

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Физический факультет

# **ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ФОТОТОКА ОТ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ**

**Методические указания  
для выполнения лабораторных работ**

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2017

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией  
физического факультета

Протокол № 2 от «22» сентября 2016 г.

Председатель комиссии: Эриси Н.Г. Брянцева

Рецензент – **Э.Д. Ковалёнок**

В методическом пособии рассматривается принцип действия вентильных фотоэлементов. Приводится методика эксперимента по определению спектральной характеристики меднозакисного фотоэлемента.

Методические указания предназначены для студентов физических специальностей дневной формы обучения.

СОСТАВИТЕЛЬ доцент **Н.И. Федяйнова**

## ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ФОТОТОКА ОТ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

**Цель работы:** Изучить зависимость интенсивности фотоэффекта от длины волны для фотоэлемента с запирающим слоем. Получить спектральную характеристику фотоэлемента

### ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Явлением фотоэффекта называется взаимодействие света с веществом, при котором энергия фотона полностью передается электрону в одном акте взаимодействия. Различают два вида фотоэффекта – внешний и внутренний. При внешнем фотоэффекте фотоэлектроны покидают поверхность металла и оказываются в пространстве в виде свободных электронов. Явление внешнего фотоэффекта используется в вакуумных фотоэлементах. При внутреннем фотоэффекте электрон отрывается от своего атома, но не выходит за границы вещества, а остается в виде электрона проводимости. Внутренний фотоэффект наблюдается обычно в полупроводниках и дает различные эффекты. Появление фотоэлектронов в полупроводнике увеличивает проводимость. Это используется для изготовления фотосопротивлений.

Другим проявлением внутреннего фотоэффекта является фотоэффект в запирающем слое (вентильный фотоэффект), который заключается в возникновении ЭДС (фото-ЭДС) при освещении контакта двух полупроводников с различной проводимостью или полупроводника и металла. Граница между полупроводником и металлом обладает униполярной проводимостью, то есть пропускает ток (электроны) в одном направлении и не пропускает в противоположном. Появляется запирающий слой. Если вблизи этого слоя образуются свободные электроны за счет внутреннего фотоэффекта, то из-за униполярной проводимости может возникнуть направленное движение электронов, то есть электрический ток. Это явление используется для устройства фотоэлементов с запирающим слоем. Такие фотоэлементы обладают преимуществом перед вакуумными, поскольку работают без источника тока. Они

преобразуют световую энергию в электрический ток непосредственно, без каких-либо дополнительных устройств, и находят широкое применение в виде экспонометров, источников электропитания космических спутников Земли (солнечные батареи) и др.

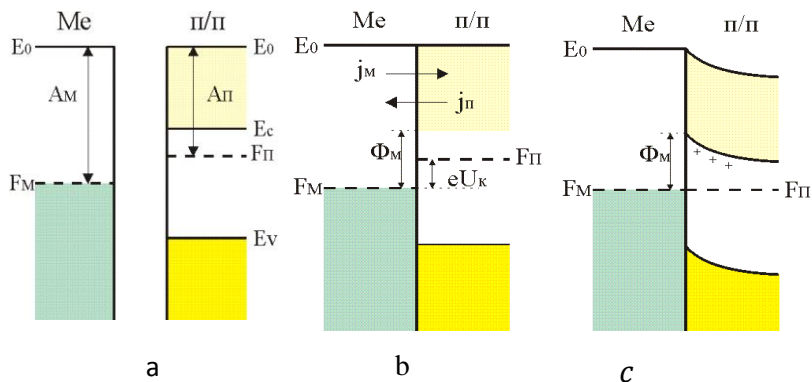


Рис. 1

Рассмотрим явления в контакте металл – полупроводник при отсутствии поверхностных состояний. Возьмем контакт электронного полупроводника (*n*-типа) и металла в предположении, что работа выхода электрона из полупроводника  $A_{\Pi}$  меньше работы выхода электрона из металла  $A_M$ , то есть  $A_{\Pi} < A_M$ .

На рисунке 1а показана зонная энергетическая диаграмма металла (Me) и полупроводника (п/п) не находящихся в контакте друг с другом. Термодинамическая работа выхода – это расстояние от уровня вакуума  $E_0$  до уровня Ферми в металле ( $A_M$ ) или в полупроводнике ( $A_{\Pi}$ ). Если обеспечить идеальный контакт металла и полупроводника (т.е. такой контакт, при котором отсутствует вакуумный или диэлектрический слой между металлом и полупроводником), то электроны будут переходить преимущественно из полупроводника в металл, поскольку уровень Ферми в полу-

проводнике в момент соединения с металлом лежит выше, чем в металле,  $F_{\Pi} > F_M$  (рис.1b). При этом металл заряжается отрицательно, а в полупроводнике возникнет положительный заряд, создаваемый не скомпенсированными донорами, которые получены при уходе электронов проводимости в металл. Этот поток электронов будет иметь место до тех пор, пока уровни  $F_{\Pi}$  и  $F_M$  не выровняются, после чего установится динамическое равновесие (токи  $j_{\Pi}$  и  $j_M$  будут равны друг другу). Между металлом и полупроводником возникает контактная разность потенциалов.

$$U_k = \frac{A_M - A_{\Pi}}{e}$$

Так как концентрация доноров на несколько порядков меньше концентрации электронов в металле, то некомпенсированные доноры займут значительный по толщине слой полупроводника, сравнимый с шириной обедненной области p-n перехода, и энергетические зоны в полупроводнике изогнутся вверх (рис. 1с).

При освещении светом области контакта в ней вследствие внутреннего фотоэффекта возрастает число свободных носителей тока. Это вызывает нарушение равновесного распределения носителей тока в области контакта и приводит к изменению контактной разности потенциалов по сравнению с равновесной, то есть, к возникновению фото-ЭДС. Фото-Эдс поддерживается действием света (вещество непрерывно поглощает кванты с энергией  $h\nu$ ). Таким образом, при облучении места контакта светом образуется элемент, способный служить источником тока, - вентильный фотоэлемент.

## МЕДНОЗАКИСНЫЙ ФОТОЭЛЕМЕНТ

Примером фотоэлемента с запирающим слоем может служить меднозакисный фотоэлемент (рис.2). Он представляет собой пластину из чистой меди (один электрод), покрытую путем окисления тонким слоем закиси меди  $Cu_2O$ , к которому сверху прижат

второй электрод в виде металлической сетки. На границе между медным электродом и слоем окиси меди образуется запирающий слой, пропускающий электроны только к медному электроду. Фотоэлектроны, возникающие в слое окиси меди проходят через этот слой, и образуют электрический ток. Если слой окиси меди в такой степени тонок, что свет проходит до границы с медным электродом, то электрический ток образуется за счет униполярной проводимости этой границы. Такие фотоэлементы носят название заднестеночных фотоэлементов. Если же слой окиси меди достаточно толст и не пропускает света до задней границы, а верхний (второй) электрод представляет собой тончайший полупрозрачный слой напыленной меди, то будет работать верхняя граница. Такие фотоэлементы носят название переднестеночных, или фронтальных фотоэлементов.

Интенсивность фотоэффекта (сила фототока, электродвижущая сила фотоэлемента) пропорциональна силе света при постоянной длине волны падающего света, то есть пропорциональна числу фотонов света. Кроме того, интенсивность фотоэффекта определяется еще величиной квантового выхода, то есть числом возникающих фотоэлектронов в расчете на один фотон. Обычно квантовый выход имеет порядок  $10^{-3}$ , то есть на 1000 фотонов возникает только один фотоэлектрон. Но квантовый выход существенно зависит от энергии фотонов  $h\nu$ , то есть от частоты света  $\nu$ . Зависимость эта сложная, имеются резонансные максимумы, положение которых на шкале частот или энергий определяется состоянием электронов в атоме и силами связи. Соответственно сложной будет зависимость ЭДС фотоэлемента от частоты. Фотоэффект в запи-

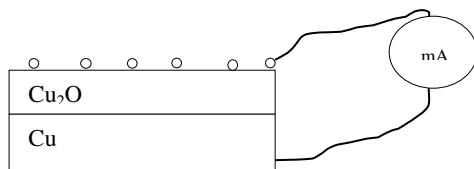


Рис. 2

рающем слое имеет селективный характер. **Зависимость ЭДС фотоэлемента от частоты при постоянном световом потоке носит название спектральной характеристики фотоэлемента.** Задачей данной работы является определение спектральной характеристики меднозакисного фотоэлемента с запирающим слоем.

**В данной работе применена схема, с помощью которой измеряется не электродвижущая сила фотоэлемента, а сила тока. В качестве спектральной чувствительности можно взять отношение силы фототока к силе света, падающего на фотоэлемент.** Свет попадает на фотоэлемент от лампы накаливания, проходя через монохроматор. Поскольку поток света, проходящий через входную щель монохроматора не измеряется, то мы поддерживаем его неизменным в течение всего времени измерения, отдавая себе отчет о том, что в результате измерения мы получим относительную чувствительность фотоэлемента. Во время измерений нельзя изменять ширину щели и изменять положение лампы накаливания и конденсорной линзы. Но мы обязательно должны учесть распределение световой энергии, излучаемой лампой нака-

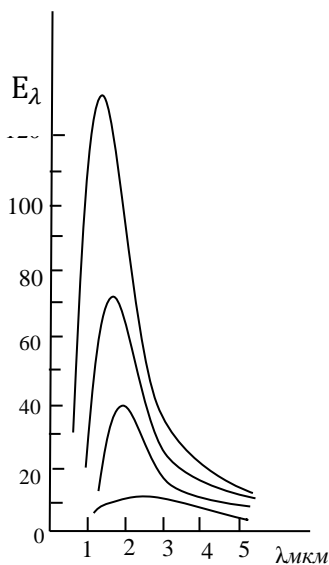


Рис. 3

ливания, по длинам волн. **Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при разных температурах показано на рис.3.** По оси ординат откладывается световая энергия, излучаемая за одну секунду с единицы поверхности светящегося абсолютно чёрного тела и в единичном интервале длин волн около заданного значения длины волны (спектральная излучательная способность). Для излучения вольфрамовой нити накаливания распределение такое же, только ординаты точек кривой меньше в  $A(\lambda, T)$  раз ( $A(\lambda, T)$  – коэффициент поглощения вольфрама).

Спектральная чувствительность фотоэлемента с учетом неравномерного распределения излучения по длинам волн определяется делением силы фототока на величину  $E_{\lambda T}$ .

$$\alpha = \frac{I_{\phi}}{E_{\lambda T}}$$

Для получения значений  $E_{\lambda T}$  должна быть определена температура нити лампы накаливания и построена кривая зависимости  $E_{\lambda T}$  от  $\lambda$ . Значения  $E_{\lambda T}$  для построения этой зависимости берутся из таблицы 1.

Практически температура нити не определяется, а задается в пирометре, и затем с помощью автотрансформатора подбирается такое напряжение на лампе накаливания, при котором температура нити приобретает заданное значение. Делается это с помощью оптического пирометра. На шкале пирометра устанавливается нужная температура и затем автотрансформатором подбирают напряжение, при котором яркость нити лампы накаливания становится равной яркости нити фотометрической лампы пирометра.

### ОПТИЧЕСКИЙ ПИРОМЕТР

На рис.4 показано устройство оптического пирометра. Нить (5) фотометрической лампы (6) расположена в фокальной плоскости окуляра (1). Четкое изображение нити получают путем выдвижения тубуса окуляра (3). В тубусе окуляра имеется красный свето-



фильтр (2):  $\lambda = 660\text{нм}$ , который можно ввести в поле зрения при измерении температур выше  $900^\circ\text{C}$ .

Объектив (9) дает изображение поверхности светящегося тела в плоскости нити. Фокусировка достигается перемещением тубуса объектива (8). При работе с температурами выше  $1200^\circ\text{C}$  на пути лучей вводится нейтральный светофильтр (7). При введении светофильтра отсчет значений температур берется по шкале ( $1200 - 2000$ ) $^\circ\text{C}$ , без светофильтра – по шкале ( $800 - 1400$ ) $^\circ\text{C}$  вольтметра (11).

Напряжение на лампе регулируется реостатом (12) и измеряется вольтметром (11). Реостат кольцевого типа размещен в приборе. Ручка его в виде кольца с накаткой помещена в передней части прибора. Вращение этого кольца по часовой стрелке соответствует увеличению напряжения. Совпадение индексов с отметкой «0» на кольце и на корпусе прибора соответствует положению «выключено».

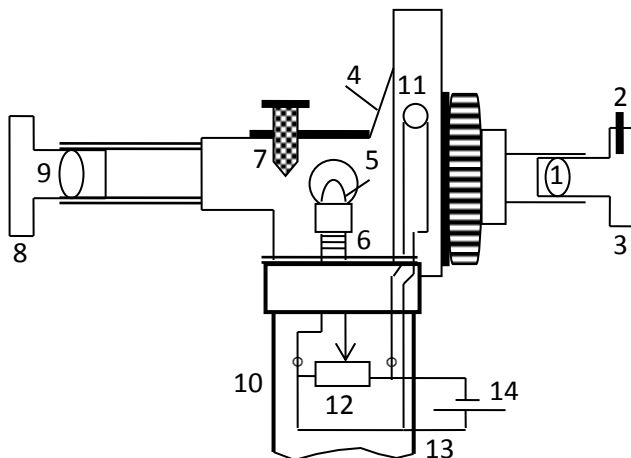


Рис. 4

чено». Вольтметр проградуирован в градусах Цельсия.

Наиболее распространённый способ оптического определения температуры основывается на сравнении излучения реального тела с излучением абсолютно чёрного тела (АЧТ) для одной и той же

длины волны  $\lambda$ . При этом измеряется так называемая яркостная температура.

Под яркостной температурой  $T_{\text{я}}$  понимают температуру АЧТ, при которой его спектральная излучательная способность  $E(\lambda, T_{\text{я}})$  равна спектральной излучательной способности исследуемого тела при той же длине волны  $E(\lambda, T)$ :

$$E(\lambda, T) = E(\lambda, T_{\text{я}}).$$

В соответствии с законом Кирхгофа, имея ввиду, что для АЧТ спектральная поглощательная способность  $A(\lambda, T_{\text{я}}) = 1$ , получаем

$$E(\lambda, T_{\text{я}}) = \frac{E(\lambda, T)}{A(\lambda, T)}. \quad (1)$$

Для видимой части спектра выполняется условие:

$$\frac{h\nu}{kT} = \frac{hc}{kT\lambda} \gg 1$$

и формула Планка преобразуется в формулу Вина

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{kT\lambda}}. \quad (2)$$

Таким образом, подставив выражение (2) в формулу (1), получаем для температуры исследуемого тела:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{я}}} = \frac{k\lambda}{hc} \ln A(\lambda, T)$$

В основе измерения яркостной температуры тел лежит сравнение яркостей исследуемого тела и нити фотометрической лампы пирометра. Окуляр (1) позволяет одновременно наблюдать среднюю часть нити и изображение источника. При измерении температуры регулируют ток нити фотометрической лампы до тех пор, пока она не исчезнет на фоне изображения светящегося тела. В этом случае яркости излучения нити и тела совпадают, и величину температуры можно определить по показаниям вольтметра (11).

## МОНОХРОМАТОР

Скорость распространения световых волн в среде, а, следовательно, и показатель преломления среды зависят от длины волны проходящего света. Зависимость абсолютного показателя прелом-

ления вещества от длины волны проходящего света называют **дисперсией**. Преломленный свет сохраняет ту же частоту колебаний, что и падающий, но изменяет фазовую скорость своего распространения, а, следовательно, показатель преломления и длину волны в зависимости от свойств среды.

На различной преломляемости лучей с разной длиной волны, то есть на явлении дисперсии, основано спектральное разложение сложного некогерентного излучения, например белого света, в спектр. Совокупность когерентных волн различной частоты в вакууме будет распространяться совместно с одной и той же скоростью. Попадая в какую-либо среду, они начнут двигаться с различными скоростями, начнут по-разному преломляться и разойдутся по различным направлениям - будут диспергировать.

Наиболее отчетливо дисперсия наблюдается при прохождении света через стеклянную призму. Приборы, предназначенные для исследования спектров, называют спектральными приборами. Оптическая схема спектрального прибора (рис.5) в общем случае состоит из следующих основных частей: I - осветительной; II - диспергирующей; III - приемно- регистрирующей. Осветительное устройство предназначено для создания достаточно сильного и равномерного освещения щелевой диафрагмы 3 исследуемым излучением.

В осветительную часть входят источник излучения 1 и конденсор 2, проецирующий изображение источника на входную щель 3 коллиматора.

Диспергирующая часть II служит для разложения в спектр идущего из коллиматора параллельного пучка лучей. Узкая щелевая входная диафрагма 3 установлена в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора. Коллиматор направляет параллельные пучки лучей на диспергирующий элемент 5, в качестве которого применяют дисперсионные призмы или дифракционные решетки.

Устройство приемно-регистрающей части III зависит в первую очередь от назначения спектрального прибора. Приемно – регистрирующее устройство при визуальном методе наблюдения представляет собой зрительную трубу. Она состоит из объектива 6 и окуляра 8.

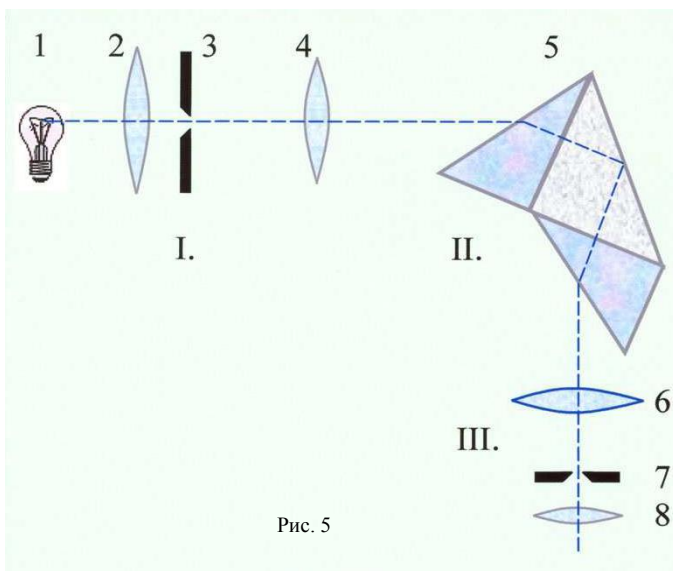


Рис. 5

Между объективом и окуляром расположен указатель 7.

В современных спектральных приборах спектральное разложение осуществляется с помощью диспергирующих систем, состоящих из нескольких призм. На рисунке изображена призма Аббе, представляющая собой блок из трех склеенных прямоугольных призм. Такая оптическая система позволяет получить большую дисперсию, а также изменять углы отклонения лучей.

На рис. 6 изображён стеклянно-призменный монохроматор-спектрометр УМ-2, предназначенный для спектральных исследований длин волн в диапазоне от 3800 до 10000 Å. В состав прибора входят следующие основные части:

Входная щель 1, снабженная микрометрическим винтом 2, который позволяет открывать щель на нужную ширину.

Коллиматорный объектив 3 служит для создания параллельного пучка лучей. Он снабжен микрометрическим винтом 4. Винт позволяет смещать объектив относительно щели при фокусировке спектральных линий различного цвета.

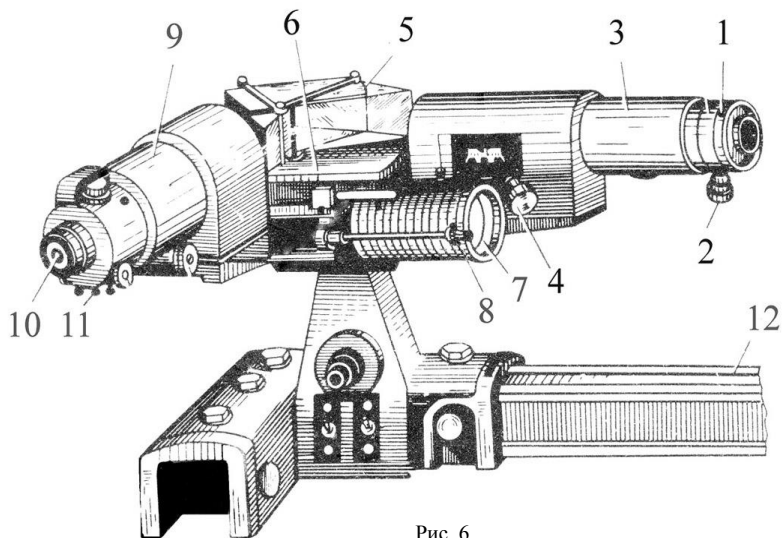


Рис. 6

Сложная спектральная призма 5 установлена на поворотном столике 6. Призма 5 состоит из трех склеенных призм. Поворотный столик 6 вращается вокруг вертикальной оси при помощи микрометрического винта с отсчетным барабаном 7. На барабан нанесена винтовая дорожка с градусными делениями. Вдоль дорожки скользит указатель поворота барабана 8. При вращении барабана призма поворачивается, и в центре поля зрения появляются различные участки спектра.

Зрительная труба состоит из объектива 9 и окуляра 10. Объектив дает изображение входной щели 1 в своей фокальной плоскости. В этой плоскости расположен указатель 11. Изображение рассматривают через окуляр 10. Монохроматор заключен в массивный корпус, предохраняющий прибор от повреждений и загрязнений.

Прибор также снабжен оптической скамьей 12, на которой могут перемещаться рейтеры с источником света. Источник света рекомендуется располагать на расстоянии 45 см от щели. Спектрометр УМ - 2 относится к числу точных приборов. Он требует бережного и аккуратного обращения!!

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе применяются следующие приборы: меднозакисный фотоэлемент, миллиамперметр, оптический пирометр, монохроматор, лампа накаливания, питаемая автотрансформатором от сети переменного тока. Автотрансформатор служит для получения определенной температуры нити накаливания.

Схема установки изображена на рисунке 7.

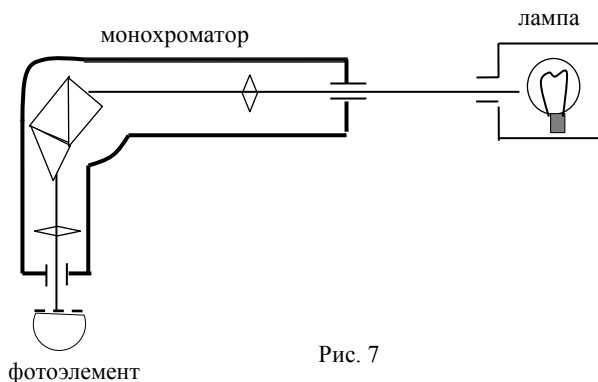


Рис. 7

Свет от лампы фокусируется на входной щели монохроматора. За выходной щелью монохроматора стоит фотоэлемент, защищенный светонепроницаемым чехлом. При повороте системы призмы барабаном 7 (рис. 6) на фотоэлемент попадают различные части спектра. Барабан проградуирован сразу в длинах волн. Температура нити должна быть постоянной в течение всего времени измерения.

## Порядок выполнения работы

Для проведения эксперимента необходимо:

1. С помощью оптического пирометра и автотрансформатора определить то напряжение, при котором получается нужная для работы температура нити накала, для чего произвести следующие действия:

а) выбрать в таблице 1 исследуемую температуру и перевести её в градусы Цельсия, поскольку пирометр проградуирован в градусах Цельсия;

б) установить на шкале пирометра вычисленное значение температуры в градусах Цельсия;

в) фонарь с лампой накаливания и трубу пирометра расположить друг против друга на расстоянии 1-1,5 м.

г) перемещая окуляр пирометра, сделать четко видимой его измерительную нить, а затем перемещением объектива добиться четкой видимости нити лампы накаливания.

д) совместить вершину измерительной нити с нитью лампы накаливания и, поворачивая ручку автотрансформатора, добиться одинаковой яркости этих нитей. **При этом спектральная излучательная способность измерительной нити будет равна спектральной излучательной способности абсолютно чёрного тела, соответствующей в таблице 1 выбранной температуре.** Записать показание вольтметра и поддерживать его неизменным во время эксперимента.

2. Поставив фонарь перед входной щелью монохроматора, не изменяя показания автотрансформатора. Конденсорной линзой сфокусировать нить лампы на входной щели.

3. Записать в таблицу 2 показания миллиамперметра  $I_{\phi}$  при различных длинах волн с интервалом  $200 \text{ \AA}$ . При этом барабан монохроматора сначала установить на  $4000 \text{ \AA}$  (щель монохроматора при этой длине волны регулируется так, чтобы прибор не зашкаливал), затем уже производить измерения при других длинах волн.

## Обработка результатов измерения

1. Занести в таблицу 2, взятые из таблицы 1 значения  $E_{\lambda T}$  для каждой из измеренных длин волн при заданной температуре.

Т а б л и ц а 1

Длина волны в $\text{\AA}$	Температура в градусах Кельвина				
	1800	1900	2000	2100	2200
4000	0,08	0,23	0,60	1,41	3,06
4100	0,12	0,31	0,82	0,88	4,02
4200	0,16	0,45	1,10	2,48	6,21
4300	0,23	0,61	1,46	3,23	6,46
4400	0,31	0,81	1,90	4,13	8,35
4500	0,42	1,05	2,43	5,20	10,37
4600	0,55	1,36	3,09	6,48	12,73
4700	0,71	1,73	3,86	7,98	15,45
4800	0,91	2,17	4,78	9,72	18,56
4900	1,15	2,70	5,84	11,72	22,08
5000	1,44	3,33	7,08	14,00	26,00
5100	1,78	4,05	8,49	16,57	30,45
5200	2,18	4,88	10,09	19,45	35,33
5300	2,65	5,84	11,90	22,65	40,68
5400	3,19	6,92	13,92	26,19	46,52
5500	3,80	8,14	16,17	30,07	52,85
5600	4,50	9,50	18,64	34,29	59,67
5700	5,28	11,02	21,36	38,87	66,98
5800	6,16	12,69	24,32	43,80	74,77
5900	7,14	14,52	27,57	49,09	83,04
6000	8,22	16,53	30,99	54,72	91,77
6100	9,40	18,70	34,70	60,71	100,95
6200	10,71	21,04	38,66	67,04	110,56
6300	12,12	23,56	42,88	73,70	120,58
6400	13,64	26,26	47,34	80,68	130,99
6500	15,29	29,13	52,04	87,97	141,77
6600	17,05	32,18	56,98	95,56	152,89



6700	18,94	35,40	62,15	103,43	164,33
6800	20,95	38,79	67,55	111,56	176,05
6900	23,07	42,35	73,15	119,94	188,03
7000	25,32	46,07	78,96	128,56	200,24

2. Вычислить спектральную чувствительность как значение силы фототока в расчете на единичный поток.
3. Результаты представить в виде графика зависимости  $\alpha$  от  $\lambda$ .

Т а б л и ц а 2

№	$\lambda$	$T$	$I_{\phi}$	$E_{\lambda T}$	$\alpha(\lambda, T) = \frac{I_{\phi}}{E_{\lambda T}}$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое внешний и внутренний фотоэффект?
2. Как устроен фотоэлемент с запирающим слоем и принцип его работы? Что такое заднестеночный и фронтальный фотоэлемент?
3. Что такое квантовый выход фотоэффекта и от чего он зависит?
4. Что называется спектральной характеристикой фотоэлемента?
5. Устройство и принцип действия оптического пирометра.
6. Устройство монохроматора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шпольский Э.В. Атомная физика. - М.: Наука, 1984
2. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. - М.: Наука, 1986.

*Издание подготовлено в авторской редакции*

Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 2610 от «15» июня 2017 г. Тираж 50 экз.