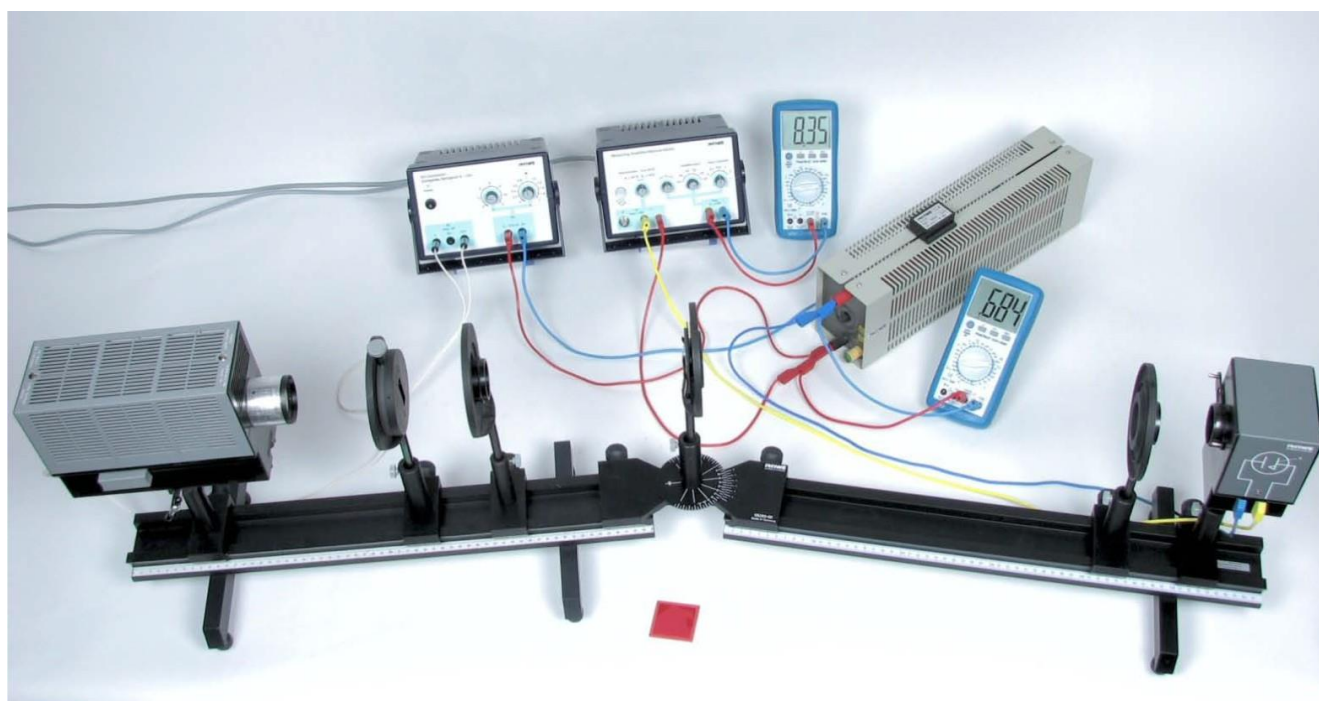


В.М. Бянкин, В.А. Козлов, А.В. Козырев

**Экспериментальная проверка уравнений Эйнштейна  
для фотоэффекта и определение постоянной Планка  
с помощью спектрометра с дифракционной решеткой**



**Цель работы** - изучение законов внешнего фотоэффекта и вольт-амперных характеристик (ВАХ) вакуумного фотоэлемента; определение постоянной Планка, работы выхода и частоты красной границы материала фотокатода.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Явление испускания электронов веществом под действием света (ультрафиолетового излучения) было открыто в 1887 г. Г.Р.Герцем и называется **фотоэлектронной эмиссией, или внешним фотоэффектом**. А.Г.Столетов в 1888 г. создал и применил на практике первый фотоэлемент.

### 1. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом - наиболее простой прибор для регистрации света. В стеклянном баллоне (рис. 1), из которого откачан воздух до высокого вакуума, имеются два электрода: фотокатод **ФК** и анод **А**. Включая фотоэлемент в электрическую цепь (рис. 2), можно изучать закономерности фотоэффекта.

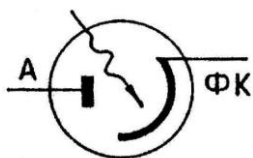


Рис. 1

Напряжение  $U$  между катодом и анодом регулируется потенциометром **Р** и измеряется вольтметром **V**. Катод при освещении испускает в вакуум электроны. Под действием сил электрического поля, созданного между катодом и анодом, освобожденные электроны двигаются к аноду и замыкают цепь. Микроамперметр регистрирует ток. На рис. 3 изображена зависимость тока от приложенного напряжения  $U$  при неизменной частоте ( $\nu = \text{const}$ ), т.е. **вольтамперная характеристика**. Для ВАХ фотоэлемента характерно существование участка нарастания тока, начинающегося при некотором значении задерживающего напряжения  $U_3$ , называемого **запирающим напряжением**, и участка тока насыщения, когда все освобождаемые светом электроны (фотоэлектроны) достигают анода.

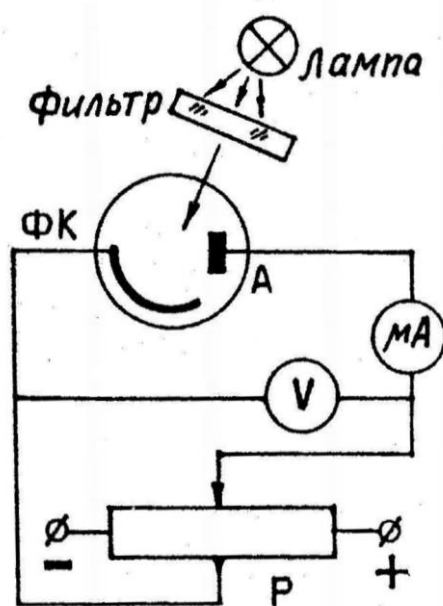


Рис. 2

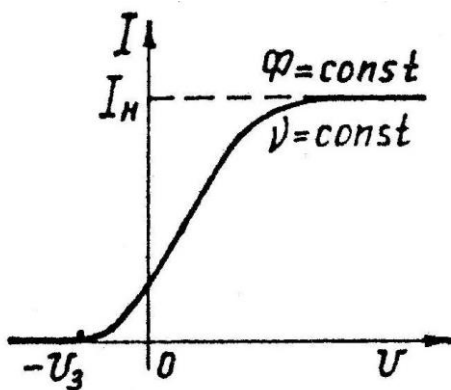


Рис. 3

Измеряя  $U_3$ , можно определить максимальную скорость  $V_m$  освобождаемых светом электронов с помощью соотношения:

$$eU_3 = \frac{1}{2}mV_m^2, \quad (1)$$

где  $e$  и  $m$  - абсолютная величина заряда и масса электрона;  $U_3$  - модуль запирающего напряжения.

## 2. Законы внешнего фотоэффекта

Опытным путем установлены следующие законы внешнего фотоэффекта.

1) При неизменном спектральном составе падающего на катод света сила фототока насыщения пропорциональна величине светового потока (рис. 4).

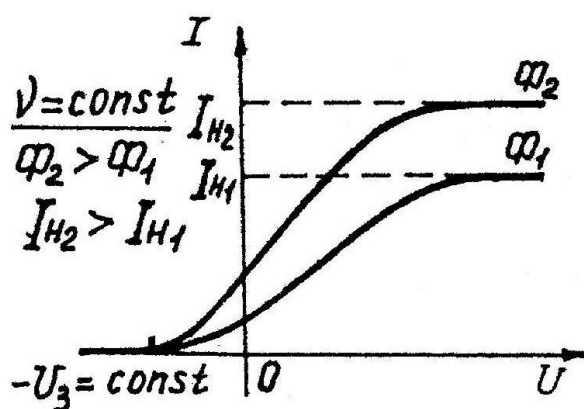


Рис. 4

2) При неизменном световом потоке запирающее напряжение и, следовательно, максимальная скорость фотоэлектронов возрастают при увеличении частоты излучения (рис. 5).

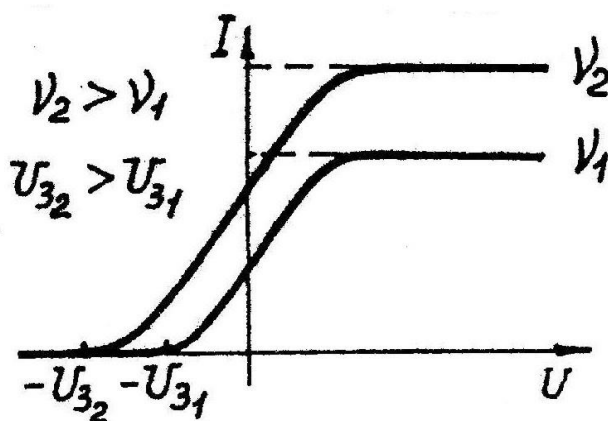


Рис. 5

3) Для данного материала фотокатода существует минимальная частота (или максимальная длина волны) излучения, такая, что фотоэффект наблюдается, если  $\nu > \nu_0$  ( $\lambda < \lambda_0$ ). Соответствующую частоту  $\nu_0$  (или длину волны  $\lambda_0$ ) называют **красной границей** внешнего фотоэффекта.

4) Внешний фотоэффект практически безынерционен. Фотоэлектроны начинают вылетать из металла через 1 нс после начала облучения.

Законы фотоэффекта были объяснены на основе квантовых представлений о свете. С этой точки зрения монохроматическое излучение с частотой  $\nu$  представляет собой поток частиц, называемых фотонами, которые имеют энергию  $\varepsilon = h\nu$ , массу  $m_\phi = \frac{\varepsilon}{c^2}$ , скорость  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с и импульс  $p = \frac{\varepsilon}{c}$ .

Коэффициент пропорциональности  $h = 6.626176 \cdot 10^{-34}$  Дж·с называют **постоянной Планка**. При поглощении фотона его энергия целиком передается одному электрону. Она расходуется на совершение работы выхода  $A$  электрона из металла и сообщение ему кинетической энергии. Если электрон не тратит энергии на неупругие столкновения в металле, то его максимальная кинетическая энергия при выходе из металла определяется на основе закона сохранения энергии:

$$\frac{mV_m^2}{2} = h\nu - A \quad (2)$$

Это уравнение называют уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Так как внешний фотоэффект возможен, если  $h\nu \geq A$ , частота красной границы фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad (3)$$

Эта частота зависит от материала катода и состояния его поверхности.

### 3. **Описание метода измерений**

Вернемся к рис. 3 и рассмотрим ВАХ при обратной полярности, когда "минус" источника питания подключен к аноду ( $U < 0$ ). При этом эмитированные электроны тормозятся электрическим полем. Если начальная кинетическая энергия электрона  $\frac{mV^2}{2}$  меньше, чем работа сил поля  $eU$  на участке фотокатод - анод, то электрон возвращается обратно, не достигнув анода. При вылете из катода электроны имеют различную энергию - от нуля до  $\frac{mV_m^2}{2}$ . Поэтому по мере увеличения задерживающего напряжения ток плавно уменьшается, достигая нуля при напряжении  $U_3$ . При  $U = U_3$  все фотоэлектроны возвращаются обратно, причем самые быстрые из них, с энергией  $\frac{mV_m^2}{2}$ , поворачивают обратно вблизи анода. Для них выполняется соотношение (1). Такой метод измерения энергии заряженных частиц называют методом запирающего (задерживающего) напряжения.

Подставляя (1) в (2), получим:

$$U_3 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e} \quad (4)$$

Если экспериментально определить значение  $U_3$  для света с различной известной частотой  $\nu$ , то можно проверить справедливость представления о свете как потоке частиц - фотонов с энергией  $h\nu$ . Если эти представления верны, то, как следует из (4), экспериментальная зависимость  $U_3(\nu)$  должна быть линейной (рис. 6). По наклону прямой на графике  $U_3(\nu)$  можно найти отношение постоянной Планка к заряду электрона:

$$\frac{h}{e} = \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu}, \quad (5)$$

где  $\Delta U_3$  (в вольтах) и  $\Delta \nu$  (в герцах) - длины катетов треугольника, показанного на рис. 6. Считая заряд электрона известным, из (5) можно определить постоянную Планка:

$$h = e \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu} \quad (6)$$

Экстраполяцией прямой  $U_3(\nu)$  на рис. 6 до пересечения с осью абсцисс определяют частоту красной границы фотоэффекта; точка пересечения прямой с осью координат дает работу выхода  $A$ .

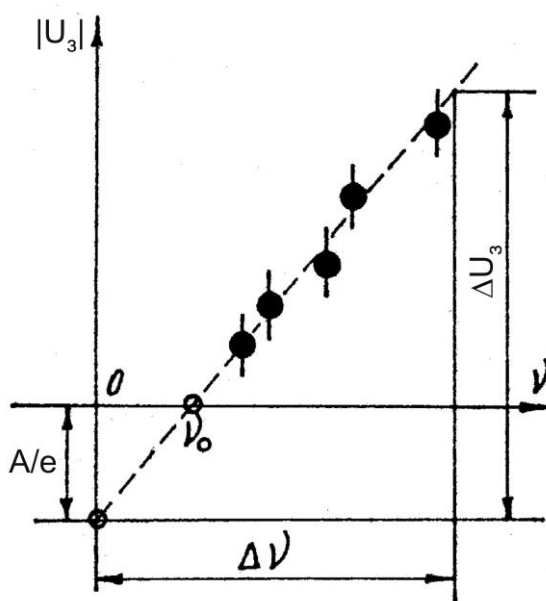


Рис. 6

Прямая отсекает на оси ординат отрезок в вольтах, численно равный работе выхода в электронвольтах ( $1 \text{ эВ} = 1.61 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1.61 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot \text{В}$ ).

Заметим, что описанная выше методика измерения  $A$  и  $V_0$  верна только в том случае, когда работа выхода материала фотокатода и анода одинаковая. Тогда между электродами фотоэлемента отсутствует контактная разность потенциалов, которую мы не учитывали, рассматривая метод запирающего напряжения. Используемый нами фотоэлемент удовлетворяет этому условию, поскольку в нем фотокатод (фотоэмиттер) наносили распылением материала на стеклянный баллон, в результате чего распыляемый материал осаждался и на аноде.

#### 4. Особенности вольт-амперной характеристика

На рис. 7а показана одна из получаемых в работе ВАХ, которая отличается от показанных на рис. 3-5. Реальная ВАХ имеет следующую особенность. При увеличении отрицательного потенциала анода ток уменьшается, а достигнув нуля, изменяет направление, и вскоре устанавливается небольшое, почти постоянное значение обратного тока.

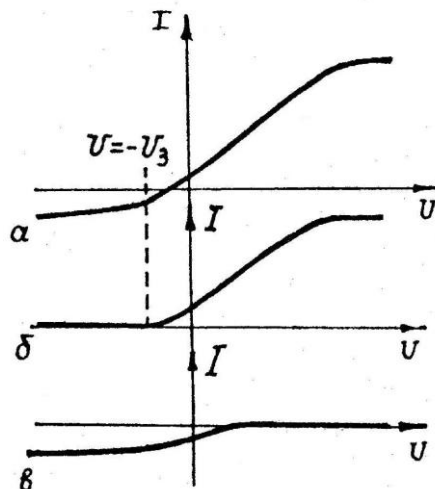


Рис. 7

Этот обратный ток объясняется эмиссией электронов с анода под действием рассеянного в фотоэлементе света. Таким образом, в одном реальном фотоэлементе как бы присутствуют одновременно два включенных антипараллельно фотоэлемента - основной и побочный, последний со значительно более слабым током. Поэтому результирующая ВАХ, показанная схематично на рис. 7а, представляет собой алгебраическую сумму ВАХ основного (рис. 7б) и побочного (рис. 7в) фотоэлементов. Отсюда следует, что запирающее напряжение  $U_3$  следует определять не в точке  $I=0$ , а там, где результирующая кривая (см. рис. 7а) выходит на горизонтальный (или почти горизонтальный) участок. Поэтому для нахождения  $U_3$  необходимо тщательно измерить и построить график ВАХ в области обратного тока.

#### 5. Получение монохроматического света

Монохроматический свет – световое излучение одной определенной частоты  $\omega$  (соответственно длины волны  $\lambda$ ). В действительности строго монохроматического света не существует, так как такое излучение должно неограниченно простирается во времени. Всякое ограниченное излучение охватывает некоторый интервал частот  $\Delta\omega$  (соответственно длины волн  $\Delta\lambda$ ). Если этот интервал мал  $\Delta\omega \ll \omega$  (или  $\Delta\lambda \ll \lambda$ ), то излучение близко к монохроматическому свету и называется квазимонохроматическим.

Существуют различные способы монохроматизации света, т.е. выделение из спектра излучения источника электромагнитных волн в определенном интервале длин волн. Методы получения монохроматического света основаны на явлениях взаимодействия света с веществом (селективное поглощение, дисперсия) либо на свойствах распространения света в оптически неоднородных средах (интерференция, дифракция).

В данной работе получение монохроматического света основано на дифракции света с использованием дифракционной решетки.

## 6. Дифракция плоских световых волн на дифракционных решетках

Под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения света, если оно не может быть истолковано как результат отражения, преломления.

Расчет интенсивности дифракционной картины осуществляют с использованием принципа Гюгенса – Френеля: а) волна распространяется таким образом, что каждая точка пространства, которую она достигает, становится центром вторичных сферических волн; б) положение поверхности волнового фронта в последующие моменты времени определяется интерференцией когерентных вторичных волн.

Прозрачная дифракционная решетка для световых волн – это пластина из прозрачного материала (обычно из стекла), на поверхности которой каким-либо путем (механическим или фотоспособом) нанесено большое число параллельных равностоящих непрозрачных штрихов.

Пусть на пути распространения плоской монохроматической световой волны с длиной волны  $\lambda$  расположена непрозрачная преграда, содержащая  $N$  параллельных щелей шириной  $b$  на одинаковом расстоянии  $a$  друг от друга. За дифракционной решеткой расположена собирающая линза, в фокальной плоскости которой находится экран. На экране наблюдается дифракционная картина – чередующиеся темные и светлые полосы. В направлениях, удовлетворяющих условию:

$$\sin \varphi_m = m\lambda / d \quad (7)$$

где  $d = (a + b)$  – постоянная решетки,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , наблюдаются главные дифракционные максимумы.

Если дифракционную решетку расположить перпендикулярно лучам белого света, а за решеткой поместить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости линзы появится серия ярких линий разного цвета. В направлении, совпадающем с нормалью к поверхности решетки, всегда видна белая полоса (дифракционный максимум порядка  $m = 0$  для всех длин волн). В направлениях не совпадающих с нормалью к поверхности решетки, наблюдается либо затемненный фон, либо яркие полосы, определенного цвета (главные дифракционные максимумы  $m$ -го порядка для составляющих света с длиной волн  $\lambda$ ). Угловые координаты направлений  $\varphi_m$ , вдоль которых наблюдаются главные дифракционные максимумы порядка  $m$  удовлетворяют условию (7).

На рис. 8 изображены схематические спектры разных порядков даваемых решеткой, при пропускании через нее белого света. Чем меньше  $\lambda$ , тем меньшему углу  $\varphi$  соответствует положение максимумов. В центре лежит узкий максимум

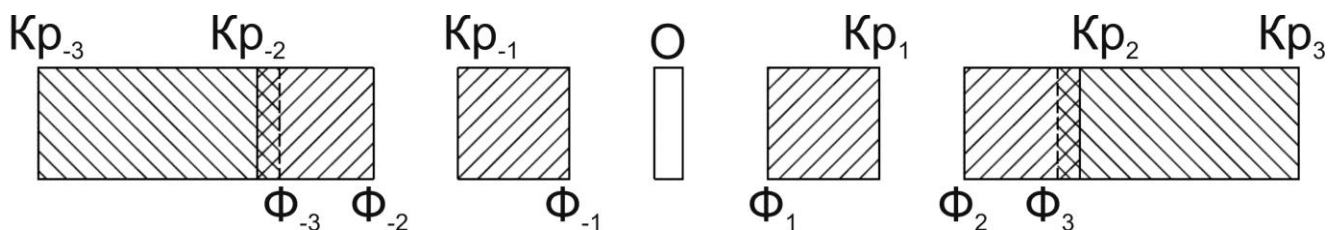


Рис. 8.

нулевого порядка; у него окрашены только края. Для каждого максимума порядка  $m = 1, 2, 3, \dots$  белый свет разлагается решеткой в спектр так, что внутренний его край окрашен в фиолетовый цвет ( $\Phi$ ), наружный – в красный ( $Kp$ ). Спектры  $m$ -х порядков располагаются симметрично по обе стороны от центрального. Спектры больших порядков накладываются друг на друга (на рис. 8 для  $m = 3$ ).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Описание установки

Экспериментальная установка представлена на рис. 9.

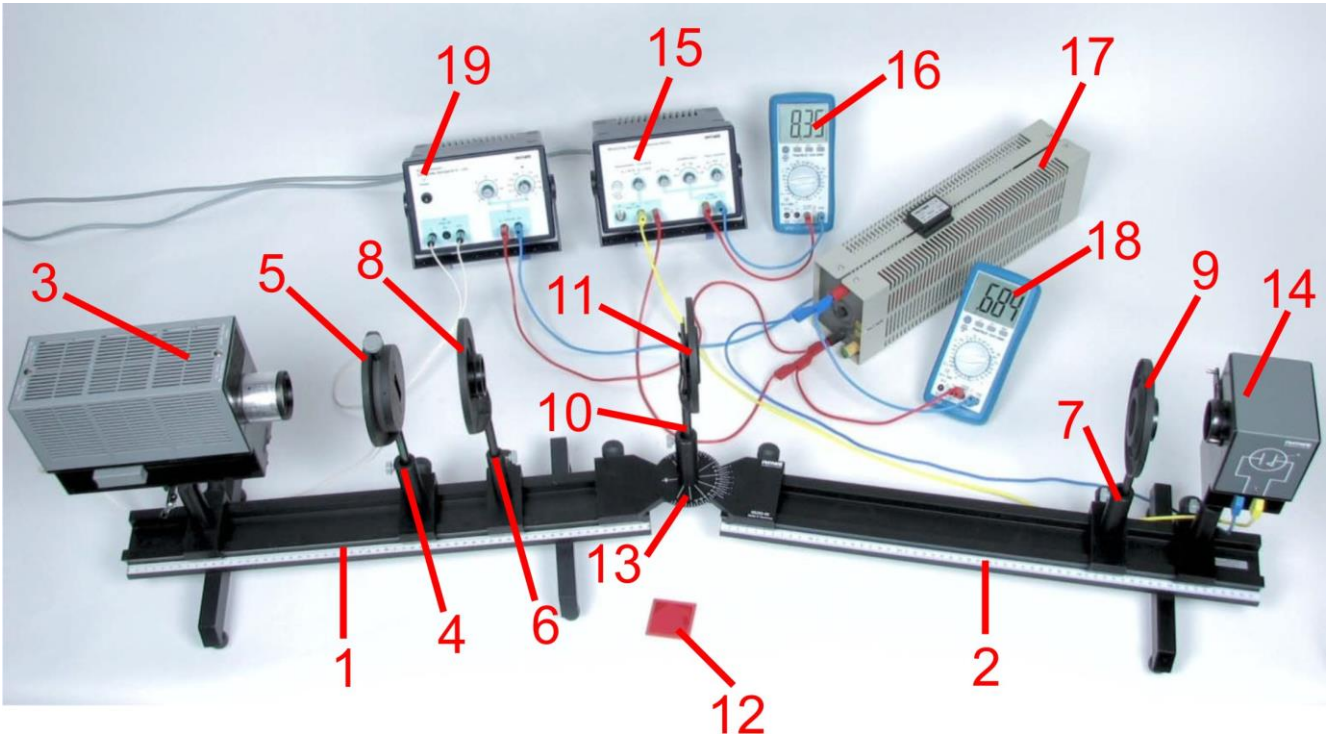


Рис. 9.

1. Две оптические скамьи (1) и (2) снабженные миллиметровой шкалой и соединенные с помощью поворотного шарнира таким образом, чтобы левая скамья (1) стояла неподвижно, а правую скамью (2) можно было поворачивать.

2. В качестве источника излучения используется галогенная лампа накаливания (3) (12В, 50 Вт), обладающая сплошным спектром. Лампа размещена в закрытом кожухе. Световой поток выводится через двухсекционный конденсор ( $F=60$  мм), встроенный в стенку кожуха.

Галогены – химические элементы главной подгруппы VII группы периодической системы Менделеева: фтор, хлор, бром, йод и астат.

3. Стойка (4) с укрепленной на ней щелью, ширину которой можно менять, вращая головку винта (5).

4. Стойки (6), (7) с укрепленными на них собирающими ( $F=+100$  мм) линзами (8), (9).

5. Стойка (10) с держателем (11) для дифракционной решетки (12) 600 штрихов/мм. Для спектрального анализа излучения используется дифракционная решетка. Дифрагированное решеткой излучение отправляется в приемник излучения. Сканирование спектра (просмотр составляющих спектра) осуществляется поворотом правой оптической скамьи (2). Отсчет угла дифракции производится по шкале верньера (13). Внутренняя часть шкалы расположена с правой стороны неподвижной оптической скамьи (1). Подвижная часть шкалы расположена с левой стороны подвижной оптической скамьи (2).

6. Приемником излучения является фотоэлемент (14), ток которого пропорционален интенсивности светового потока, падающего на его катод через входную щель корпуса. С анодной нагрузки фотоэлемента сигнал подается на вход измерительного усилителя (15). Выходное напряжение усилителя измеряется цифровым вольтметром (16).



Таким образом, регистрация интенсивности светового потока, попадающего в приемник, осуществляется в относительных единицах по шкале цифрового вольтметра.

7. Переменный резистор (17) сопротивлением 100 Ом используется в электрической цепи как потенциометр.

8. Цифровой вольтметр (18) используется для измерения напряжения между катодом и анодом фотоэлемента.

9. Блок питания (19) служит для обеспечения необходимым напряжением всех электрических цепей экспериментальной установки.

10. На рис. 10 приведена электрическая схема для проведения эксперимента. Выполните электрические соединения в соответствии с рисунком.

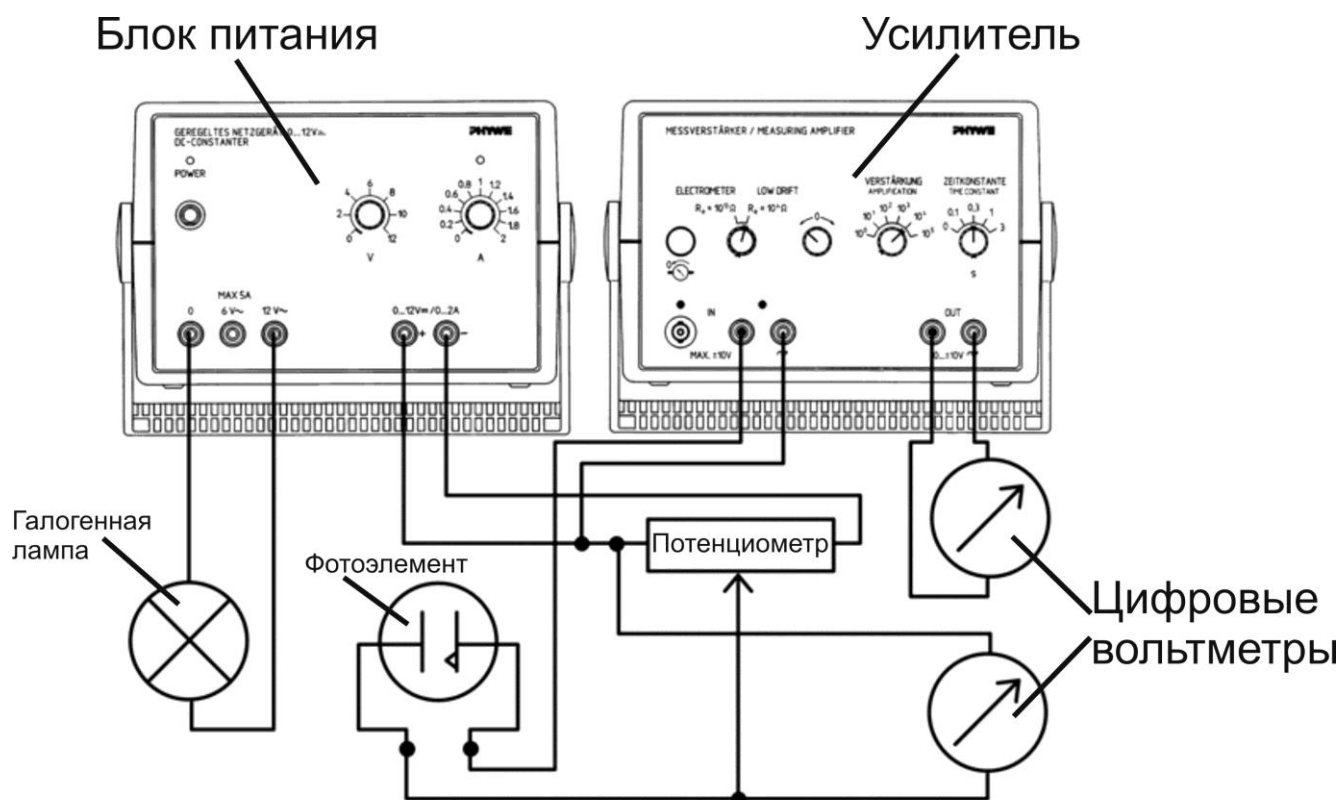


Рис. 10.

## 2. Проверка готовности установки к работе

**Внимание! Включайте источник света только на время измерений или регулировки.**

1. Установите лампу на расстоянии 9 см, щель – на расстоянии 34 см и первую 100 мм линзу на расстоянии 44 см от левого края левой оптической скамьи и включите лампу.

2. Установите ширину щели приблизительно равной ширине входной щели фотоэлемента.

3. Перемещая патрон лампы фокусируйте свет, исходящий от лампы, в плоскости щели (выполняется лаборантом).

4. Перемещайте линзу так, чтобы луч света после линзы шел параллельно – вы можете оценить это по пучку света на ближайших поверхностях.

5. Вставьте решетку 600 штрихов/мм в держатель диафрагмы в центре поворотного шарнира.

6. Выровняйте штрихи решетки по вертикали, наблюдая за картиной спектра на близлежащих поверхностях – на одинаковой высоте по обеим сторонам решетки.
7. Поместите фотозаэлемент к правому краю правой оптической скамьи, используя вход щели корпуса.
8. Сфокусируйте свет на входе щели фотозаэлемента с помощью другой 100 мм линзы, находящейся в передней части фотозаэлемента.
9. Запишите угол как нулевой, когда весь недифрагированный свет поступает во входную щель фотозаэлемента.
10. Установите измерительный усилитель в режим с усилением  $10^5$  и постоянной времени 0.3 с.
11. Проконтролируйте, чтобы усилитель был установлен на нуль – без подключения ко входу установите выходное напряжение с помощью кнопки установки «0».
12. Установите напряжение источника питания потенциометра 3 В, ток на 1 А.
13. Подвижный движок потенциометра переведите в крайнее левое положение.
14. Передвигая движок потенциометра вправо наблюдайте за показаниями цифрового вольтметра, подключенного к выходу усилителя, которые пропорциональны фототоку в зависимости от задерживающего напряжения поданного на фотозаэлемент.

### **3. Дополнительные указания по измерениям**

1. Измерение фототока в данной работе представляет известную трудность из-за очень малого его значения ( $10^{-6} \dots 10^{-11}$  А). Входное сопротивление измерительного усилителя составляет 10000 Ом. Если усилитель настроен на усиление  $10^4$ , то один вольт на выходе усилителя соответствует 0.0001 В на входе и, таким образом, току 10 нА.

2. Считывание со шкалы верньера на поворотном шарнире можно производить следующим образом. Возьмите на внутренней шкале ближайшее нижнее показание угла относительно 0 – отметки на наружной шкале и добавьте показания угла по верньеру, для положения при котором линии верньера (наружные, подвижные) и линии шкалы на круглой пластине (фиксированные в центре) совпадут. Пример считывания со шкалы верньера представлен на рис. 11. Ближайшая самая низкая отметка возле нулевой отметки –  $15^\circ$ . Следующие совпадающие отметки –  $1.5^\circ$ . Таким образом угол равен  $16.5^\circ$ .

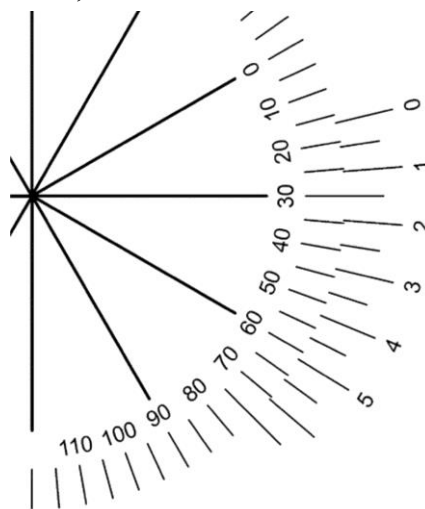


Рис. 11.

### **4. Выполнение эксперимента**

**Внимание! Включайте источник света только на время измерений или регулировки.**

**Задание 1.** Вычисление угла дифракции спектрометра в зависимости от длины волны излучаемого света.

С использованием уравнения (7) угол дифракции определяется соотношением:

$$\varphi = \arcsin(\lambda / d),$$

где  $d$  – постоянная решетки (в данном случае 1/600 мм),  $\lambda$  – длина волны излучаемого света (значения приводятся в таблице 1) и  $m = 1$  – порядок дифракционного максимума в данном случае.

Таблица 1

Угол дифракции, град.	$\lambda$ , нм	$\nu$ , $10^{12}$ Гц.	$U_z$ , В
	389		
	403		
	431		
	473		
	515		
	543		
	570		
	624		

Полученные значения  $\varphi$  согласуйте с преподавателем и запишите в таблицу 1.

**Задание 2.** Вычисление частоты света  $\nu$  в зависимости от угла дифракции спектрометра.

Частота света  $\nu$  может быть вычислена по формуле  $\nu = c/\lambda$ , где скорость света  $c=3 \cdot 10^8$  м/с,  $\lambda$  – выбранная длина волны. Результаты запишите в таблицу 1.

**Задание 3.** Экспериментальное определение запирающего напряжения  $U_z$  для различных частот света  $\nu$ .

1. Подсоединить блок питания и усилитель к источнику питания, т.е. вставить вилку кабеля питания в розетку с напряжением 220 В. После этого тумблер «Сеть», находящийся на задней стенке приборов, поставить в положение «Включено».

2. Установить на верньере угол дифракции (см. задание 1) соответствующий длине волны 389 нм.

3. Передвигая движок потенциометра вправо установите напряжение (пропорциональное фототоку) на цифровом вольтметре (16) равно нулю. Тогда напряжение на цифровом вольтметре (18) будет равно запирающему напряжению. Результат запишите в таблицу 1.

4. Повторите пункты (2) и (3) для остальных углов дифракции и длин волн приведенных в таблице 1.

**Внимание! При углах дифракции  $\varphi > 21^\circ$  применить красный фильтр для поглощения ультрафиолетового излучения второго порядка спектра, которое может повлиять на измерения.**

## **5. Обработка и анализ результатов**

1. Постройте график зависимости  $|U_3|$  от  $\nu$ .
2. Проведите с помощью линейки прямую линию так, чтобы отклонение точек от этой прямой было наименьшим.
3. Определите с помощью график  $\Delta U_3 / \Delta \nu$ .
4. По формуле (6) вычислите значение постоянной Планка  $h$ .
5. По формуле  $(h_{\text{табл.}} - h) / h_{\text{табл.}}$  рассчитайте относительную погрешность в определении значения постоянной Планка в сравнении с табличным значениям  $h_{\text{табл.}} = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта. Какие из этих законов проверялись в работе? Каковы результаты этой проверки?
2. Покажите, что классическая электромагнитная теория света не объясняет все законы внешнего фотоэффекта. Как они объясняются на основе квантовых представлений о природе света? Определите энергию, импульс, массу фотона с длиной волны 500 нм.
3. В чем сущность метода запирающего напряжения? Объясните методику определения  $\nu_0$ ,  $A$ ,  $h$ .
4. Как объяснить теоретически и проверить в эксперименте: а) линейную зависимость запирающего напряжения от частоты света; б) независимость запирающего напряжения от интенсивности света.
5. Определите длину волны, частоту, импульс и массу фотона с энергией: 1 эВ, 0.5 эВ, 100 эВ.
6. Красная граница фотоэффекта для вольфрама 230 нм. Какую длину волны должен иметь свет, чтобы максимальная энергия испускаемых электронов равнялась 1.5 эВ?
7. Красная граница фотоэффекта для меди равна 1.1 ПГц. Найдите максимальную энергию фотоэлектронов (в джоулях и электронвольтах), испускаемых с поверхности меди при облучении ее светом частотой 1.5 ПГц, и запирающее напряжение для этого случая (контактной разностью потенциалов пренебречь)
8. Работа выхода для натрия составляет 2.3 эВ. При какой максимальной длине волны света еще будет происходить испускание фотоэлектронов с поверхности натрия? Какую максимальную кинетическую энергию имеют фотоэлектроны при облучении поверхности натрия светом с длиной волны 2000 ангстрем?