

# Лабораторная работа 5.1.1.

## Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и определение постоянной Планка.

Калинин Даниил, Б01-108

9 октября 2023 г.

**Цель работы :** Исследовать зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения, что позволяет вычислить величину постоянной Планка.

### Теоритическая справка:

Фотоэффект — явление испускания электронов фотокатодом, облучаемым светом, Это явление хорошо объясняется фотонной теорией света. Взаимодействие монохроматического света с веществом можно описывать как взаимодействие с веществом частиц, называемых фотонами, которые обладают энергией  $\hbar\omega$  и импульсом  $\hbar\omega/c$ . При столкновении фотона с электроном фотокатода энергия фотона полностью передается электрону, и фотон прекращает свое существование. Энергетический баланс этого взаимодействия для вылетающих электронов описывается уравнением

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

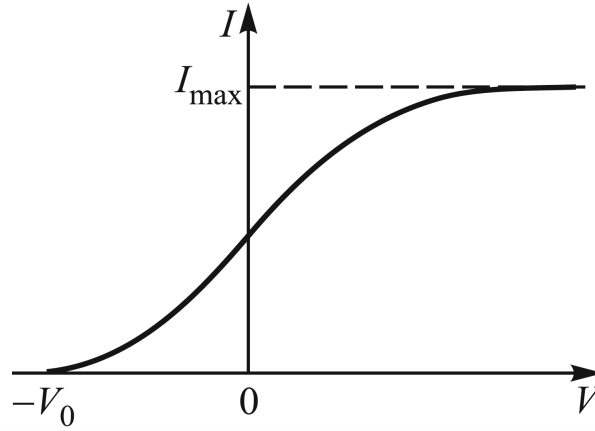


Рис. 1. Зависимость фототока от напряжения на аноде фотоэлемента

Здесь  $E_{max}$  — максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из фотокатода,  $W$  — работа выхода электрона из катода. Реально энергетический спектр вылетевших из фотокатода электронов непрерывен — он простирается от нуля до  $E_{max}$ .

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов вблизи фотокатода обычно располагается второй электрод (анод), на который подается задерживающий ( $V < 0$ ) или ускоряющий ( $V > 0$ ) потенциал. При достаточно больших ускоряющих напряжениях фототок достигает насыщения (рис. 1): все испущенные электроны попадают на анод.

При задерживающих потенциалах на анод попадают лишь электроны, обладающие достаточно большой кинетической энергией, в то время как медленно движущиеся электроны заворачиваются полем и возвращаются на катод. При некотором значении  $V = -V_0$  (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода. Максимальная кинетическая энергия  $E_{max}$  электронов связана с запирающим потенциалом  $V_0$  очевидным соотношением  $E_{max} = eV_0$ . Тогда (1) примет вид, называемый уравнением Эйнштейна:

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

Чтобы определить величину запирающего напряжения, нам надо правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость к нулю, т. е. определить, какова функциональная зависимость  $I(V)$ . Расчет для простейшей геометрии — плоский катод, освещаемый светом, и параллельный ему анод — приводит к зависимости

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

т. е. корень квадратный из фототока линейно зависит от запирающего напряжения. Эта зависимость хорошо описывает экспериментальные данные.

В работе изучается зависимость фототока из фотоэлемента от величины задерживающего потенциала  $V$  для различных частот света  $\omega$ , лежащих в видимой области спектра. С целью экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна определяются потенциалы запираения  $V_0$  при разных частотах света и строится зависимость  $V_0(\omega)$ , которая, как это следует из (2), должна иметь вид

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

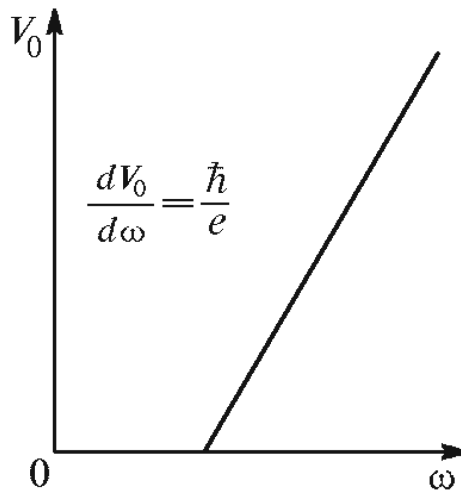


Рис. 2. Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Потенциал запираения  $V_0$  для любого катода линейно зависит от частоты света  $\omega$ . По наклону прямой на графике  $V_0(\omega)$  (рис. 2) можно определить постоянную Планка:

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

Как показывает формула (5), угол наклона прямой  $V_0(\omega)$  не зависит от рода вещества, из которого изготовлен фотокатод. От рода вещества, однако, зависит величина фототока, работа выхода  $W$  и форма кривой  $I(V)$  (рис. 1). Все это определяет выбор пригодных для опыта катодов.

### Экспериментальная установка:

На рис. 3 изображена схема установки. На ней:

- 1 — входная щель.
- 2 — коллиматорный объектив.
- 3 — сложная спектральная призма, склеенная из  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ .
- 4 — объектив зрительной трубы.
- 5 — окуляр зрительной трубы.
- 6 — поворотный столик для 3.
- 7 — микрометрический винт с отсчётным барабаном для 6.
- 8 — микрометрический винт для 2.
- 9 — микрометрический винт для 1.
- 10 — острие указателя.
- 11 — массивный корпус, спасающий установку от студентов.
- Л — источник света.
- К — конденсор (для концентрации света на входной щели).
- Оптическая скамья — нужна для размещения Л и К.
- Пульт управления.

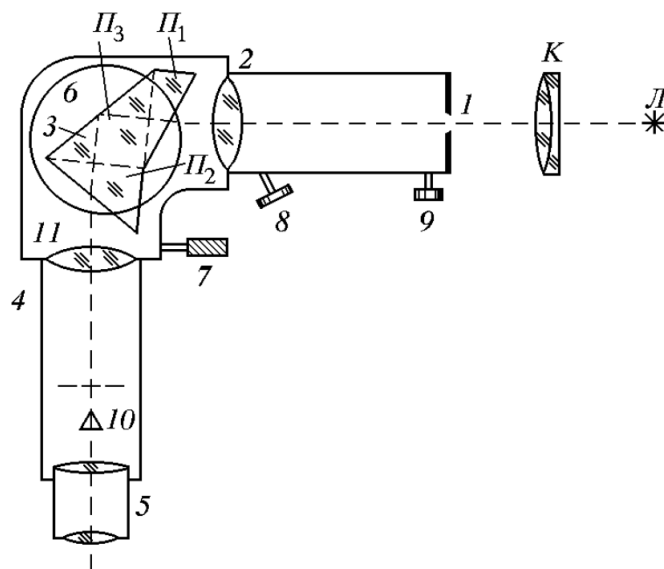


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

### Ход работы:

1. Ознакомимся с принципом работы установки. Включим её и неоновую лампу в сеть, отцентрируем её по высоте. Конденсор расположим в 25 см от щели. Настроимся на резкое изображение кончика указателя, вращая глазную линзу окуляра. Отрегулируем яркость освещения указателя с помощью реостата.
2. Вращая барабан, настроимся на жёлтую линию неона (она одна из самых ярких). Перемещая коллиматор винтом 8, получим резкое изображение.
3. Найдём нуль микрометрического винта. Получаем: 0.13 мм. Установим ширину 0.2 мм.
4. Закончим настройку окуляра. Для этого сделаем резкость такой, чтобы параллакс (т.е. смещение указателя относительно линии при движении глаза) отсутствовал.
5. Теперь проведём градуировку спектрометра по спектрам неона. Для этого запишем расположение их спектральных линий на барабане и соответствующие им табличные значения длин волн. Результаты представлены в таблице 1.
6. Составим градуировочную кривую с помощью линий спектра неона и ртути. Исходя из предположения, что эта кривая задаётся формулой вида:

$$\lambda = ae^{b\varphi} + c$$

Найдём коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  с помощью МНК. Результаты представлены на рис. 4:

$$\begin{aligned} a &= (201 \pm 7) \text{Å} \\ b &= (1.05 \pm 0.01) \cdot 10^{-3} \\ c &= (3960 \pm 20) \text{Å} \end{aligned}$$

7. Теперь проведем 7 серий измерений зависимости фототока от напряжения для разных длин волн падающего света, изменяя на монохроматоре параметр  $\varphi$  и переводя его в длину волны с помощью градуировки. Ток приведен в безразмерных единицах в силу работы установки.

Результаты измерений сведем в таблицы. Для первой выбранной длины волны ( $\varphi = 1880^\circ$ ,  $\lambda = 5402 \text{Å}$ ) проведем измерения во всем спектре возможных напряжений, а для остальных — лишь при достаточно малых значениях тока и напряжения (т.е. вблизи потенциала запираения, где искомая зависимость описывается формулой (3)). Согласно этой формуле, построим графики зависимости в координатах  $\sqrt{I}(V)$  и аппроксимируем линейные участки прямой. Экстраполируя прямую к нулю, получим значения потенциала запираения для каждой серии измерения (длины волны). Результаты сведем в таблицу.

8. Теперь найдём по графикам запирающее напряжение  $V_0$  и построим график  $V_0(\omega)$ .

Из графика получаем, что:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = (6.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-16} \rightarrow \hbar = (0.99 \pm 0.06) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Что в рамках погрешности согласуется с табличным значением  $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ .

9. Найдём красную границу спектра, получаем  $\omega_k = (1.56 \pm 0.12) \cdot 10^{15} \text{ Гц}$

10. Найдём работу выхода как  $W = \hbar \cdot \omega_k = (2.40 \pm 0.18) \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = (1.50 \pm 0.12) \text{ эВ}$

### Заключение:

Таким образом, в ходе выполнения работы мы проверили Эйнштейновское описание фотоэффекта и с помощью уравнения последнего измерили постоянную Планка. Результаты вполне согласуются с табличными.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda, \text{\AA}$	7032	6929	6717	6678	6599	6533	6507	6402	6383
$\varphi, ^\circ$	2600	2568	2498	2486	2458	2434	2422	2384	2376

n	10	11	12	13	14	15	16	17
$\lambda, \text{\AA}$	6334	6305	6267	6217	6164	6143	6096	6074
$\varphi, ^\circ$	2356	2344	2328	2306	2286	2274	2254	2244

n	18	19	20	21	22	23	24	25
$\lambda, \text{\AA}$	6030	5976	5945	5882	5852	5401	5341	5331
$\varphi, ^\circ$	2224	2200	2184	2152	2138	1880	1840	1832

Таблица 1. Спектр неона.



Рис. 4. Калибровочный график

$I$ , ед.	0.282	0.336	0.381	0.415	0.44	0.458	0.475	0.488
$U$ , В	0.005	0.102	0.198	0.3	0.401	0.499	0.598	0.699
$I$ , ед.	0.498	0.507	0.514	0.521	0.528	0.533	0.538	0.544
$U$ , В	0.802	0.905	1	1.101	1.198	1.302	1.399	1.504
$I$ , ед.	0.548	0.552	0.556	0.56	0.563	0.566	0.57	0.578
$U$ , В	1.608	1.705	1.805	1.907	2	2.101	2.247	2.502
$I$ , ед.	0.585	0.591	0.597	0.602	0.606	0.61	0.618	0.625
$U$ , В	2.751	3	3.249	3.509	3.749	4.003	4.502	4.994
$I$ , ед.	0.631	0.637	0.641	0.644	0.128	0.037	-0.02	-0.036
$U$ , В	5.5	6.006	6.511	6.775	-0.203	-0.405	-0.6	-0.808
$I$ , ед.	-0.04	-0.04	-0.04	0.224	0.104	0.013	-0.023	
$U$ , В	-0.994	-1.204	-1.406	-0.1	-0.294	-0.506	-0.695	

Таблица 2.  $\varphi = 1880$ ,  $\lambda = 5402\text{\AA}$

$I$ , ед.	0.328	0.204	0.098	0.049	0.036	0.034
$U$ , В	-0.045	-0.217	-0.408	-0.598	-0.795	-0.998
$I$ , ед.	0.33	0.436	0.476	0.504	0.521	
$U$ , В	-1.199	0.206	0.397	0.615	0.802	

Таблица 3.  $\varphi = 2050\text{\AA}$ ,  $\lambda = 5684\text{\AA}$

$I$ , ед.	0.334	0.431	0.479	0.506	0.526
$U$ , В	0.005	0.204	0.408	0.602	0.793
$I$ , ед.	0.18	0.077	0.038	0.03	0.029
$U$ , В	-0.2	-0.396	-0.594	-0.803	-0.983

Таблица 4.  $\varphi = 2170$ ,  $\lambda = 5915\text{\AA}$

$I$ , ед.	0.272	0.18	0.093	0.045	0.032	0.03
$U$ , В	-0.026	-0.147	-0.292	-0.456	-0.603	-0.808
$I$ , ед.	0.385	0.444	0.481	0.505	0.529	
$U$ , В	0.148	0.3	0.454	0.602	0.802	

Таблица 5.  $\varphi = 2300$ ,  $\lambda = 6200\text{\AA}$



$I$ , ед.	0.23	0.338	0.417	0.459	0.492	0.519
$U$ , В	0.006	0.159	0.31	0.448	0.608	0.791

$I$ , ед.	0.137	0.061	0.036	0.032	0.032
$U$ , В	-0.138	-0.297	-0.451	-0.6	-0.809

Таблица 6.  $\varphi = 2420$ ,  $\lambda = 6500\text{\AA}$

$I$ , ед.	0.174	0.1	0.049	0.037	0.035	0.035
$U$ , В	-0.022	-0.15	-0.294	-0.435	-0.594	-0.797

$I$ , ед.	0.274	0.367	0.429	0.474	0.51
$U$ , В	0.129	0.283	0.43	0.596	0.801

Таблица 7.  $\varphi = 2500$ ,  $\lambda = 6722\text{\AA}$

$I$ , ед.	0.129	0.194	0.293	0.366	0.428	0.479
$U$ , В	0.005	0.121	0.303	0.445	0.602	0.803

$I$ , ед.	0.511	0.068	0.043	0.04	0.04
$U$ , В	0.994	-0.138	-0.284	-0.442	-0.607

Таблица 8.  $\varphi = 2600$ ,  $\lambda = 7027\text{\AA}$

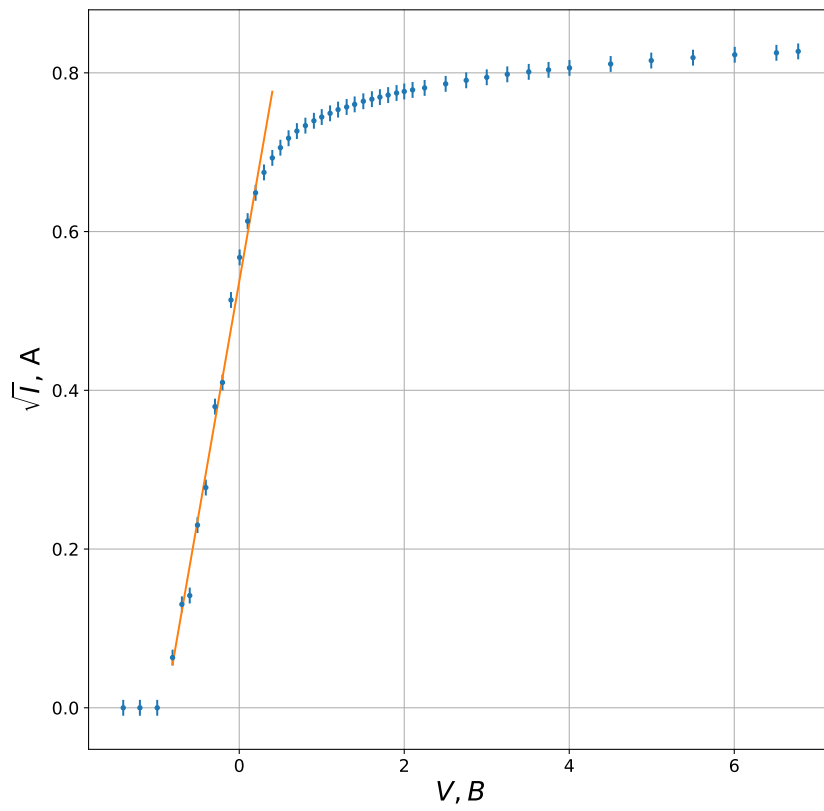


Рис. 5.  $\varphi = 1880$ ,  $\lambda = 5402 \text{ \AA}$

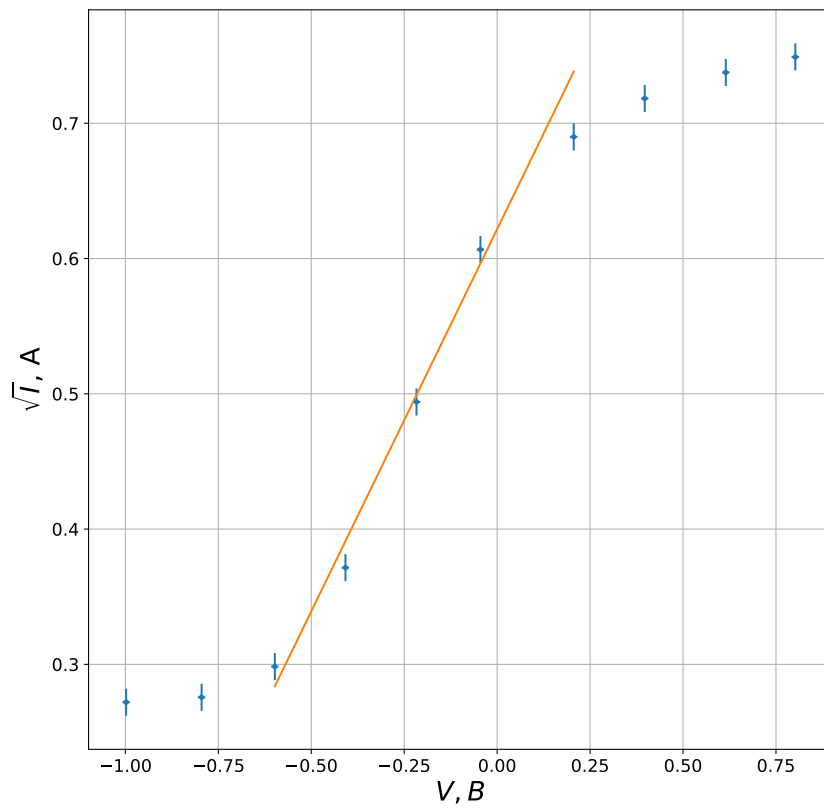


Рис. 6.  $\varphi = 2050\text{\AA}$ ,  $\lambda = 5684\text{\AA}$

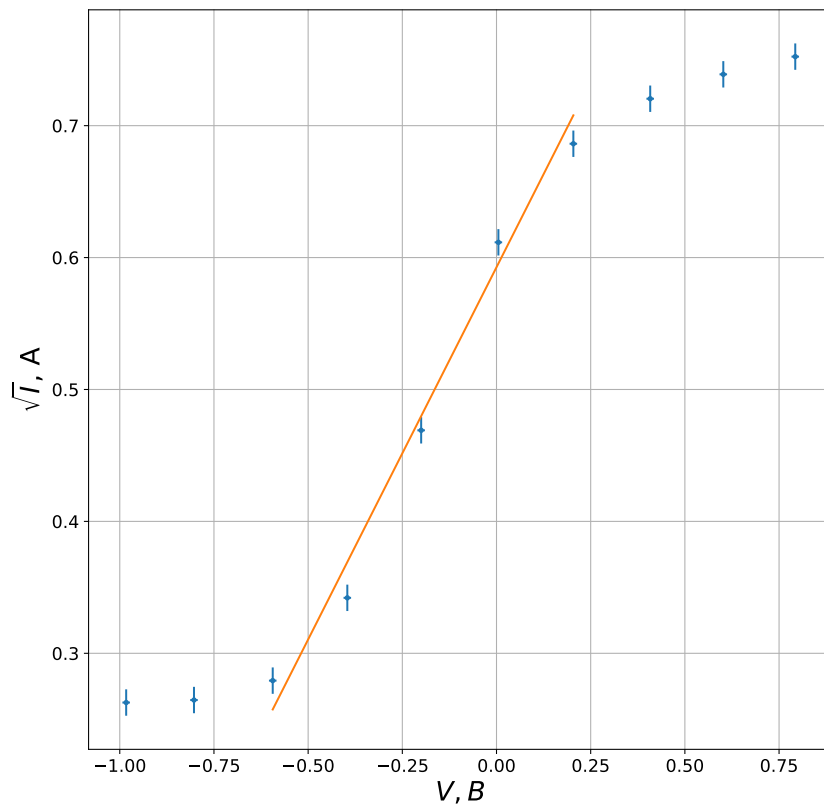


Рис. 7.  $\varphi = 2170$ ,  $\lambda = 5915 \text{ \AA}$

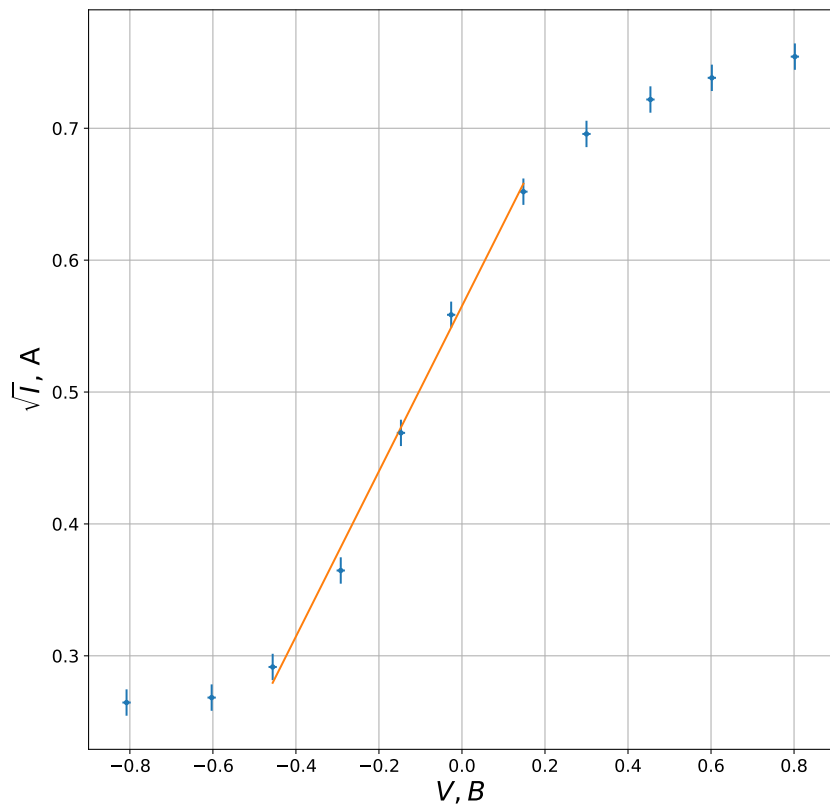


Рис. 8.  $\varphi = 2300$ ,  $\lambda = 6200 \text{ \AA}$

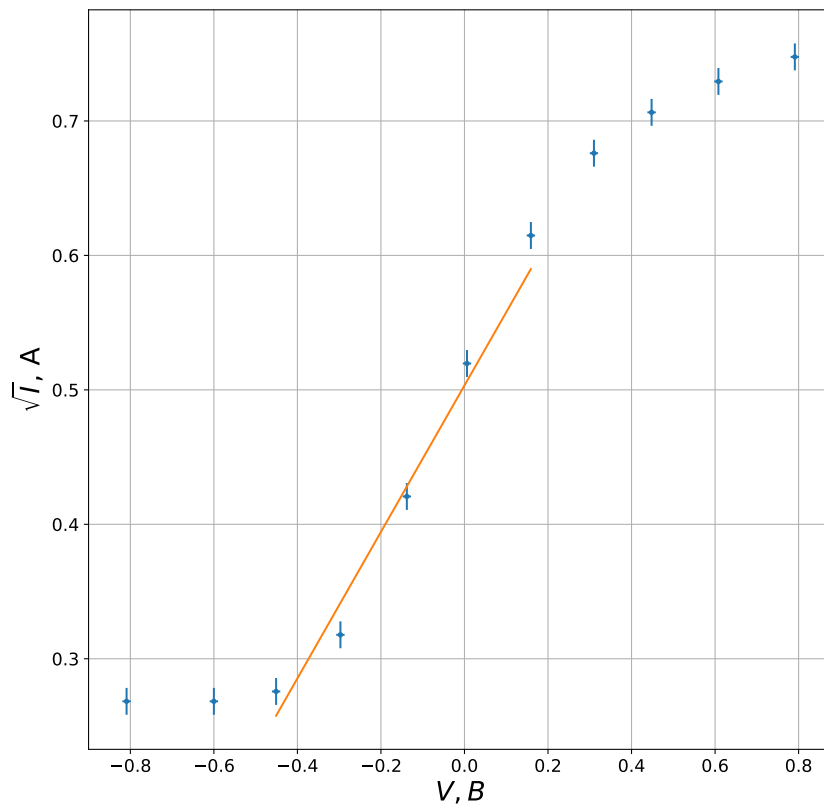


Рис. 9.  $\varphi = 2420$ ,  $\lambda = 6500\text{\AA}$

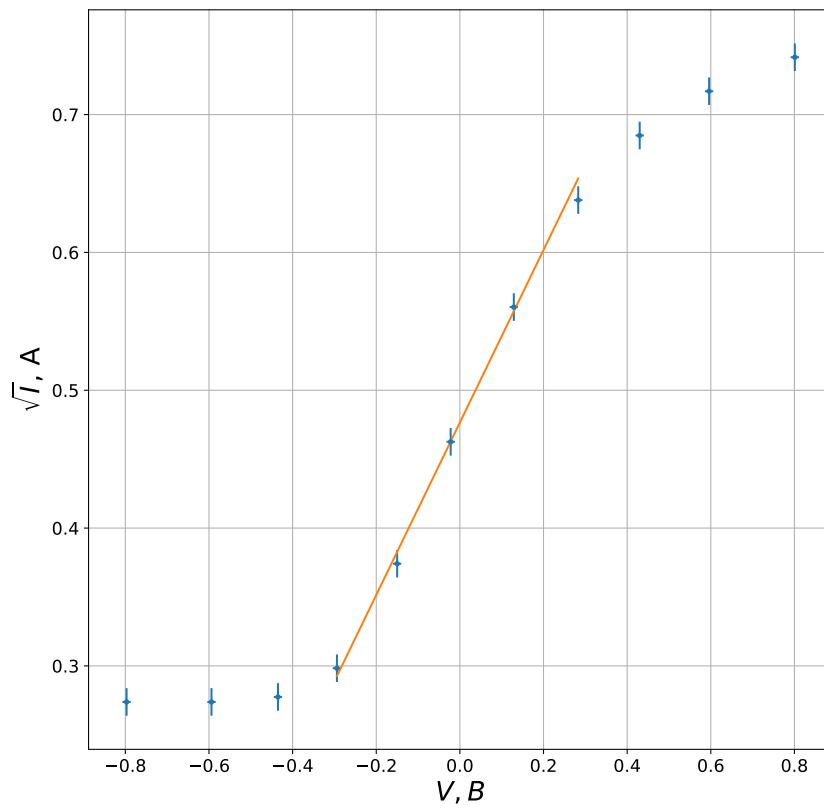


Рис. 10.  $\varphi = 2500$ ,  $\lambda = 6722\text{\AA}$

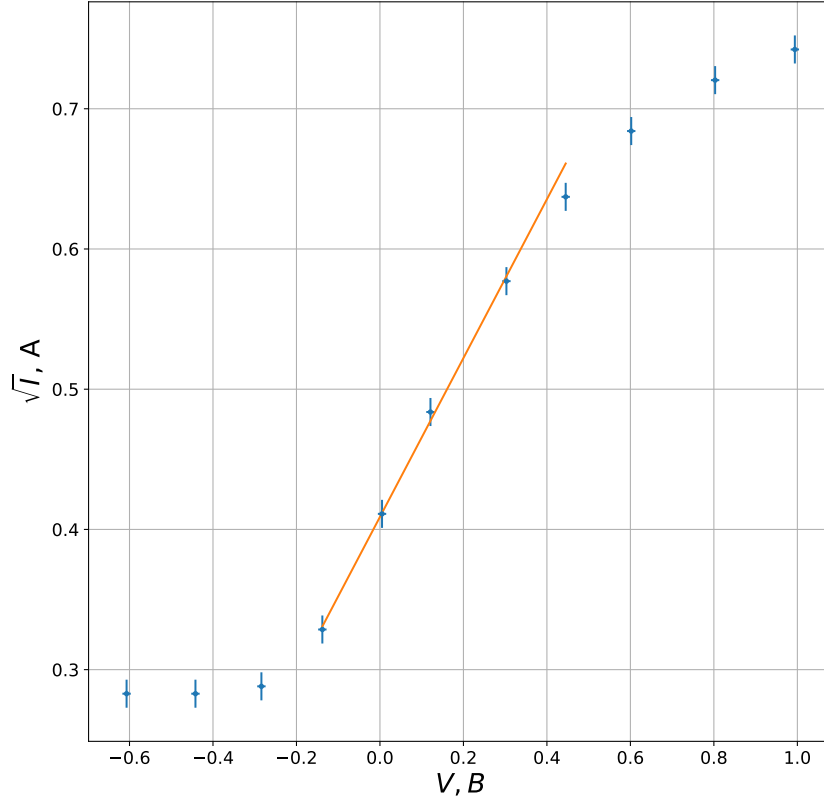


Рис. 11.  $\varphi = 2600$ ,  $\lambda = 7027 \text{ \AA}$

$\varphi, ^\circ$	$\lambda, \text{ \AA}$	$\omega, 10^{15} \frac{1}{\text{c}}$	$k$	$\sigma_k$	$b$	$\sigma_b$	$V_0$	$\sigma_{V_0}$
1880	5402	3.489	0.576	0.018	0.535	0.007	0.93	0.03
2050	5684	3.316	0.565	0.032	0.621	0.006	1.10	0.06
2170	5915	3.187	0.586	0.035	0.583	0.007	0.99	0.06
2300	6200	3.040	0.618	0.023	0.562	0.004	0.91	0.03
2420	6500	2.900	0.654	0.005	0.512	0.001	0.78	0.01
2500	6722	2.804	0.625	0.017	0.476	0.002	0.76	0.02
2600	7027	2.682	0.566	0.011	0.408	0.001	0.72	0.01



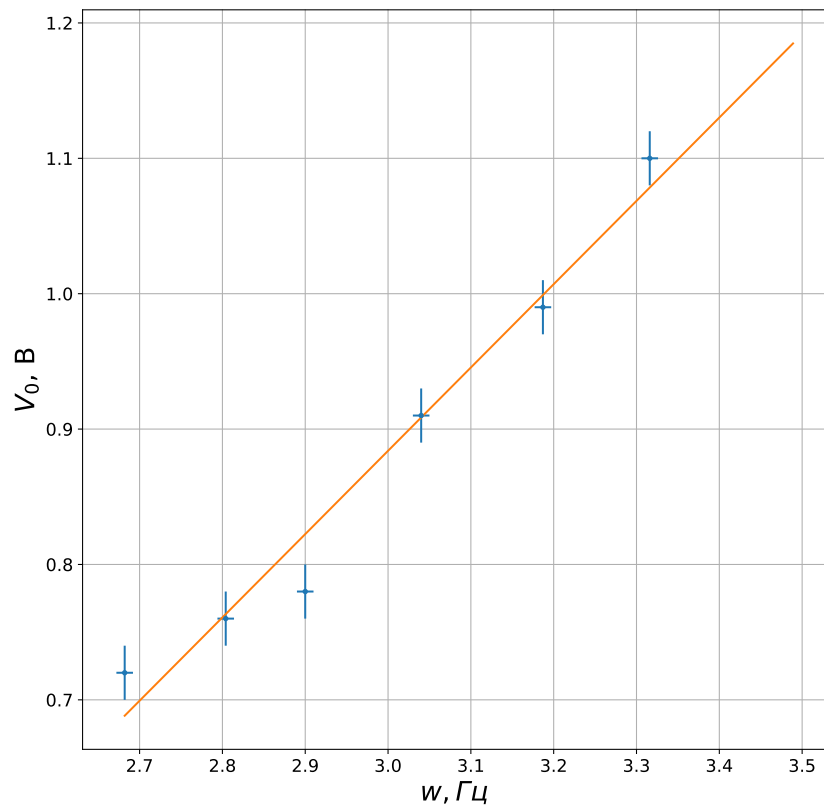


Рис. 12.  $V_0(\omega)$