

Лабораторная работа 5.1.1

Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и определение постоянной Планка

Павлов Матвей

14 октября 2025 г.

Аннотация

Исследовать зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения. Вычислить величину постоянной Планка. С помощью сцинтилляционного спектрометра исследовать энергетический спектр γ -квантов, рассеянных на графите. Определить энергию рассеянных γ -квантов в зависимости от угла рассеяния, а также энергию покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние.

Теоретические сведения

Явление фотоэффекта — испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения — удивительно объясняется в рамках фотонной теории света. Согласно этой теории, фотон с энергией $\hbar\omega$ передаёт свою энергию электрону в металле. Часть этой энергии тратится на преодоление потенциального барьера на поверхности (работа выхода), остальная часть переходит в кинетическую энергию вылетевшего электрона.

Энергетический баланс процесса описывается уравнением Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\hbar\omega = W + E_{\max}, \quad (1)$$

где W — работа выхода электрона из катода, E_{\max} — максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов. Реальный энергетический спектр вылетающих электронов является непрерывным и простирается от нуля до E_{\max} .

Для измерения кинетической энергии фотоэлектронов используется двухэлектродная система (катод и анод). При подаче на анод задерживающего потенциала ($V < 0$) на анод попадают только электроны, кинетическая энергия которых превышает $e|V|$. При некотором значении $V = -V_0$ (запирающий потенциал) фототок прекращается, так как даже самые быстрые электроны не достигают анода (рис. 1).

Следует отметить, что даже при напряжениях выше потенциала запирания фототок не обрывается мгновенно. Наличие так называемого *теневого тока* обусловлено электронами, которые вылетают с катода с начальной скоростью, направленной не прямо на анод, но могут достичь его за счёт теплового движения или в результате рассеяния. Этот эффект необходимо учитывать при точных измерениях, экстраполируя линейный участок зависимости $\sqrt{I} = f(V)$ до пересечения с осью напряжений.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов связана с запирающим потенциалом соотношением:

$$E_{\max} = eV_0.$$

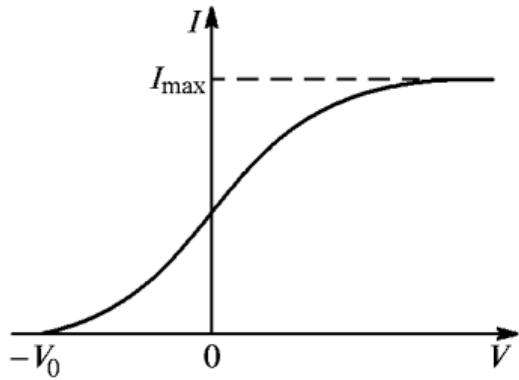


Рис. 1. Зависимость фототока от напряжения на аноде

Рис. 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде.

Подстановка этого выражения в уравнение (1) даёт уравнение Эйнштейна в форме, удобной для экспериментальной проверки:

$$eV_0 = \hbar\omega - W. \quad (2)$$

В случае плоскопараллельной геометрии электродов зависимость фототока от напряжения в области задерживающих потенциалов хорошо аппроксимируется выражением:

$$\sqrt{I} \propto V_0 - V, \quad (3)$$

то есть квадратный корень из силы фототока линейно зависит от напряжения.

Для экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна следует определить запирающие потенциалы V_0 для различных частот падающего света ω и построить зависимость $V_0(\omega)$. Согласно уравнению (2), эта зависимость является линейной:

$$V_0(\omega) = \frac{\hbar}{e}\omega - \frac{W}{e}. \quad (4)$$

По угловому коэффициенту полученной прямой можно определить постоянную Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e}. \quad (5)$$

Как следует из уравнения (4), угловой коэффициент не зависит от материала катода, что позволяет определить фундаментальную постоянную \hbar .

Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рисунке 2. Свет от источника S с помощью конденсора фокусируется на входную щель призменного монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента Ф-25. Для проведения измерений окуляр монохроматора заменяется на блок фотоэлемента.

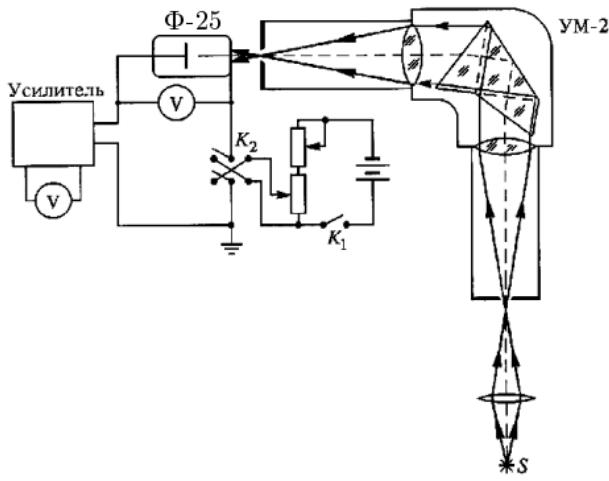


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

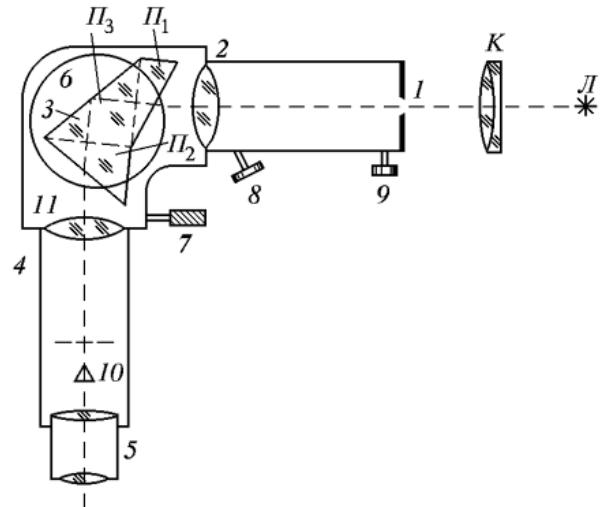


Рис. 3: Схема монохроматора

Основные элементы монохроматора представлены на рисунке 3:

- Входная щель 1 с микрометрическим винтом 9 для регулировки ширины (0.01–4 мм)
- Коллиматорный объектив 2 с микрометрическим винтом 8 для точной фокусировки спектральных линий
- Система призм 3, предназначенная для дисперсии света и поворота лучей на 90°
- Поворотный столик 6 с винтом 7 и отсчетным барабаном для сканирования спектра
- Зрительная труба с объективом 4, окуляром 5 и острием указателя 10
- Корпус 11, оптическая скамья и пульт управления

Измеряемая спектральная линия совмещается с острием указателя, а её положение считывается по барабану.

Фотоэлемент имеет фотокатод из Na₂, K, Sb, Cs и конструктивно объединен с усилителем постоянного тока для измерения малых фототоков. Для снятия вольт-амперных характеристик на фотоэлемент подается запирающее напряжение, измеряемое мультиметром. Фототок, пропорциональный показаниям цифрового вольтметра, регистрируется в зависимости от приложенного напряжения.

Ход работы

Для начала подготовим установку к работе. Для этого расположим неоновую лампу и линзу на оптическую скамью, настроим их так, чтобы свет попадал на входную щель. Далее откроем входную щель, включим подсветку окуляра и настроимся на чёткое изображение кончика указателя. Далее, для улучшения точности, вращая винт 8, настроим изображение спектра света так, чтобы избежать параллакса света и кончика указателя. Установка подготовлена к работе.

Градуировка монохроматора

Пользуясь таблицой из методических материалов, проградуируем барабан монохроматора по спектру неоновой лампы. Для этого построим (по известным из таблицы данным и полученной информации об углах из эксперимента) график зависимости длины волны света от угла на барабане.

Погрешность отсчета по шкале барабана: $\sigma_{\text{систем}} = 1$

Посчитаем случайную погрешность измерений угла для линии №22 ($\lambda = 5852 \text{ \AA}$):

№ измерения	1	2	3	4
$\varphi, {}^\circ$	2158	2158	2154	2156

Среднее значение: $\varphi_{\text{ср}} = 2156.5 {}^\circ$

Случайная погрешность:

$$\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (\varphi_{\text{ср}} - \varphi_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} = 1 {}^\circ$$

Абсолютная погрешность угла:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\sigma_{\text{сл}}^2 + \sigma_{\text{систем}}^2} \approx 1.4 {}^\circ$$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\lambda, \text{ \AA}$	7032	6929	6717	6678	6599	6533	6507	6402	6383	6334	6305	6267	6217
$\varphi, {}^\circ$	2594	2565	2500	2488	2462	2440	2432	2395	2387	2370	2359	2343	2320
n	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$\lambda, \text{ \AA}$	6164	6143	6096	6074	6030	5976	5945	5882	5852	5401	5341	5331	
$\varphi, {}^\circ$	2298	2290	2275	2264	2244	2217	2203	2172	2156	1896	1854	1848	

Таблица 1: Таблица с длинами волн полос спектра и соответствующими им углами на барабане

Для аппроксимации графика зависимости длины волны света от угла будем использовать следующую формулу.

$$\varphi(\lambda) = \varphi_0 + \frac{c}{\lambda - \lambda_0}, \text{ где } c - \text{ некоторая константа}$$

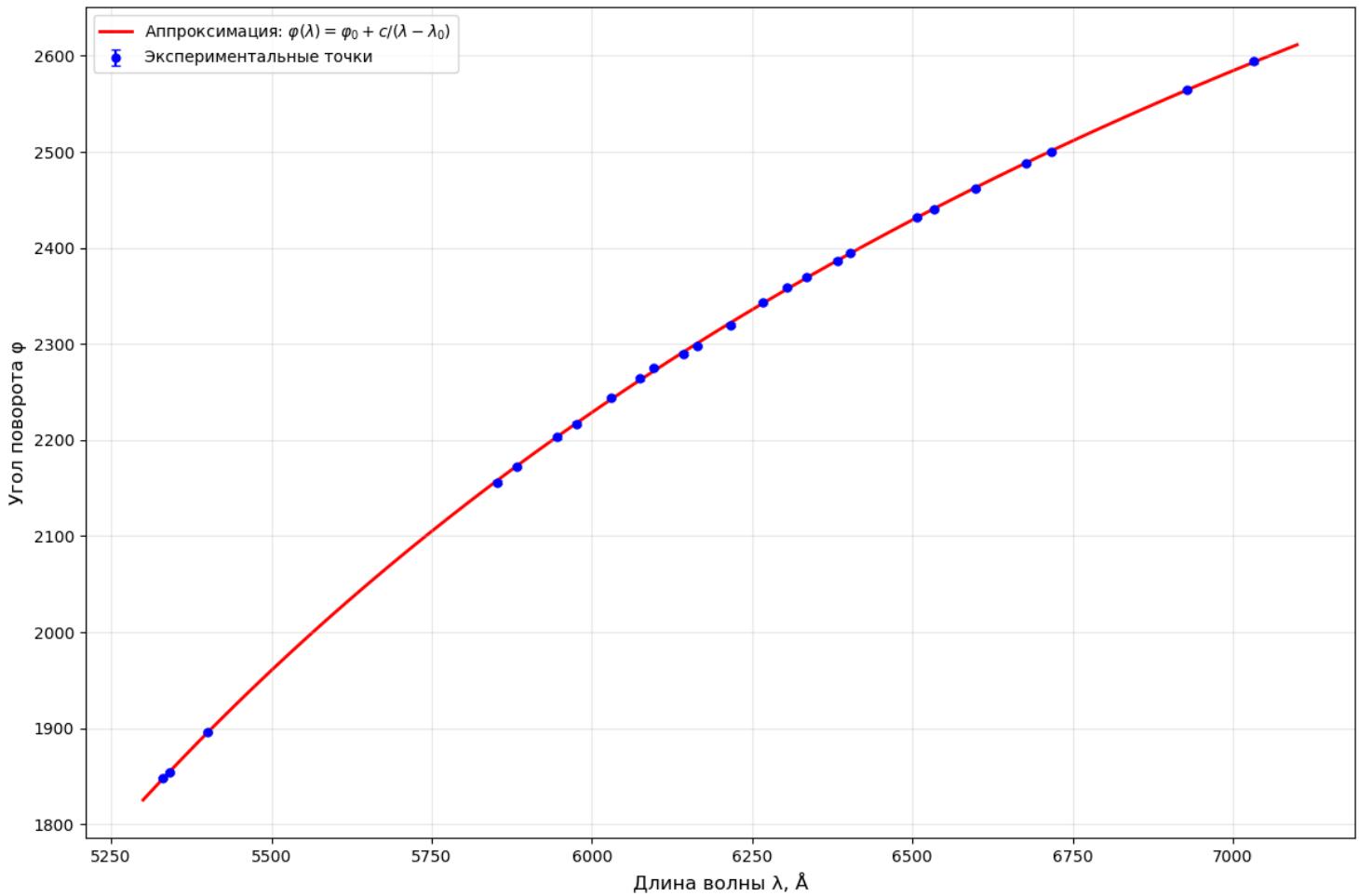


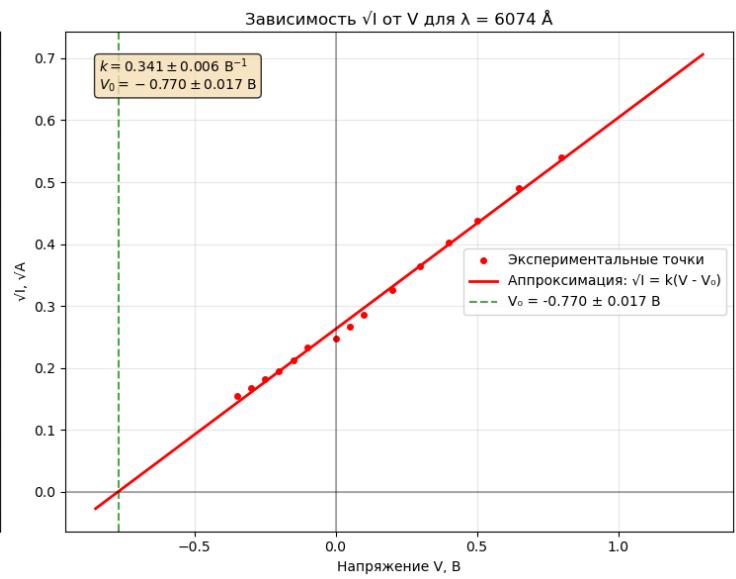
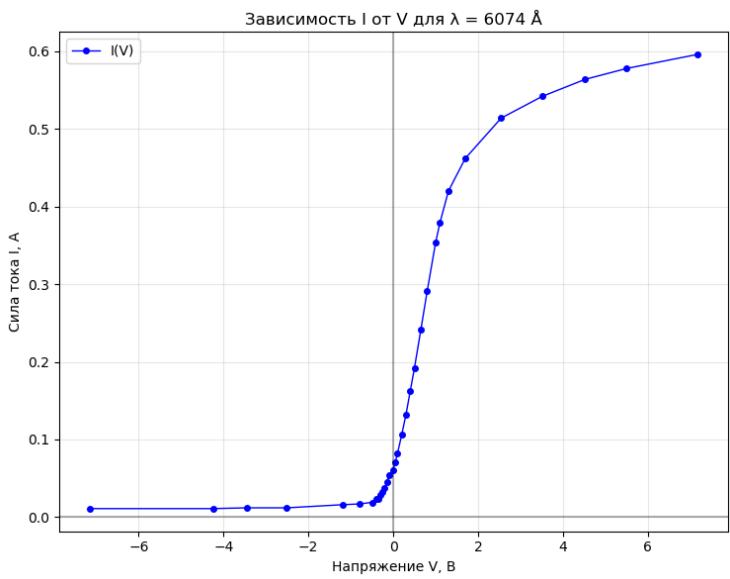
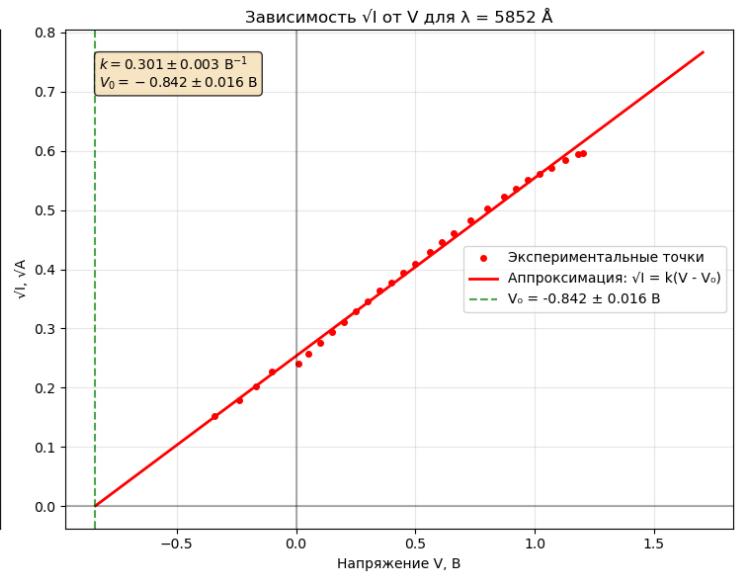
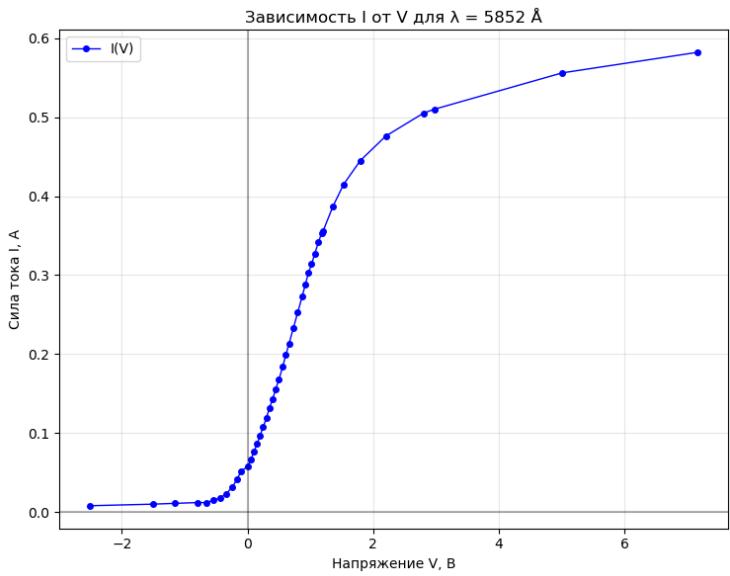
Рис. 4: Зависимость угла поворота от длины барабана

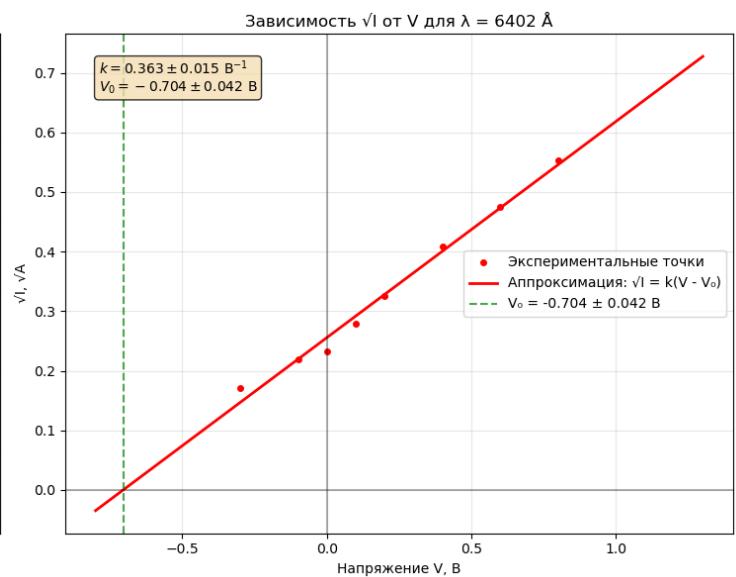
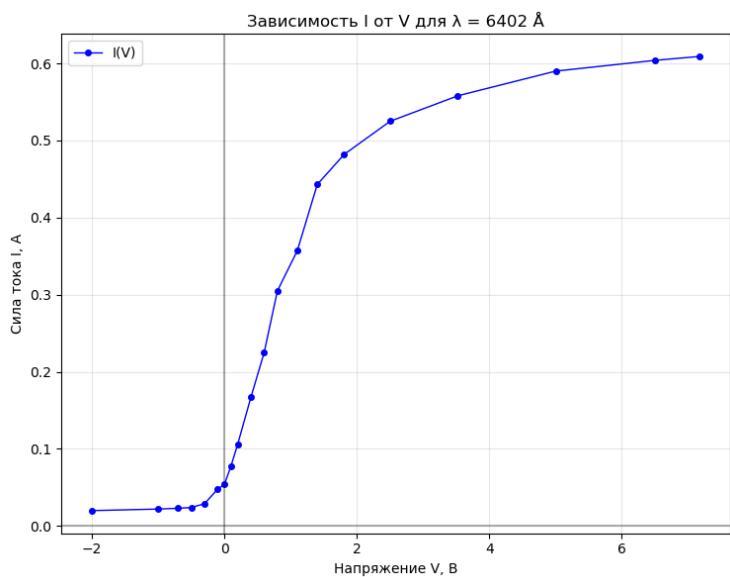
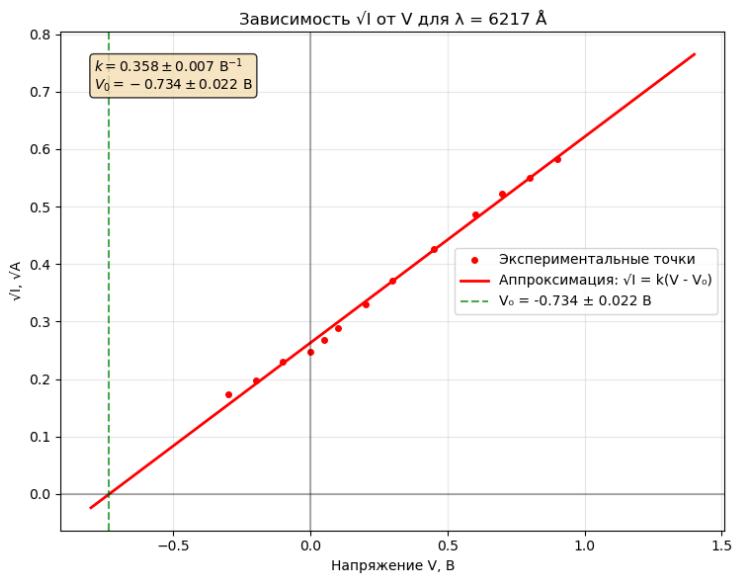
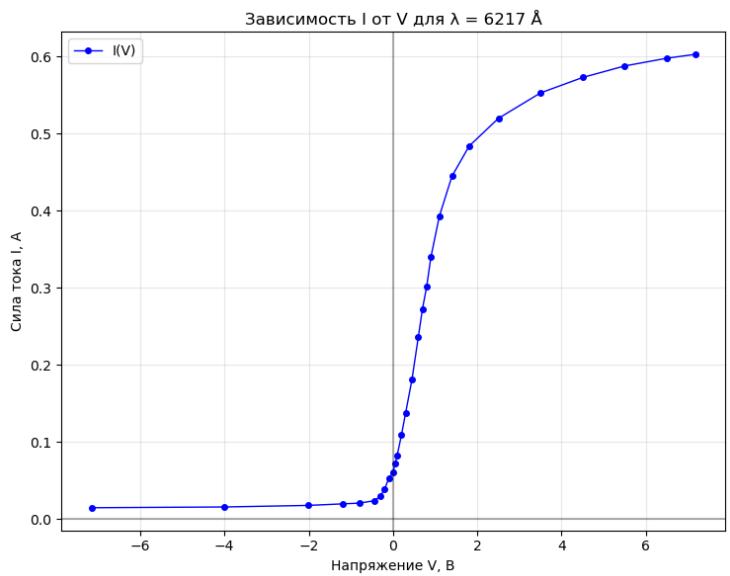
Исследование зависимости фототока от величины запирающего потенциала

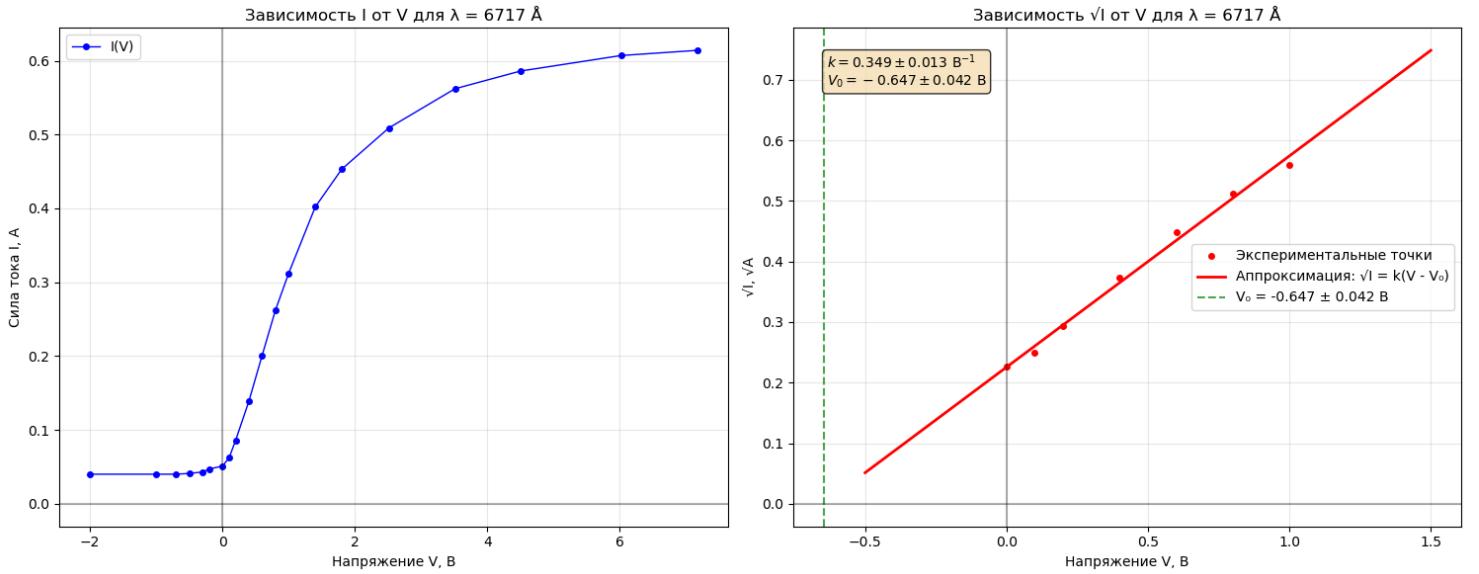
Установим вместо неоновой лампы электрическую, настроим её на резкое изображение на входной щели, затем установим показания вольтметра близким к нулю при закрытом входе монохроматора. После этого откроем входную щель.

Измерим зависимость фототока от напряжения. Рассмотрев как изменяется фототок в зависимости от напряжения, построим графики зависимости $\sqrt{I} = f(V)$ для 5 разных частот и для каждой из них найдём значение запирающего потенциала.

λ , Å										
5852		6074		6217		6402		6717		
I , A	V , B	I , A	V , B	I , A	V , B	I , A	V , B	I , A	V , B	
0.582	7.156	0.596	7.164	0.603	7.169	0.609	7.169	0.614	7.169	
0.556	5.006	0.578	5.504	0.598	6.501	0.604	6.506	0.607	6.018	
0.510	2.973	0.564	4.526	0.588	5.503	0.590	5.002	0.586	4.501	
0.505	2.799	0.542	3.511	0.573	4.500	0.558	3.525	0.562	3.511	
0.476	2.200	0.514	2.543	0.553	3.501	0.525	2.503	0.509	2.514	
0.445	1.795	0.462	1.697	0.520	2.502	0.482	1.808	0.453	1.801	
0.415	1.530	0.420	1.301	0.484	1.807	0.443	1.402	0.402	1.402	
0.387	1.359	0.379	1.100	0.445	1.400	0.357	1.100	0.312	1.000	
0.356	1.204	0.354	1.000	0.393	1.100	0.305	0.800	0.262	0.800	
0.353	1.180	0.291	0.800	0.340	0.900	0.225	0.600	0.201	0.600	
0.342	1.129	0.241	0.650	0.302	0.800	0.167	0.400	0.139	0.400	
0.327	1.070	0.192	0.500	0.273	0.700	0.106	0.200	0.086	0.200	
0.314	1.020	0.162	0.400	0.236	0.600	0.078	0.100	0.062	0.100	
0.303	0.970	0.132	0.300	0.181	0.450	0.054	0.000	0.051	0.000	
0.288	0.920	0.106	0.200	0.138	0.300	0.048	-0.100	0.047	-0.200	
0.273	0.870	0.082	0.100	0.109	0.200	0.029	-0.300	0.043	-0.300	
0.253	0.800	0.071	0.050	0.083	0.100	0.024	-0.500	0.041	-0.500	
0.233	0.730	0.061	0.000	0.072	0.050	0.023	-0.700	0.040	-0.700	
0.213	0.660	0.054	-0.100	0.061	0.000	0.022	-1.000	0.040	-1.000	
0.199	0.610	0.045	-0.150	0.053	-0.100	0.020	-2.000	0.040	-2.000	
0.184	0.560	0.038	-0.200	0.039	-0.200					
0.168	0.500	0.033	-0.250	0.030	-0.300					
0.156	0.450	0.028	-0.300	0.024	-0.450					
0.143	0.400	0.024	-0.350	0.021	-0.800					
0.132	0.350	0.023	-0.400	0.020	-1.203					
0.119	0.300	0.019	-0.500	0.018	-2.017					
0.108	0.250	0.017	-0.800	0.016	-4.006					
0.097	0.200	0.016	-1.200	0.015	-7.149					
0.086	0.150	0.012	-2.506							
0.076	0.100	0.012	-3.445							
0.066	0.050	0.011	-4.250							
0.058	0.008	0.011	-7.146							
0.052	-0.100									
0.041	-0.170									
0.032	-0.240									
0.023	-0.340									
0.018	-0.440									
0.015	-0.540									
0.012	-0.660									
0.012	-0.800									
0.011	-1.160									
0.010	-1.505									
0.008	-2.507									







№	$\varphi, {}^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$	$\omega, 10^{15} \text{ c}^{-1}$	a	b	$V_0, \text{ В}$	$\sigma_{V_0}, \text{ В}$
1	2156	5852	3.222	0.301	0.253	0.842	0.016
2	2264	6074	3.102	0.341	0.262	0.770	0.017
3	2320	6217	3.030	0.358	0.263	0.734	0.022
4	2395	6402	2.943	0.363	0.256	0.704	0.042
5	2500	6717	2.802	0.349	0.226	0.647	0.042

Таблица 2: Результаты измерений для разных длин волн, $y = ax + b$

Теперь построим график зависимости $V_0(\omega)$.

Из графика получаем:

$$k = \frac{dV_0}{d\omega} = (0.50 \pm 0.04) \cdot 10^{-15} (\text{В} \cdot \text{с})$$

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e} \Rightarrow \hbar = 5.015 \cdot 10^{-16} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \approx (0.803 \pm 0.065) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

В пределах погрешности это согласуется с табличным значением $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Оценим красную границу спектра:

$$\omega_k = (1.555 \pm 0.283) \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1} \Rightarrow \lambda_k = \frac{2\pi c}{\omega} = 12120 \pm 2210 \text{ \AA}$$

Найдем работу выхода

$$W = \hbar\omega_k = 0.78 \pm 0.13 \text{ эВ}$$

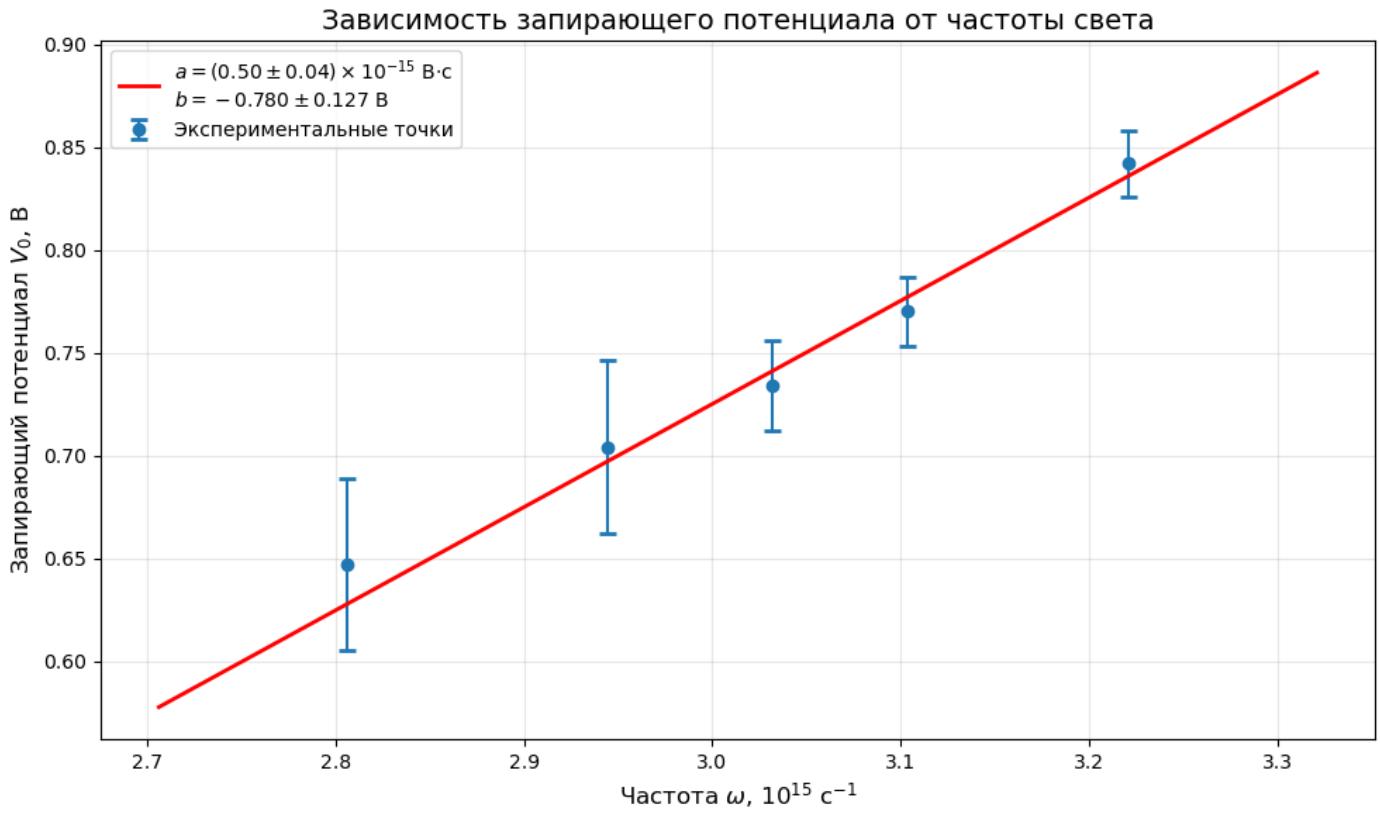


Рис. 5: Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Вывод

Таким образом, в ходе работы были получены следующие результаты:

- Исследовали зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения;
- Вычислили постоянную Планка:

$$\hbar \approx (0.803 \pm 0.065) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Она совпадает по порядку величины с табличным значением, но в пределах погрешности значения расходятся:

$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

- Вычислили красную границу фотоэффекта:

$$\omega_k = (1.555 \pm 0.283) \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

$$\lambda_k = 12120 \pm 2210 \text{ \AA}$$

Это означает, что при длинах волн больше λ_k фотоэффект невозможен.

- Вычислили работу выхода:

$$W = 0.78 \pm 0.13 \text{ эВ}$$