекта.

5.3. Постройте зависимость $V_з$ от частоты света, по данным, полученным с лампой накаливания. Определите постоянную Планка и красную границу фотоэффекта (величина заряда электрона по современным данным e=1,60217733(49)$\cdot 10^{-19}$ Кл).

5.4. Для всех измеренных значений $\Delta V_з$ вычислите постоянную Планка (см. соотношение (5)).

ВОПРОСЫ

1. Можно ли зависимость тока фотоэлемента от частоты света лампы накаливания назвать спектральной характеристикой фотоэлемента?
2. Как можно качественно объяснить влияние различных факторов на величину поправки "C" в соотношении (4)?
3. Чем можно объяснить нелинейность зависимости $V_з(\nu)$?
4. Почему отличаются значения красной границы фотоэффекта, найденные по графику зависимости фототока от частоты и по графику $V_з(\nu)$?
5. Какие из полученных значений постоянной Планка следует считать наиболее точными и почему?

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. Ч.1. – М.: Наука, 1986.
2. Матвеев А.Н. Атомная физика. – М.: Высшая школа, 1989.
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.П. Гольдина. - М.: Наука, 1973.
4. Оптика и атомная физика (лабораторный практикум по физике). Под ред. Р.И. Солоухина. - Новосибирск: Наука, СО, 1976.
5. Монохроматор универсальный УМ-2. Описание и руководство к пользованию.