

Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и определение постоянной Планка

Дедков Денис, Маслов Артём
группа Б01-108а
02.10.2023

Цель и задачи работы:

1. Исследовать зависимость величины фототока от задерживающего потенциала и частоты падающего излучения.
2. Вычислить величину постоянной Планка.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1:

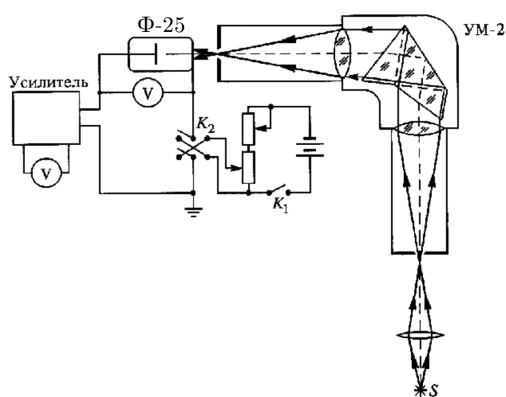


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

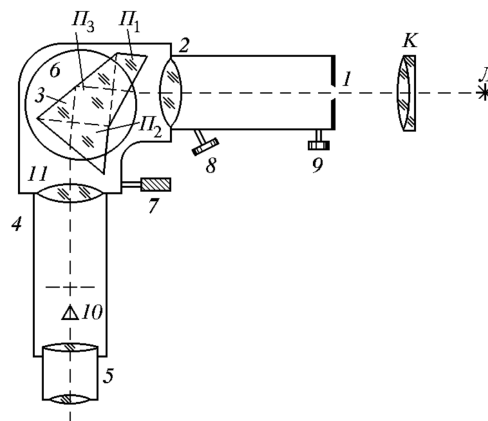


Рис. 2: Схема монохроматора.

Излучения источника S фокусируется на входную щель призменного монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента Ф-25.

Рассмотрим схему монохроматора рисунок 2. Входная щель 1 снабжена микрометрическим винтом 9 для регулировки нужной ширины щели. Коллиматорный объектив 2 имеет микрометрический винт 8, который позволяет смещать объектив относительно щели при фокусировке различных спектральных линий. Спектральная призма 3 выделяет узкую линию спектра падающего излучения. Поворотный столик 6 позволяет и барабан 7 с делениями позволяют наводиться на нужную спектральную линию. Зрительная труба, состоящая из объектива 4 и окуляра 5, позволяет проградировать барабан на спектральные линии. При измерениях зрительная трубка заменяется блоком фотодетектора.

Фототок на фотоэлемента усиливается усилителем и напряжение, пропорциональное току измеряется вольтметром. Величина задерживающего напряжения фотоэлемента измеряется вторым вольтметром. Величину задерживающего напряжения можно регулировать с помощью блока питания.

Оборудование и приборы

Экспериментальная установка №1.14.

1. Фотоэлемент Ф-25.
2. Призменный монохроматор УМ-2. Рабочий диапазон от 0.38 мкм до 1.00 мкм. Инвентарный номер №410134125745. Заводской номер №51026.
3. Неоновая лампа.

4. Лампа накаливания К-12.

5. Вольтметры GDM-8145. Инвентарный номер вольтметра, измеряющего напряжение пропорциональное фототоку, №51391. Инвентарный номер вольтметра, измеряющего задерживающее напряжение, №51399. Погрешность измерения постоянного напряжения $\sigma = \pm(0.03\%rdg + 4digits)$.

6. Блок питания. Инвентарный номер №410134125745.

Первичные экспериментальные данные

В таблице 1 приведены данные градуировки монохроматора. λ – длина спектральной линии ^{10}Ne , N – отсчёты в градусах, соответствующие данной спектральной линии.

Таблица 1.
Градуировка
призмного
монохроматора.

$\lambda, \text{\AA}$	$N, ^\circ$
7032	2992
6929	2966
6717	2895
6678	2882
6599	2855
6533	2832
6507	2824
6402	2785
6383	2778
6334	2759
6305	2748
6266	2732
6217	2712
6164	2690
6143	2681
6096	2662
6074	2651
6030	2632
5976	2607
5945	2592
5882	2562
5852	2546
5401	2287

Таблица 2. Длина волны 7032.41 \AA .

$N = 2992^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.00	0.21	0.61	0.02
6.00	0.18	0.60	0.02
5.00	0.15	0.59	0.02
4.00	0.12	0.58	0.02
3.00	0.09	0.55	0.02
2.00	0.06	0.51	0.02
1.80	0.06	0.51	0.02
1.60	0.05	0.49	0.02
1.40	0.05	0.47	0.02
1.20	0.04	0.45	0.02
1.00	0.03	0.41	0.02
0.80	0.03	0.35	0.01
0.60	0.02	0.26	0.01
0.50	0.02	0.22	0.01
0.40	0.02	0.18	0.01
0.30	0.01	0.14	0.01
0.20	0.01	0.10	0.01
0.10	0.01	0.06	0.01
0.00	0.01	0.03	0.01
-0.05	0.01	0.02	0.01
-0.10	0.01	0.01	0.01
-0.16	0.01	0.00	0.01

Таблица 3. Длина волны 6678.28 \AA .

$N = 2882^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.43	0.23	0.61	0.02
7.00	0.21	0.60	0.02
6.00	0.18	0.60	0.02
5.00	0.15	0.58	0.02
4.00	0.12	0.57	0.02
3.00	0.09	0.55	0.02
2.00	0.06	0.51	0.02
1.80	0.06	0.50	0.02
1.60	0.05	0.49	0.02
1.40	0.05	0.48	0.02
1.20	0.04	0.46	0.02
1.00	0.03	0.43	0.02
0.80	0.03	0.39	0.02
0.60	0.02	0.32	0.01
0.50	0.02	0.27	0.01
0.40	0.02	0.23	0.01
0.30	0.01	0.18	0.01
0.20	0.01	0.14	0.01
0.10	0.01	0.10	0.01
0.05	0.01	0.08	0.01
0.00	0.01	0.06	0.01
-0.05	0.01	0.04	0.01
-0.10	0.01	0.03	0.01
-0.15	0.01	0.02	0.01
-0.20	0.01	0.01	0.01
-0.25	0.01	0.00	0.01

Таблица 4. Длина волны 6506.53Å.

$N = 2824^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.00	0.21	0.60	0.02
6.00	0.18	0.59	0.02
5.00	0.15	0.58	0.02
4.00	0.12	0.57	0.02
3.00	0.09	0.54	0.02
2.00	0.06	0.51	0.02
1.80	0.06	0.50	0.02
1.60	0.05	0.49	0.02
1.40	0.05	0.48	0.02
1.20	0.04	0.46	0.02
1.00	0.03	0.43	0.02
0.80	0.03	0.39	0.02
0.60	0.02	0.32	0.01
0.50	0.02	0.28	0.01
0.40	0.02	0.24	0.01
0.30	0.01	0.20	0.01
0.20	0.01	0.15	0.01
0.10	0.01	0.11	0.01
0.05	0.01	0.09	0.01
0.00	0.01	0.07	0.01
-0.05	0.01	0.06	0.01
-0.10	0.01	0.04	0.01
-0.15	0.01	0.03	0.01
-0.20	0.01	0.02	0.01
-0.25	0.01	0.01	0.01
-0.30	0.01	0.00	0.01

Таблица 6. Длина волны 6217.28Å.

$N = 2712^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.00	0.21	0.59	0.02
6.00	0.18	0.58	0.02
5.00	0.15	0.57	0.02
4.00	0.12	0.56	0.02
3.00	0.09	0.54	0.02
2.00	0.06	0.50	0.02
1.80	0.06	0.49	0.02
1.60	0.05	0.48	0.02
1.40	0.05	0.47	0.02
1.20	0.04	0.45	0.02
1.00	0.03	0.42	0.02
0.80	0.03	0.38	0.02
0.60	0.02	0.31	0.01
0.50	0.02	0.28	0.01
0.40	0.02	0.24	0.01
0.30	0.01	0.20	0.01
0.20	0.01	0.16	0.01
0.10	0.01	0.12	0.01
0.00	0.01	0.09	0.01
-0.10	0.01	0.06	0.01
-0.15	0.01	0.04	0.01
-0.20	0.01	0.03	0.01
-0.25	0.01	0.02	0.01
-0.30	0.01	0.01	0.01
-0.35	0.01	0.00	0.01
-0.38	0.02	0.00	0.01

Таблица 5. Длина волны 6334.42Å.

$N = 2759^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.00	0.21	0.60	0.02
6.00	0.18	0.59	0.02
5.00	0.15	0.58	0.02
4.00	0.12	0.56	0.02
3.00	0.09	0.54	0.02
2.00	0.06	0.51	0.02
1.80	0.06	0.50	0.02
1.60	0.05	0.49	0.02
1.40	0.05	0.47	0.02
1.20	0.04	0.45	0.02
1.00	0.03	0.43	0.02
0.80	0.03	0.38	0.02
0.60	0.02	0.32	0.01
0.50	0.02	0.28	0.01
0.40	0.02	0.24	0.01
0.30	0.01	0.20	0.01
0.20	0.01	0.16	0.01
0.10	0.01	0.12	0.01
0.00	0.01	0.08	0.01
-0.05	0.01	0.07	0.01
-0.10	0.01	0.05	0.01
-0.15	0.01	0.04	0.01
-0.20	0.01	0.02	0.01
-0.25	0.01	0.01	0.01
-0.30	0.01	0.01	0.01
-0.34	0.01	0.00	0.01

Таблица 7. Длина волны 6074.34Å.

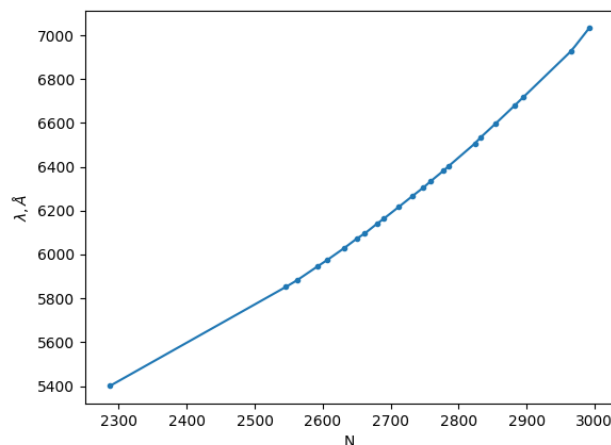
$N = 2651^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.00	0.21	0.59	0.02
6.00	0.18	0.58	0.02
5.00	0.15	0.56	0.02
4.00	0.12	0.55	0.02
3.00	0.09	0.53	0.02
2.00	0.06	0.49	0.02
1.80	0.06	0.48	0.02
1.60	0.05	0.47	0.02
1.40	0.05	0.46	0.02
1.20	0.04	0.44	0.02
1.00	0.03	0.41	0.02
0.80	0.03	0.36	0.01
0.60	0.02	0.30	0.01
0.50	0.02	0.27	0.01
0.40	0.02	0.23	0.01
0.30	0.01	0.20	0.01
0.20	0.01	0.16	0.01
0.10	0.01	0.13	0.01
0.00	0.01	0.09	0.01
-0.10	0.01	0.06	0.01
-0.15	0.01	0.05	0.01
-0.20	0.01	0.03	0.01
-0.25	0.01	0.02	0.01
-0.30	0.01	0.01	0.01
-0.35	0.01	0.01	0.01
-0.41	0.02	0.00	0.01

Таблица 8. Длина волны 5944.83Å.

$N = 2592^\circ$			
$U_{\text{зап}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{зап}}}, \text{В}$	$U_{\text{фт}}, \text{В}$	$\sigma_{U_{\text{фт}}}, \text{В}$
7.00	0.21	0.58	0.02
6.00	0.18	0.57	0.02
5.00	0.15	0.56	0.02
4.00	0.12	0.55	0.02
3.00	0.09	0.52	0.02
2.00	0.06	0.49	0.02
1.80	0.06	0.48	0.02
1.60	0.05	0.47	0.02
1.40	0.05	0.45	0.02
1.20	0.04	0.43	0.02
1.00	0.03	0.40	0.02
0.80	0.03	0.35	0.01
0.60	0.02	0.29	0.01
0.50	0.02	0.26	0.01
0.40	0.02	0.22	0.01
0.30	0.01	0.19	0.01
0.20	0.01	0.16	0.01
0.10	0.01	0.13	0.01
0.00	0.01	0.10	0.01
-0.10	0.01	0.07	0.01
-0.15	0.01	0.05	0.01
-0.20	0.01	0.04	0.01
-0.25	0.01	0.03	0.01
-0.30	0.01	0.02	0.01
-0.35	0.01	0.01	0.01
-0.40	0.02	0.00	0.01
-0.43	0.02	0.00	0.01

Обработка экспериментальных данных

Построим график градуировочной кривой призматического монохроматора.



Погрешность измерения угла $\sigma_N = 1^\circ$. Длина спектральной линии является табличным значением, погрешностью её определения пренебрегаем.

Видно, что график не является прямой и поэтому необходимо было провести градуировку: поставить в соответствие каждой спектральной линии угол, измеренный по отсчётному барабану.

Построим графики зависимостей корня из напряжения, пропорционального току, от задерживающего напряжения $\sqrt{U_I(V)}$.

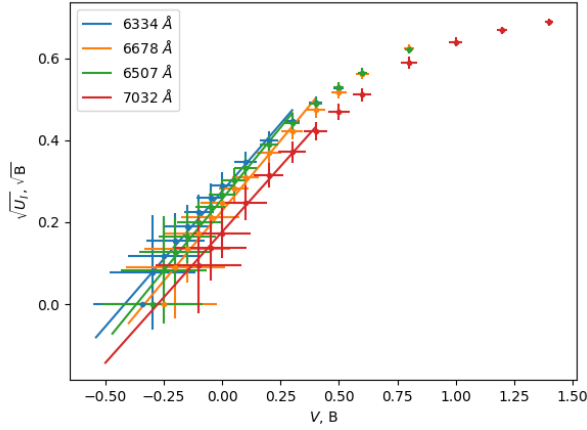


Рис. 3: График зависимости $\sqrt{U_I}(V)$ для 1 части спектра.

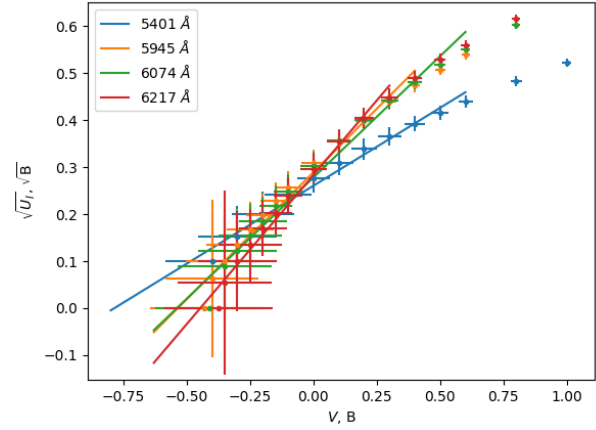


Рис. 4: График зависимости $\sqrt{U_I}(V)$ для 2 части спектра.

Согласно теории $\sqrt{U_I} \propto V$. Методом наименьших квадратов построим аппроксимирующие кривые и определим величину задерживающего напряжения:

$$\begin{aligned}\lambda &= 7032.41 \text{ Å}, V_0 = (-0.28 \pm 0.01) \text{ В}, \\ \lambda &= 6678.28 \text{ Å}, V_0 = (-0.33 \pm 0.02) \text{ В}, \\ \lambda &= 6506.53 \text{ Å}, V_0 = (-0.37 \pm 0.02) \text{ В}, \\ \lambda &= 6334.42 \text{ Å}, V_0 = (-0.42 \pm 0.02) \text{ В}, \\ \lambda &= 6217.28 \text{ Å}, V_0 = (-0.45 \pm 0.02) \text{ В}, \\ \lambda &= 6074.34 \text{ Å}, V_0 = (-0.54 \pm 0.03) \text{ В}, \\ \lambda &= 5944.83 \text{ Å}, V_0 = (-0.54 \pm 0.03) \text{ В}, \\ \lambda &= 5400.56 \text{ Å}, V_0 = (-0.79 \pm 0.04) \text{ В}.\end{aligned}$$

Построим график зависимости задерживающего напряжения от частоты излучения.

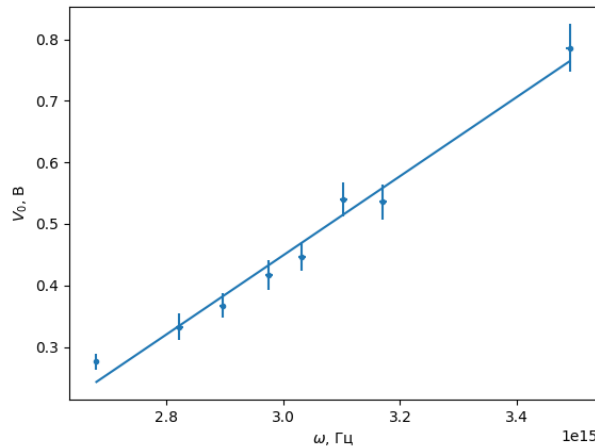


Рис. 5: График зависимости $U_0(\omega)$.

С помощью метода наименьших квадратов проведем аппроксимирующую прямую. По коэффициенту наклона прямой a определим постоянную Планка: $\hbar = a \cdot e = (1.03 \pm 0.06) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Построим график зависимостей $U_I(V)$.

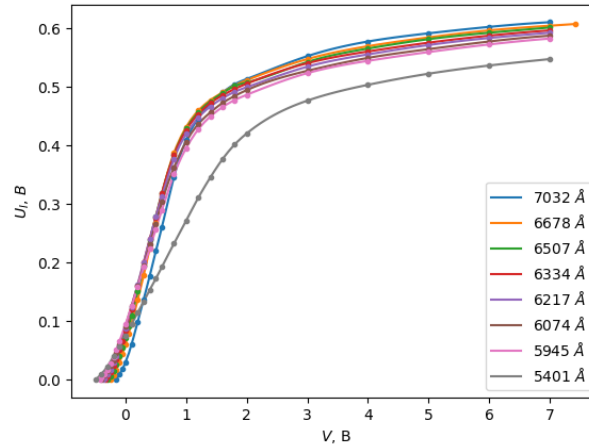


Рис. 6: График зависимости $U_I(V)$.

По графику видно, что с увеличением длины волны значение тока насыщения увеличивается, а величина задерживающего напряжения уменьшается.

Обсуждение результатов и выводы

В работе была экспериментально подтверждена линейная зависимость корня из фототока от величины задерживающего напряжения:

$$\sqrt{I} \propto V_{\text{задерж}}.$$

Была подтверждена линейная зависимость задерживающего напряжения от частоты падающего на фотоэлемент излучения:

$$V_{\text{задерж}} \propto \omega.$$

Была определена постоянная Планка:

$$\hbar = (1.03 \pm 0.06) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad \hbar_{\text{теор}} = 1.054 \dots \cdot 10^{-34}.$$

В пределах погрешности теоретическое и измеренное значения совпадают.