

Лабораторная работа №5.1.1
Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для
фотоэффекта и определение постоянной Планка

Рожков А. В.

10 ноября 2025 г.

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

В работе используются: источник света, конденсор, монохроматор УМ-2, фотоэлемент с усилителем постоянного тока.

1 Теоретические сведения

Фотоэффект – явление испускания электронов фотокатодом, облучаемым светом. 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

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

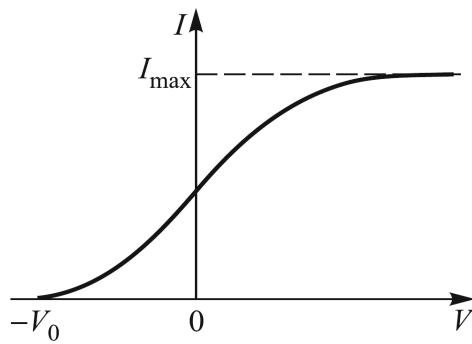


Рис. 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде фотоэлемента

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 запирания) 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 ω , лежащих в видимой области спектра.

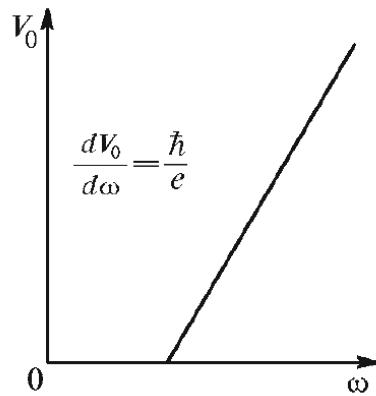


Рис. 2: Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Потенциал запирания V_0 для любого катода линейно зависит от частоты света ω :

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

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.

2 Экспериментальная установка

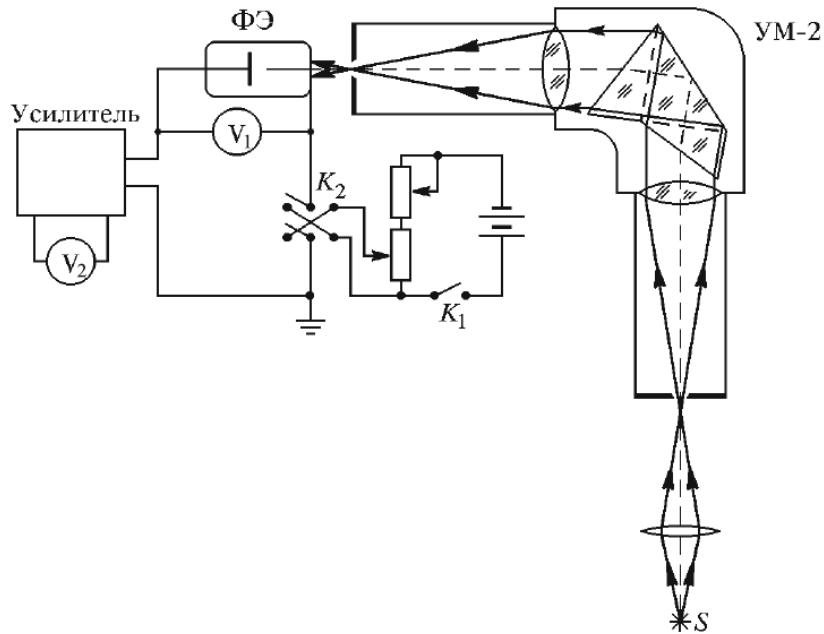


Рис. 3: Принципиальная схема экспериментальной установки

Свет от источника S (обычная электрическая лампа накаливания) с помощью конденсора фокусируется на входную щель призменного монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента $\Phi\mathcal{E}$.

Фотоэлемент конструктивно представляет собой откачанный до высокого вакуума стеклянный баллон диаметром 25 мм и высотой 30 мм. Внутри баллона расположены два электрода: фотокатод и анод. Фотокатод представляет собой тонкую пленку металла, легированного элементами Na , K , Sb и Cs и расположенного на массивной металлической пластине. Анод фотоэлемента выполнен в виде пояса тонкой пленки, осажденной на внутренней части боковой поверхности вверху баллона. Такое расположение фотокатода и анода обеспечивает наиболее полный сбор на аноде электронов, эмитированных фотокатодом. Такой фотоэлемент обладает спектральной чувствительностью в области длин волн от 300 до 850 нм.

Фототок, протекающий в фотоэлементе, мал, особенно при потенциалах V , близких к V_0 , и не может быть измерен непосредственно. Для его измерения используется усилитель постоянного тока. Абсолютные значения фототока нам не нужны, поэтому он измеряется в относительных единицах цифровым вольтметром V_2 , подключенным к выходу усилителя. Эти показания пропорциональны величине измеряемого тока. Измерение тормозящего потенциала осуществляется с помощью цифрового вольтметра V_1 .

Контактная разность потенциалов между катодом и анодом мешает точному определению величины V_0 , но не оказывает влияния на определение постоянной Планка, которая выражается через производную $dV_0/d\omega$.

Призма постоянного отклонения (призма Аббе)

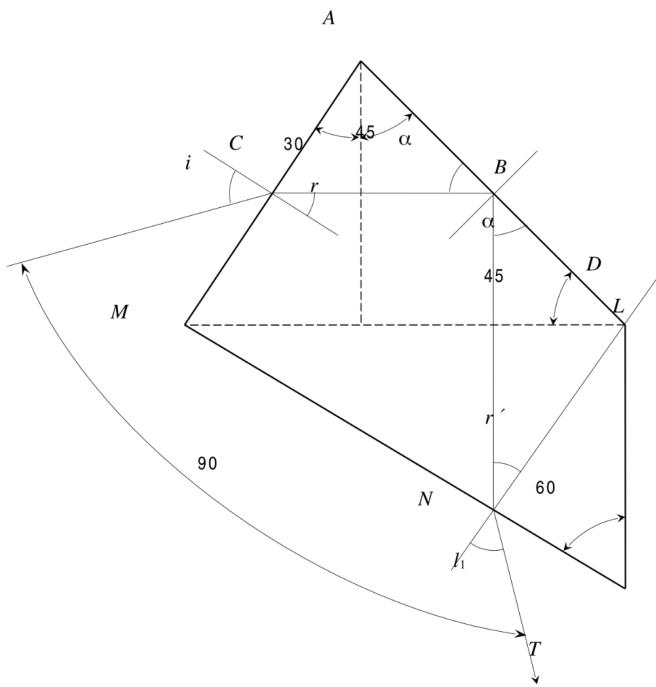


Рис. 4: Ход лучей в призме Аббе

В монохроматоре использована призма Аббе. Её можно разделить на 3 призмы: 2 прямоугольные полупризмы с преломляющим углом 30° , третья призма полного внутреннего отражения, отклоняющая лучи на 90° . Дисперсия происходит лишь на гранях полупризм.

Если на призму падает немонохроматический пучок параллельных лучей, то, врашая призму вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чертежа (этим мы меняем угол падения), всегда можно добиться того, что монохроматический свет любой длины волны будет выходить из призмы под углом 90° к падающему лучу.

3 Ход работы

3.1 Градуировка монохроматора

Проведём градуировку монохроматора по неоновой лампе с известным спектром. Результаты в таблице 1 и на рис. 5. Аппроксимацию проводим полиномом третьей степени:

$$\lambda = 9.56 * 10^{-7} \theta^3 - 5.99 * 10^{-3} \theta^2 + 14.0 \theta - 6.62 * 10^3$$

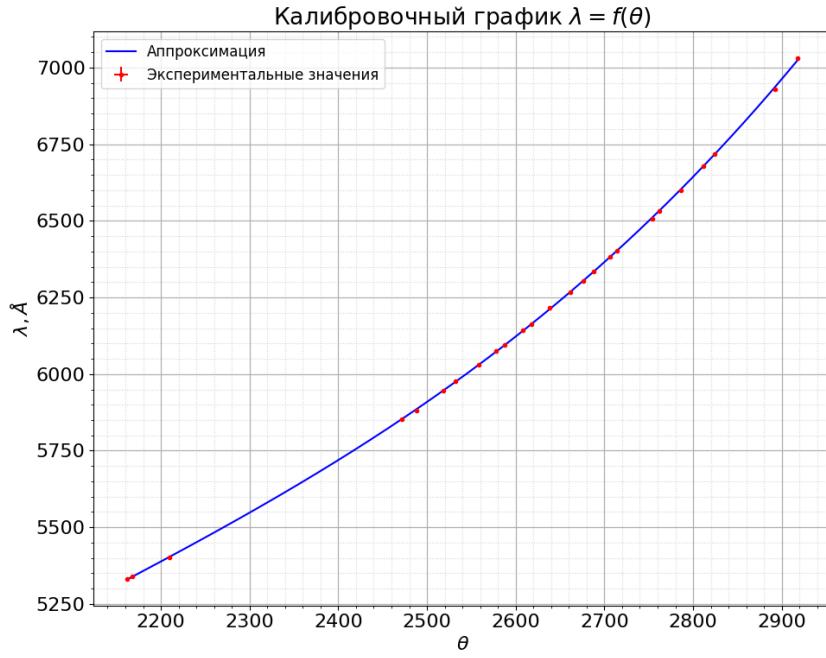


Рис. 5: Градуировочный график монохроматора

θ	$\lambda, \text{\AA}$	θ	$\lambda, \text{\AA}$
2918 ± 2	7032	2618 ± 2	6164
2892 ± 2	6929	2608 ± 2	6143
2824 ± 2	6717	2588 ± 2	6096
2812 ± 2	6678	2578 ± 2	6074
2786 ± 2	6599	2558 ± 2	6030
2762 ± 2	6533	2532 ± 2	5976
2754 ± 2	6507	2518 ± 2	5945
2714 ± 2	6402	2488 ± 2	5882
2706 ± 2	6383	2472 ± 2	5852
2688 ± 2	6334	2210 ± 2	5401
2676 ± 2	6305	2168 ± 2	5341
2662 ± 2	6267	2162 ± 2	5331
2638 ± 2	6217		

Таблица 1: Градуировочная таблица монохроматора

3.2 Исследование зависимости тока фототока от напряжения на аноде

Для определения диапазона дальнейших измерений грубо исследуем зависимость по всей области при $\lambda = 6239 \text{ \AA}$. В работе измерялся не фототок напрямую, а пропорциональное ему напряжение U_i . Результат на рис. 6. Оптимальным для более точных измерений является участок до $U \approx 1 \text{ В}$.

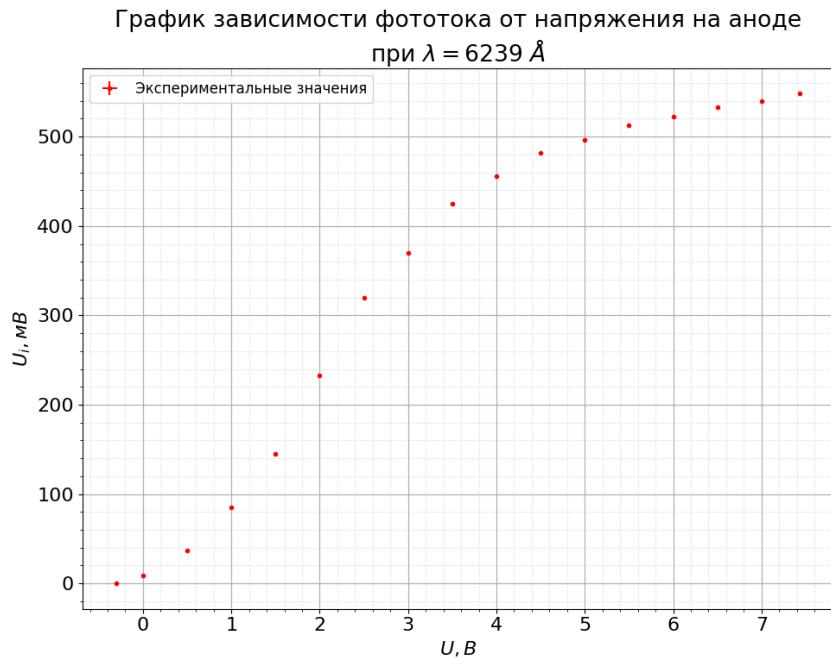


Рис. 6: График зависимости фототока от напряжения на аноде

3.3 Определение потенциала запирания для разных длин волн путём экстраполяции

Построим графики зависимости $\sqrt{U_i} = f(U)$, которые аппроксимируем прямыми и экстраполируем до пересечения с осью абсцисс. Таким образом получим потенциалы запирания. Полные результаты на графиках и в таблицах в приложении. Кратко результаты представлены на рис. 7 и в таблице 2.

Погрешность измерения U равна 0.0001 В , $U_i - 1 \text{ мВ}$.

При аппроксимации методом наименьших квадратов были использованы не все измеренные точки, а только 5-6 наиболее близких к 0, так как далее линейность зависимости сильно нарушается

θ	$\lambda, \text{ \AA}$	$\omega, 10^{15} \text{ рад/с}$	$k, 10^{-3} \text{ В}^{-1/2}$	$b, \text{ В}^{1/2}$	$U_0, \text{ В}$
2210 ± 2	5404 ± 11	3.488 ± 0.007	8.8 ± 1.0	4.9 ± 0.3	0.56 ± 0.07
2310 ± 2	5564 ± 11	3.388 ± 0.006	7.0 ± 0.5	4.64 ± 0.11	0.66 ± 0.05
2410 ± 2	5737 ± 10	3.285 ± 0.006	10 ± 1	4.5 ± 0.3	0.46 ± 0.06
2510 ± 2	5929 ± 10	3.179 ± 0.005	9.9 ± 0.7	4.3 ± 0.2	0.43 ± 0.04
2610 ± 2	6145 ± 10	3.067 ± 0.005	10 ± 1	3.5 ± 0.2	0.36 ± 0.04
2710 ± 2	6391 ± 10	2.949 ± 0.004	10 ± 1	2.6 ± 0.2	0.26 ± 0.04
2810 ± 2	6673 ± 9	2.825 ± 0.004	11 ± 2	1.7 ± 0.3	0.16 ± 0.04
2918 ± 2	7025 ± 9	2.683 ± 0.004	9 ± 2	0.3 ± 0.4	0.03 ± 0.04

Таблица 2: Таблица результатов запирающих потенциалов

При помощи следующей формулы находим U_0 :

$$U_0 = \frac{-b}{k}$$

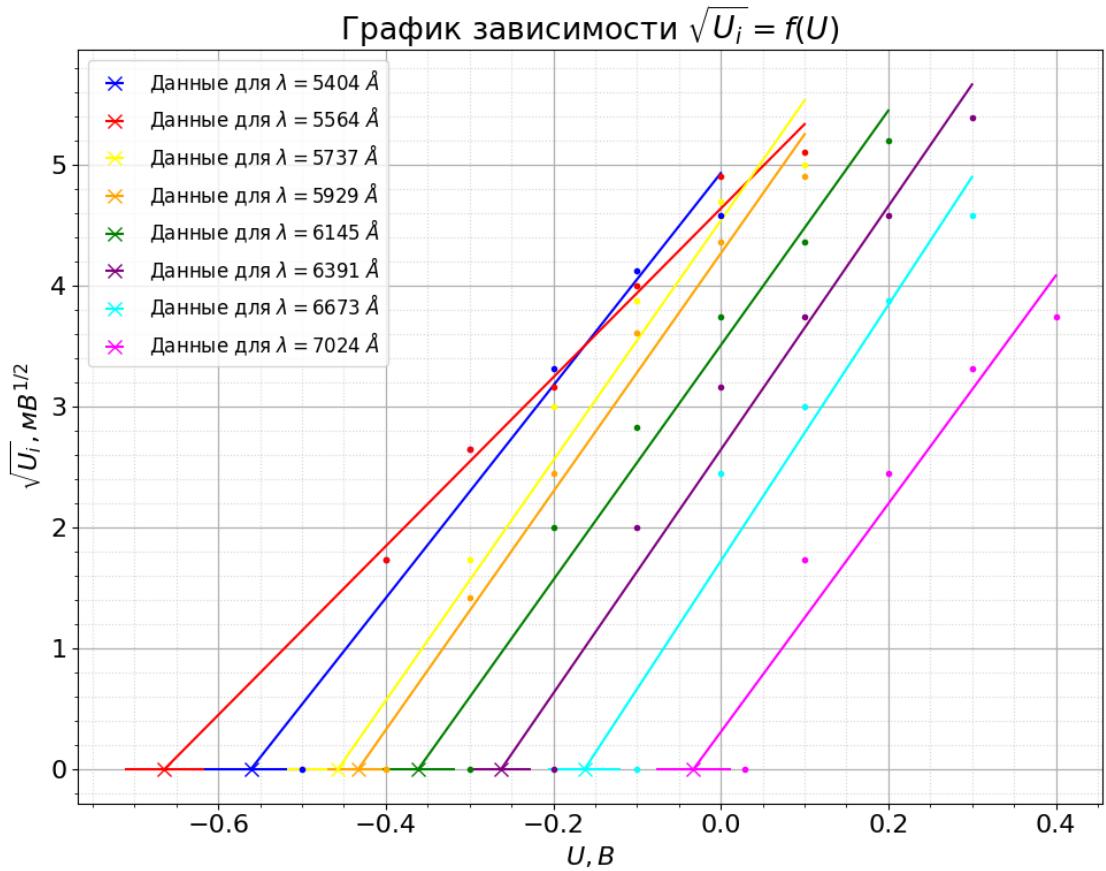


Рис. 7: Графики зависимости корня фототока от анодного напряжения, аппроксимация

3.4 Определение постоянной Дирака по полученным данным

При помощи графика $U_0 = f(\omega)$ на рис. 8 ($y = k * x + b$) можно определить постоянную Дирака. По МНК $k = (7.2 \pm 0.8) * 10^{-16}$ В * с; $b = (-1.9 \pm 0.2)$ В.

$$\hbar = \frac{dU_0}{d\omega} * e = k * e = (7.2 \pm 0.8) * 10^{-16} \text{ эВ * с}$$

Точка пересечения графика с осью абсцисс отражает красную границу фотоэффекта. Из формулы (4) можем определить работу выхода материала. Однако данные величины могут быть найдены только с точностью до контактной разницы потенциалов.

$$W = -b * e = (1.9 \pm 0.2) \text{ эВ}$$

$$\omega_{kp} = \frac{-b}{k} = (2.6 \pm 0.4) * 10^{15} \text{ рад/с}$$

4 Вывод

Экспериментально получили постоянную Дирака $\hbar = (7.2 \pm 0.8) * 10^{-16}$ эВ * с. Результат совпал с табличным ($6.582 * 10^{-16}$ эВ * с) с точностью до погрешности.

Полученное значение красной границы $\omega_{kp} = (2.6 \pm 0.8) * 10^{15}$ рад/с почти совпало с табличным для $Na_2K Sb(Cs)$ ($2.09 * 10^{15}$ рад/с). Различие объясняется тем, что данная величина была получена с точностью до контактной разницы потенциалов.

Получили значение работы выхода $W = (1.9 \pm 0.2)$ эВ.

График зависимости $U_0(\omega)$

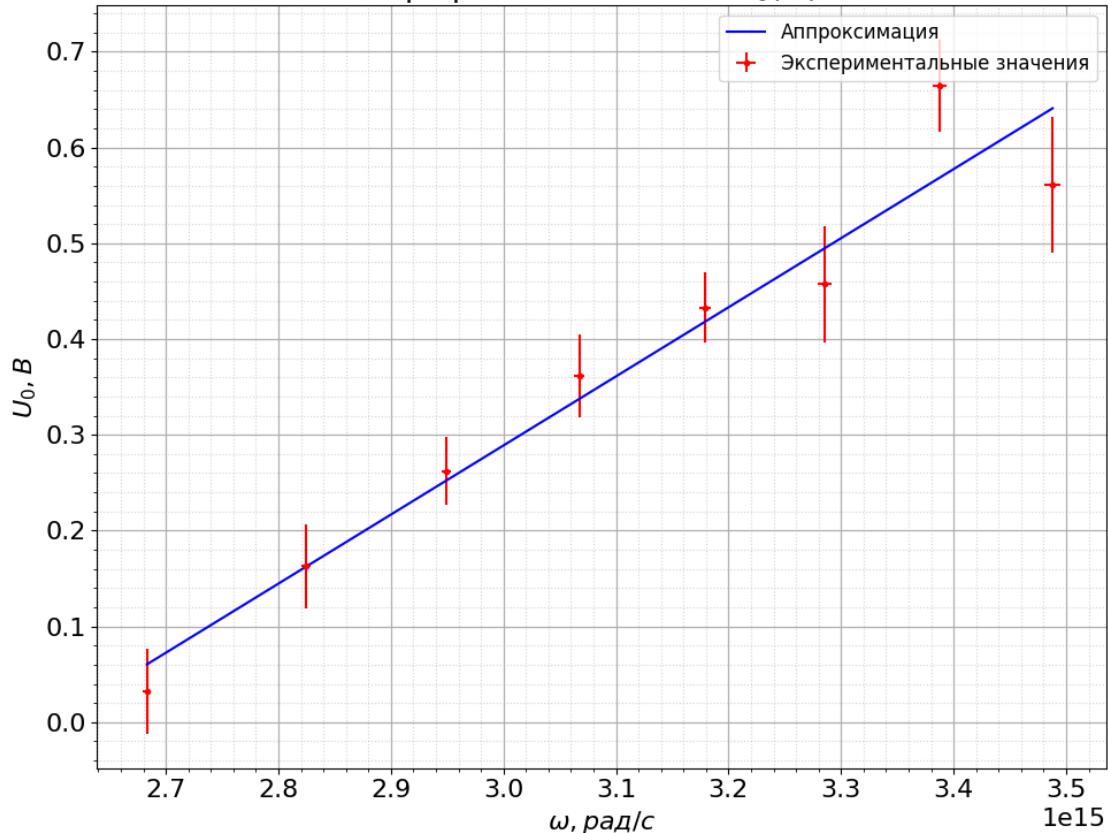
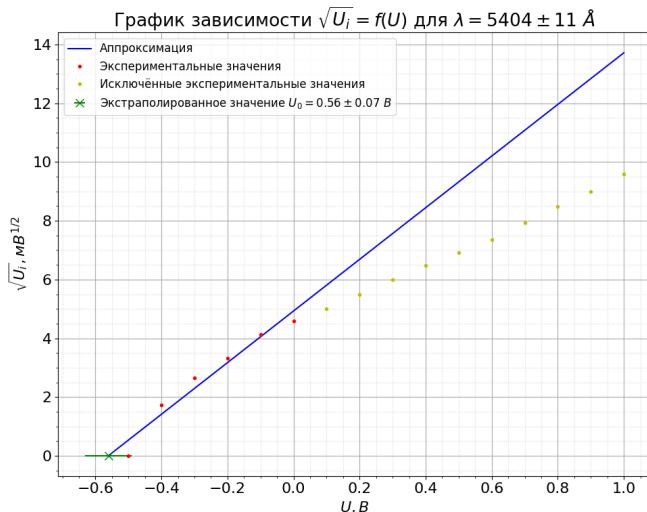
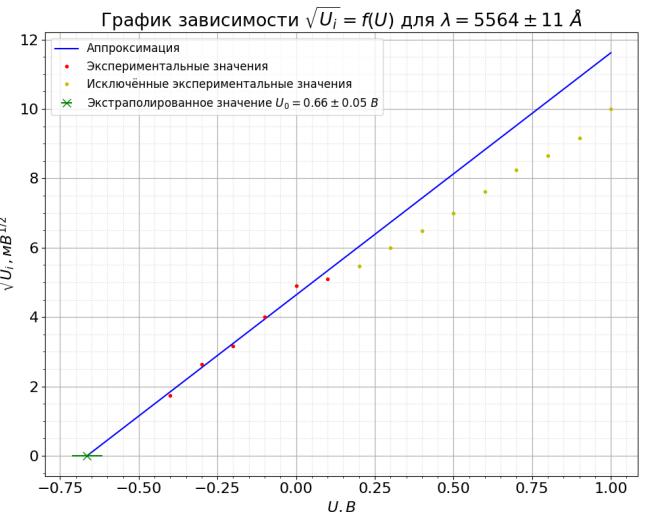


Рис. 8: График зависимости запирающего напряжения от угловой частоты волны падающего света

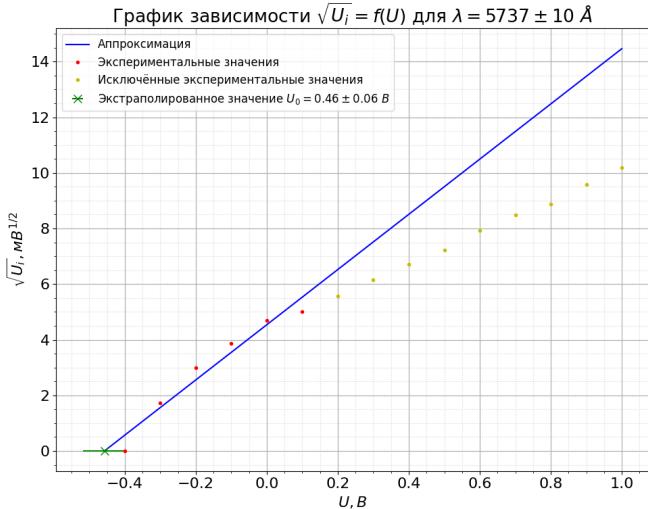
5 Приложение



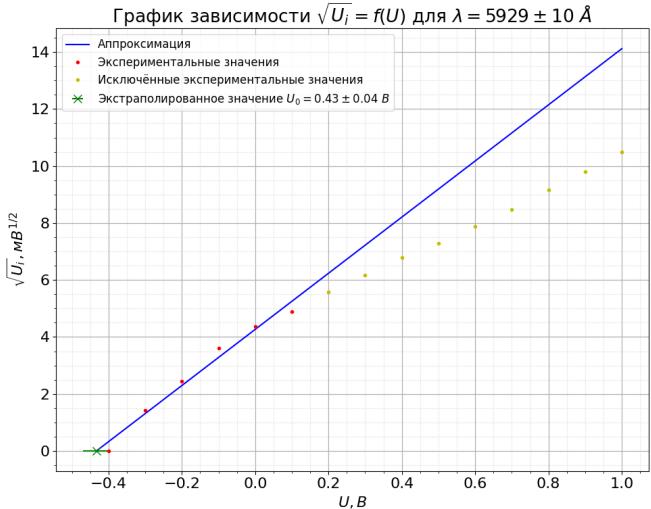
(a)



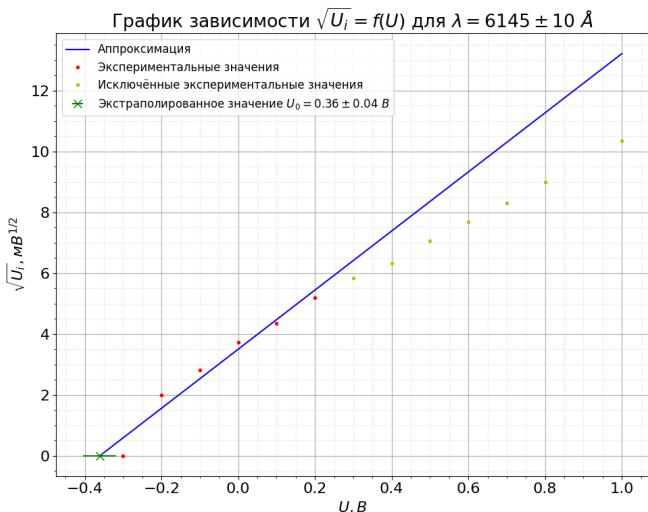
(b)



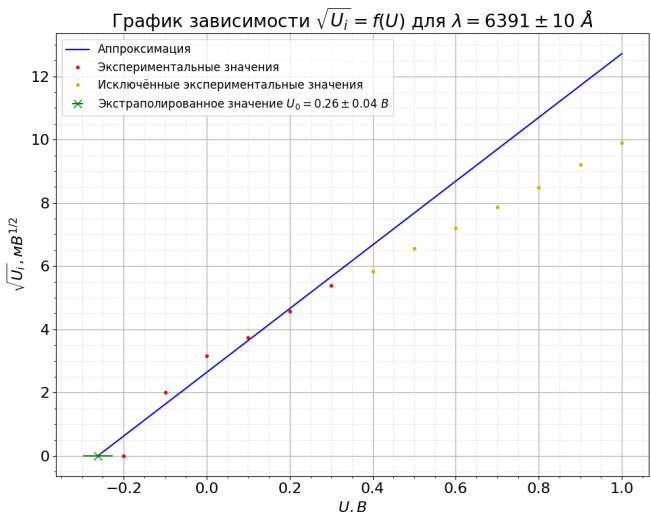
(a)



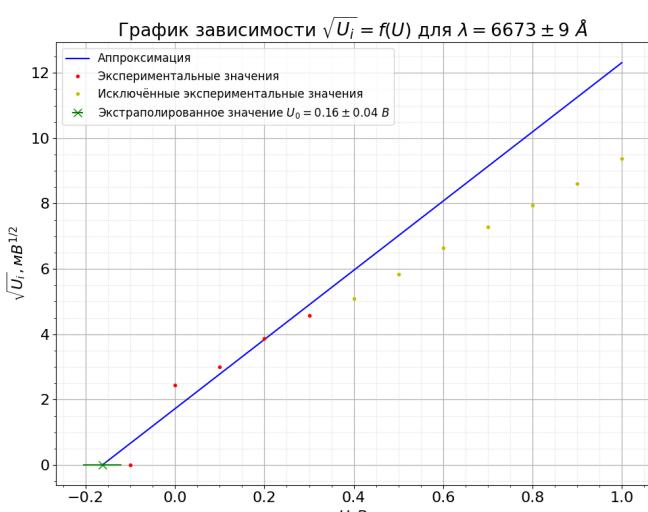
(b)



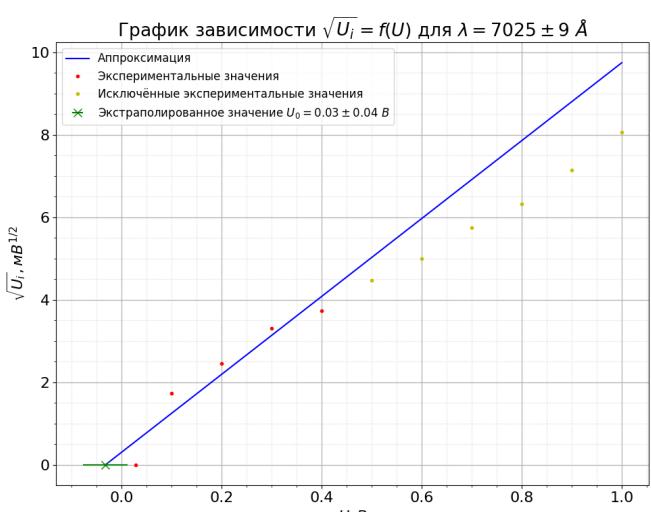
(a)



(b)



(a)



(b)

U, B	U_i, mB	$\sqrt{U_i}, \text{MB}^{1/2}$
1.0000	92	9.59 ± 0.05
0.9000	81	9.00 ± 0.06
0.8000	72	8.49 ± 0.06
0.7000	63	7.94 ± 0.06
0.6000	54	7.35 ± 0.07
0.5000	48	6.93 ± 0.07
0.4000	42	6.48 ± 0.08

U, B	U_i, mB	$\sqrt{U_i}, \text{MB}^{1/2}$
1.0000	100	10.00 ± 0.05
0.9000	84	9.17 ± 0.05
0.8000	75	8.66 ± 0.06
0.7000	68	8.25 ± 0.06
0.6000	58	7.62 ± 0.07
0.5000	49	7.00 ± 0.07

U, B	U_i, mB	$\sqrt{U_i}, \text{MB}^{1/2}$
1.0000	104	10.20 ± 0.05
0.9000	92	9.59 ± 0.05
0.8000	79	8.89 ± 0.06
0.7000	72	8.49 ± 0.06
0.6000	63	7.94 ± 0.06
0.5000	52	7.21 ± 0.07

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	110	10.49 ± 0.05
0.9000	96	9.80 ± 0.05
0.8000	84	9.17 ± 0.05
0.7000	72	8.49 ± 0.06
0.6000	62	7.87 ± 0.06
0.5000	53	7.28 ± 0.07
0.4000	46	6.78 ± 0.07
0.3000	38	6.16 ± 0.08
0.2000	31	5.57 ± 0.09
0.1000	24	4.90 ± 0.10
0.0000	19	4.36 ± 0.11
-0.1000	13	3.6 ± 0.1
-0.2000	6	2.4 ± 0.2
-0.3000	2	1.4 ± 0.4
-0.4000	0	0.0 ± 1.0

Таблица 6: Результаты измерений для $\lambda = 5929 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	107	10.34 ± 0.05
0.8000	81	9.00 ± 0.06
0.7000	69	8.31 ± 0.06
0.6000	59	7.68 ± 0.07
0.5000	50	7.07 ± 0.07
0.4000	40	6.32 ± 0.08
0.3000	34	5.83 ± 0.09
0.2000	27	5.20 ± 0.10
0.1000	19	4.36 ± 0.11
0.0000	14	3.7 ± 0.1
-0.1000	8	2.8 ± 0.2
-0.2000	4	2.0 ± 0.2
-0.3000	0	0.0 ± 1.0

Таблица 7: Результаты измерений для $\lambda = 6145 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	98	9.90 ± 0.05
0.9000	85	9.22 ± 0.05
0.8000	72	8.49 ± 0.06
0.7000	62	7.87 ± 0.06
0.6000	52	7.21 ± 0.07
0.5000	43	6.56 ± 0.08
0.4000	34	5.83 ± 0.09
0.3000	29	5.39 ± 0.09
0.2000	21	4.58 ± 0.11
0.1000	14	3.7 ± 0.1
0.0000	10	3.2 ± 0.2
-0.1000	4	2.0 ± 0.2
-0.2000	0	0.0 ± 1.0

Таблица 8: Результаты измерений для $\lambda = 6391 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	88	9.38 ± 0.05
0.9000	74	8.60 ± 0.06
0.8000	63	7.94 ± 0.06
0.7000	53	7.28 ± 0.07
0.6000	44	6.63 ± 0.08
0.5000	34	5.83 ± 0.09
0.4000	26	5.099 ± 0.098
0.3000	21	4.58 ± 0.11
0.2000	15	3.87 ± 0.13
0.1000	9	3.0 ± 0.2
0.0000	6	2.4 ± 0.2
-0.1000	0	0.0 ± 1.0

Таблица 9: Результаты измерений для $\lambda = 6673 \pm 9 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	65	8.06 ± 0.06
0.9000	51	7.14 ± 0.07
0.8000	40	6.32 ± 0.08
0.7000	33	5.74 ± 0.09
0.6000	25	5.00 ± 0.10
0.5000	20	4.47 ± 0.11
0.4000	14	3.7 ± 0.1
0.3000	11	3.3 ± 0.2
0.2000	6	2.4 ± 0.2
0.1000	3	1.7 ± 0.3
0.0280	0	0.0 ± 1.0

Таблица 10: Результаты измерений для $\lambda = 7025 \pm 9 \text{ \AA}$