

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра Физики



О Т Ч Е Т
по лабораторной работе
№12 по дисциплине
«Физика»

Тема: Исследование внешнего фотоэффекта

Выполнение ИДЗ	Вопросы к лабораторной работе	Подготовка к лабораторной работе	Отчет по лабораторной работе	Колло к-виум	Итоговая оценка
	6,13.				

Студент гр.9584 _____ Балташев А.

Преподаватель _____ Кузьмина Н.Н.

Санкт-Петербург

2020

Цель: исследование закономерностей Зереректа фотоэлектронной эмиссии (внешний фотоэффект), измерение работы выхода электрона и крайней границы Зереректа для металлов фотокаатода.

Схема установки:

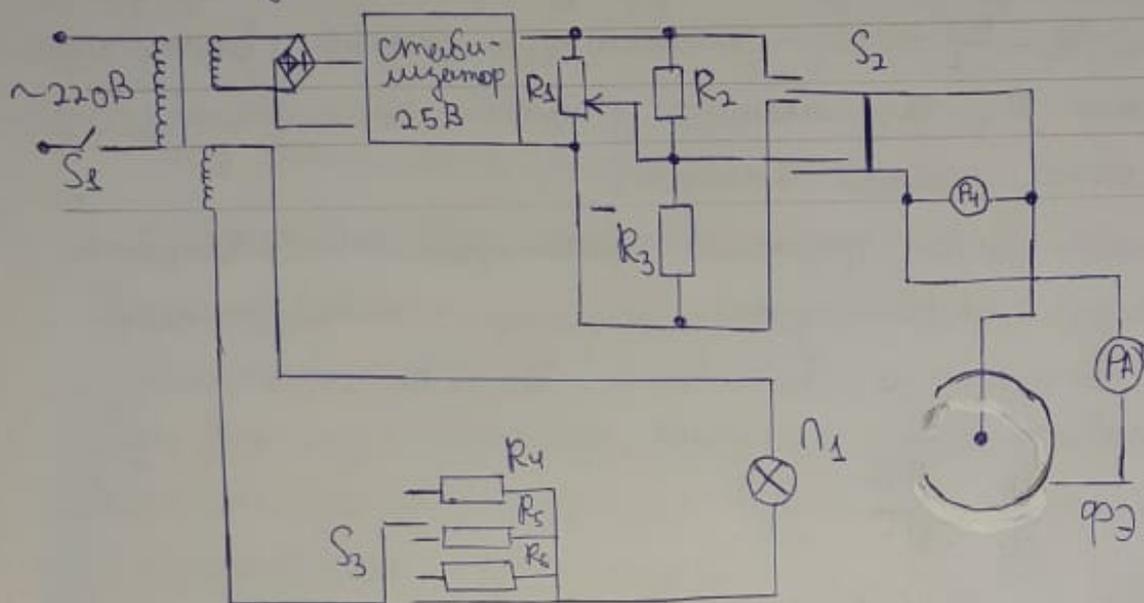


Рис. 1 Электрическая схема установки для исследования внешнего фотоэффекта

S_1, S_2, S_3 - переключатели

L_1 - лампа накаливания

ФЭ - фотоэлемент

R_1, R_2, R_3 - потенциометры

РА - микроамперметр

В - вольтметр

Основные теоретические положения:

Внешний фотоэффект - поток электронов, который возникает при облучении светом поверхности металла и направлен (при наличии внешнего напряжения между катодом и анодом установки) вдоль нормали к поверхности. Измерение силы тока протекающего в этом промежутке при разной интенсивности фотокаатода, при разных спектральных составе излучения и т.д., составляет основу метода экспериментального исследования внешнего фотоэффекта. Теоретическое соотношение (помощение)

фотоны с электроном проводимости металла приводят к его выходу за пределы вещества.

ЗСЭ: $\varepsilon = A + W_k$, (2) уравнение Эйнштейна для фотоэффекта
где $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ - энергия падающего фотона, $A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$ - работа выхода электрона из металла, $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$ - красная граница фотоэффекта, $W_k = \frac{mv^2}{2} = eU_3$ - кинетическая энергия вылетевшего электрона, U_3 - задерживающая разность потенциалов (напряжение между катодом и анодом).

Квантовый выход η - число эмитированных электронов в расчете на один фотон, падающий на поверхность тела. Определяется свойствами вещества, состоянием его поверхности и энергией фотонов

$$\frac{dN_e}{dt} = \eta \frac{dN}{dt} \quad (2)$$

Исследованные закономерности:

Задерживающее напряжение U_3 в опыте измеряется граничной катодом и с точностью до постоянного множителя e совпадает с кинетической энергией фотоэлектрона, если она измеряется в электрон-вольтах.

$$eU_3 = \frac{mv^2}{2} \quad (3)$$

Теория Эйнштейна промагиструет линейную зависимость задерживающего напряжения от частоты ЭМ излучения:

$$U_3 = \frac{h}{e} (\nu - \nu_0) = a(\nu - \nu_0), \quad (4)$$

где $\nu_0 = \frac{A}{h}$ - минимальная частота излучения, при которой возможен выход электрона из металла.

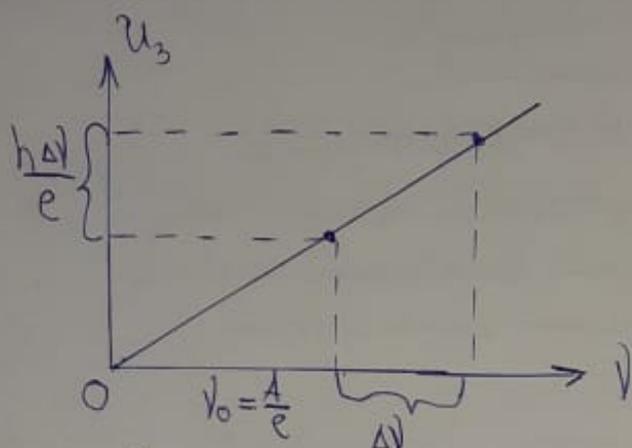


Рис. 2. Зависимость запирающего напряжения

на фотокатодом от частоты ЭМ излучения

Поток зависит от освещенности E катода установки

$$E = \frac{h\nu}{S} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (5)$$

При некотором значении U между катодом и анодом величина фототока перестает зависеть от напряжения и представляет так называемый I_k , который пропорционален потоку Φ излучения:

$$I_k = \frac{dq}{dt} = e \frac{dN_e}{dt} = e\eta \frac{dN}{dt} = e\eta \frac{dW}{h\nu dt} = \frac{e\eta}{h\nu} \Phi = k_0 \Phi, \quad (6) \quad \text{Закон Столетова}$$

$$\text{где } k = \frac{e\eta S}{h\nu} = \frac{e\eta S_x}{h\nu}$$

где $k_0 = \frac{e\eta}{h\nu} = \frac{e\eta \lambda}{hc}$, $\Phi = \frac{dW}{dt}$ - поток излучения истонника, падающий на фотокатод.

$$I_k = k E \quad (7) \quad \text{Закон Столетова}$$

6. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта

I. Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов вырывающихся из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

II. Максимальная кинетическая скорость (кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν , а именно линейно возрастает с увеличением частоты.

III. Для каждого вещества существуют "красная граница" фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 света, при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

13. Что такое чувствительность поверхности к свету?
в каких единицах она измеряется?

Световой поток Φ - количество светового излучения, видимого глазом человека; световая энергия, излучаемая поверхностью (свещающейся или отражающей лучи), [лм] - люмен

$$\Phi = \frac{E}{t}$$

Освещенность E : [лк] - люкс

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Протокол №12
 №12

Багматов Азамат 9584
 Кузнецов И.И.

Таблица 1. Вольт-амперная характеристика фотокатода

U, В	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I(φ_2), мкА	0,136	0,186	0,215	0,237	0,258	0,270	0,275	0,275	0,282	0,273	0,278
I(φ_3), мкА	0,100	0,145	0,169	0,185	0,192	0,201	0,201	0,202	0,207	0,207	0,207
I(φ_4), мкА	0,086	0,126	0,149	0,161	0,17	0,175	0,177	0,179	0,183	0,182	0,184

$\lambda = 515 \text{ нм}$

12	13	14	15	16	18	20	24
0,280	0,284	0,289	0,284	0,287	0,284	0,290	0,292
0,211	0,213	0,212	0,207	0,211	0,209	0,217	0,213
0,185	0,184	0,186	0,185	0,185	0,184	0,190	0,187

Таблица 2. Определение задержки напряжения при освещенности фотокатода E_2

Светофильтр	U, В				
	1	2	3	4	5
Синий $\lambda_1 = 515 \text{ нм}$	0,556	0,550	0,544	0,528	0,575
Зеленый $\lambda_2 = 550 \text{ нм}$	0,410	0,370	0,376	0,320	0,365

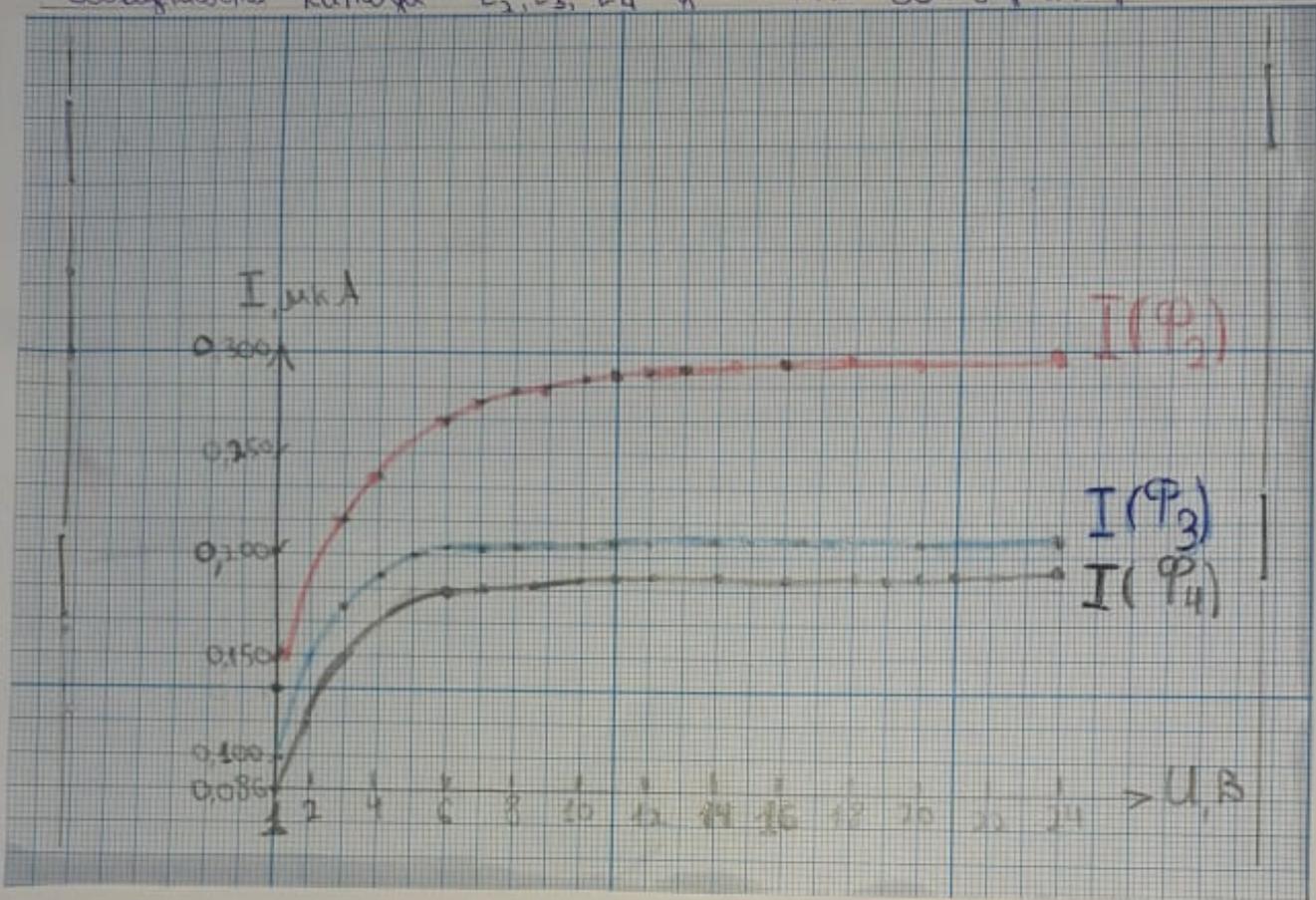
$V_1 = 5,83 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ $\alpha_1 = 5,4 \cdot 10^3$

$V_2 = 5,43 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ $\alpha_2 = 5,0 \cdot 10^3$

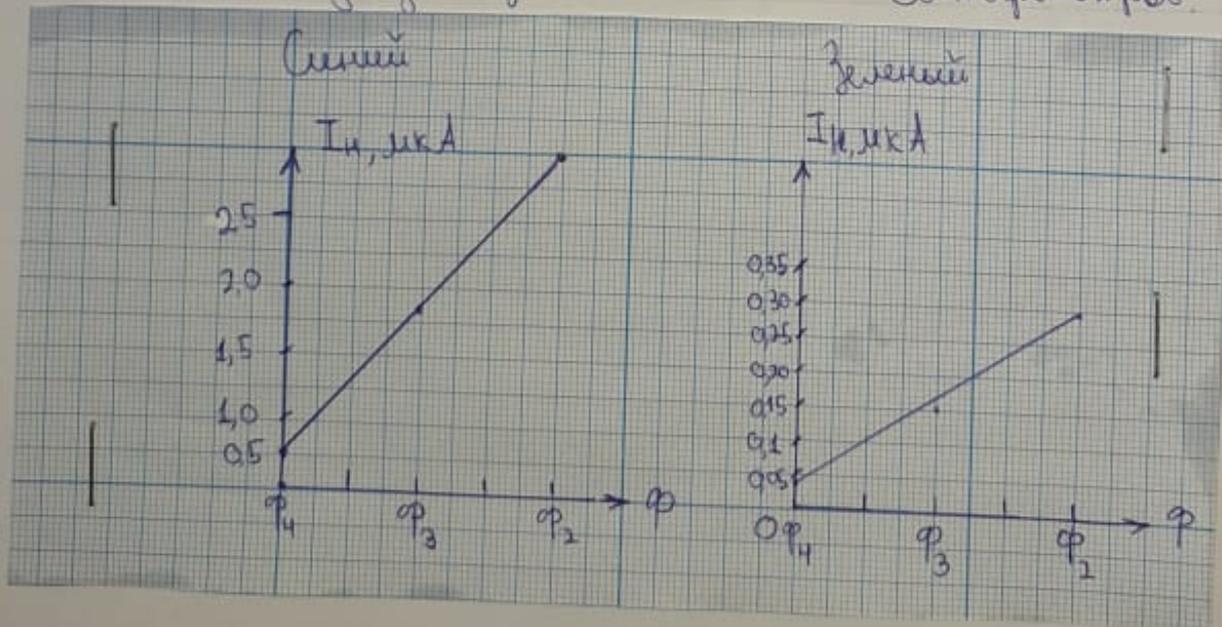
Светофильтр	Синий			Зеленый		
	2	3	4	2	3	4
$E_i, \text{ Вт/м}^2$	1,6	0,9	0,4	0,15	0,07	0,02
$I_H, \text{ мкА}$	3,02	1,64	0,72	0,31	0,14	0,04
$K = \frac{I_H}{E_i}, \frac{\text{мкА} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$	1,9	1,87	1,8	2,07	2,0	2,0

Обработка результатов.

1. Построим график зависимости фототока от напряжения для трех значений освещенности катода E_2, E_3, E_4 для синего светофильтра.



2. График зависимости $I_H = I_H(E)$ тока насыщения от освещенности E катода для зеленого и синего светофильтров.



$$k_c = \bar{k}_c \pm \Delta \bar{k}_c = (1,86 \pm 0,12) \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$\bar{k}_c = \frac{\sum_{i=1}^N k_{ci}}{N} = 1,856 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$S_{\bar{k}_c} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta k_{ci})^2}{N-1}} = 0,95 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$\Delta \bar{k}_c = t_{pN} \cdot S_{\bar{k}_c} = 0,12 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$k_3 = \bar{k}_3 \pm \Delta \bar{k}_3 = (2,02 \pm 0,09) \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$\bar{k}_3 = 2,02 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$S_{\bar{k}_3} = 0,04 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$S_{\bar{k}_3} = 0,02 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

$$\Delta \bar{k}_3 = 0,086 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}}$$

3. Определение экспериментального квантового выхода электронов η :

$$\text{Синий: } \eta = \frac{hc \bar{k}_c}{e s \lambda} = a_1 \bar{k}_c = 5,4 \cdot 10^3 \cdot 1,86 \frac{\mu\text{K}\cdot\mu^2}{\text{Bm}} = 10,044 \cdot 10^3$$

$$\text{Зеленый: } \eta = \frac{hc \bar{k}_3}{e s \lambda} = a_2 \bar{k}_3 = 10,1 \cdot 10^3$$

4. Расчет затормозивших напряжений светорезисторов:

Синий:

$$\bar{U}_{3c} = \frac{\sum U_{3ci}}{N} = 0,551 \text{ B}$$

$$S_{U_{3c}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta U_{3ci})^2}{N-1}} = 0,003 \text{ B}$$

$$S_{\bar{U}_{3c}} = \frac{S_{U_{3c}}}{\sqrt{N}} = 0,001 \text{ B}$$

$$\Delta \bar{U}_{3c} = t_{pN} \cdot S_{\bar{U}_{3c}} = 0,003 \text{ B}$$

$$U_{3c} = \bar{U}_{3c} \pm \Delta \bar{U}_{3c} = (0,551 \pm 0,003) \text{ B}$$

U_{3c} и U_{33} для синего и зеленого

Зеленый:

$$\bar{U}_{33} = 0,380 \text{ B}$$

$$S_{U_{33}} = 0,02 \text{ B}$$

$$S_{\bar{U}_{33}} = 0,009 \text{ B}$$

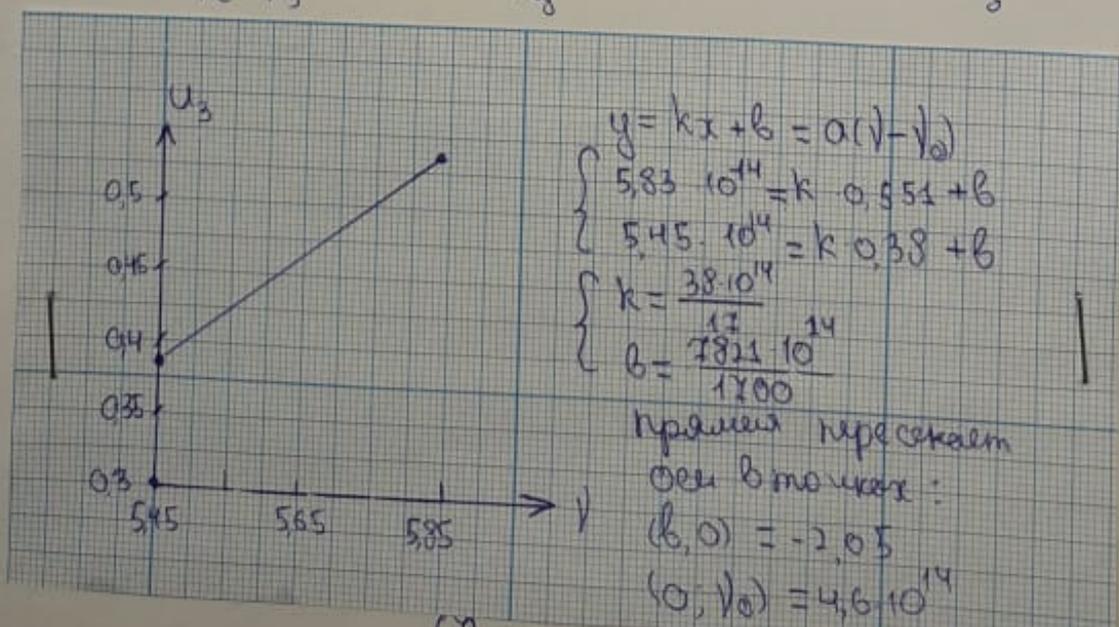
$$\Delta \bar{U}_{33} = 0,025 \text{ B}$$

$$U_{33} = (0,380 \pm 0,025) \text{ B}$$

5. Определение углового коэф-та наклона a .

$$a_3 = \frac{\Delta U_3}{\Delta V} = \frac{\bar{U}_{3c} - U_{33}}{V_c - V_3} = 4,5 \cdot 10^{-15} \frac{\text{B}}{\text{B}_\mu}$$

$$a = \frac{h}{e} = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{B}}{\text{B}_\mu}$$



6. Определение экспериментальной постоянной Планка:

$$h_3 = e a_3 = 7,2 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

7. Определение граничной частоты ν_0 фотоэффекта для материала фотокатода:

$$\nu_0 = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = 6,5 \cdot 10^{-7} = 650 \text{ нм} \quad A = h\nu_0 = 1,91 \text{ эВ}$$

$$\nu_0' = -\frac{e}{e} = 4,61 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \quad \lambda_0' = \frac{c}{\nu_0'} = 650 \text{ нм} \quad A = h\nu_0' = 1,91 \text{ эВ}$$

Выводы: В ходе лабораторной работы было проведено исследование закономерностей внешнего фотоэффекта. Были построены графики зависимости фототока от напряжения для трех значений освещенности катода для линии светофильтра. Были построены графики зависимости тока насыщения от освещенности для зеленого и синего светофильтров. Был определен коэффициент из закона Столетова ($K_2 = 4,86 \pm 0,12 \frac{\mu\text{А}\cdot\text{м}^2}{\text{Вт}}$, $K_3 = 2,02 \frac{\mu\text{А}\cdot\text{м}^2}{\text{Вт}}$). Также был найден экспериментальный квантовый выход электронов ($\eta_c = 10,044 \cdot 10^3$, $\eta_3 = 10,1 \cdot 10^3$). Помимо этого, были рассчитаны запирающие напряжения для синего и зеленого светофильтров ($U_{z3} = 10,551 \pm 0,003 \text{ В}$, $U_{z3} = 10,380 \pm 0,025 \text{ В}$). Было определено экспериментальное значение постоянной Планка ($h_3 = 7,2 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \Rightarrow h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$), оно отличается от теоретического значения ввиду несовершенства установки. Также была найдена работа выхода $A = 1,91 \text{ эВ}$, что соответствует работе выхода цезия).

ОТВЕТЫ НА ЗАЩИТУ:

1. Законы Столетова. Нашли ли эти законы подтверждение в эксперименте?

Ответ:

Законы внешнего фотоэффекта.

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются фотоэлектронами, а образуемый ими ток называется фототоком.

С помощью схемы Столетова была получена следующая зависимость фототока от

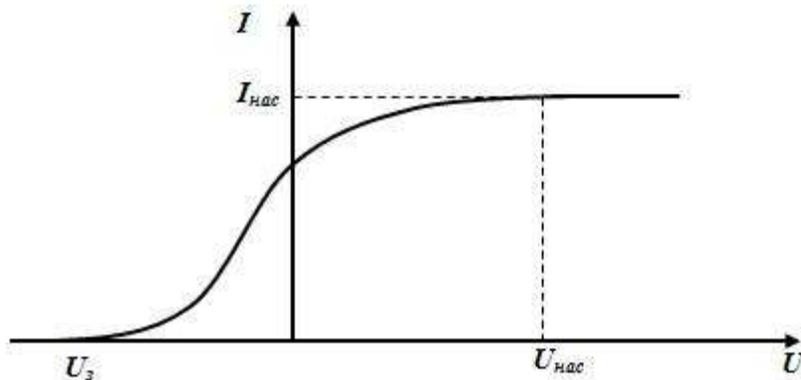


Рис. Зависимость фототока от анодного напряжения в опыте А. Г. Столетова

приложенного напряжения при неизменном световом потоке Φ (то есть была получена ВАХ – вольт- амперная характеристика):

При некотором напряжении U_H фототок достигает насыщения I_H – все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, следовательно, сила тока насыщения I_H определяется количеством электронов, испускаемых катодом в единицу времени под действием света. Число высвобождаемых фотоэлектронов пропорционально числу падающих на поверхность катода квантов света. А количество квантов света определяется световым потоком Φ , падающим на катод. Число фотонов N , падающих за время t на поверхность определяется по формуле:

$$N = \frac{W}{\varepsilon} = \frac{\Phi_s t}{\varepsilon},$$

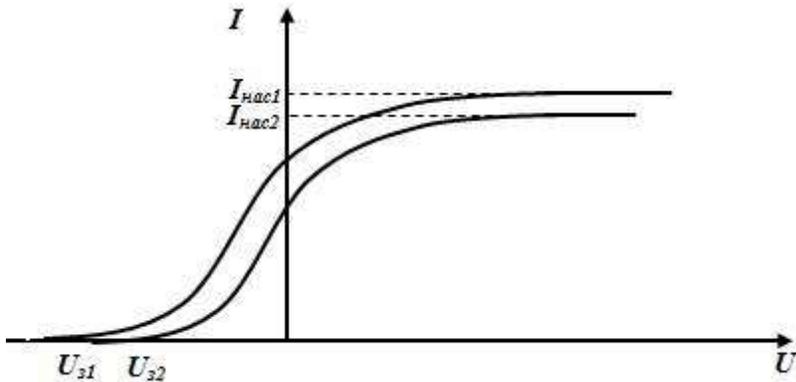
где W – энергия излучения, получаемая поверхностью за время Δt ,

$\mathcal{E} = h\nu$ - энергия фотона,

Φ_e – световой поток (мощность излучения).

1-й закон внешнего фотоэффекта (закон Столетова):

При фиксированной частоте падающего света фототок насыщения пропорционален падающему световому потоку:

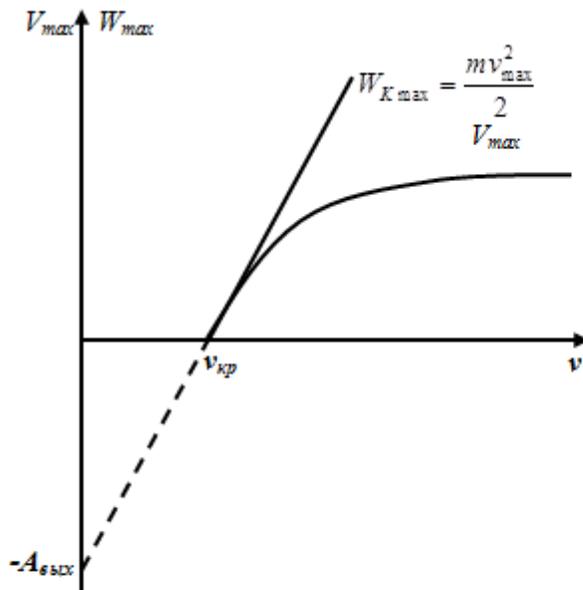


График, подтверждающий закон А. Г. Столетова

U_3 - **задерживающее напряжение** - напряжение, при котором ни одному электрону не удастся долететь до анода. Следовательно, закон сохранения энергии в этом случае можно записать: энергия вылетающих электронов равна задерживающей энергии электрического поля

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3$$

следовательно, можно найти максимальную скорость вылетающих фотоэлектронов V_{max}



Зависимость максимальной скорости и максимальной кинетической энергии от частоты падающего света

$$V_{max}^2 = \frac{2eU_s}{m}$$

2-й закон фотоэффекта: максимальная начальная скорость V_{max} фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света (от Φ), а определяется только его частотой ν

3-й закон фотоэффекта: для каждого вещества существует "**красная граница**" фотоэффекта, то есть минимальная частота $\nu_{кр}$, зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности, при которой ещё возможен внешний фотоэффект.

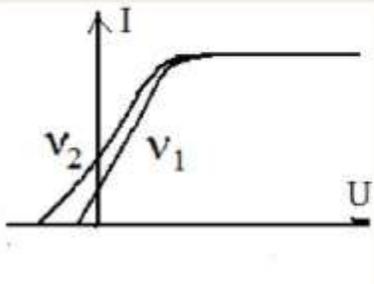
Второй и третий законы фотоэффекта нельзя объяснить с помощью волновой природы света (или классической электромагнитной теории света). Согласно этой теории вырывание электронов проводимости из металла является результатом их "раскачивания" электромагнитным полем световой волны. При увеличении интенсивности света (Φ) должна увеличиваться энергия, передаваемая электроном металла, следовательно, должна увеличиваться V_{max} , а это противоречит 2-му закону фотоэффекта.

Так как по волновой теории энергия, передаваемая электромагнитным полем пропорциональна интенсивности света (Φ), то свет любой; частоты, но достаточно большой интенсивности должен был бы вырывать электроны из

металла, то есть красной границы фотоэффекта не существовало бы, что противоречит 3-му закону фотоэффекта. Внешний фотоэффект является безынерционным. А волновая теория не может объяснить его безынерционность.

Законы Столетова (законы внешнего фотоэффекта)

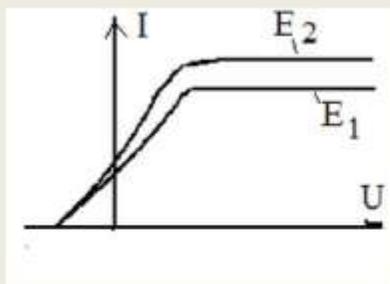
$E = \text{const}, \quad \nu_1 < \nu_2$



$$eU_s = \frac{mV_m^2}{2},$$

1. Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности E падающего света и тем больше, чем больше частота ν .
2. Ток насыщения не зависит от частоты падающего света и тем больше, чем больше его интенсивность (освещенность поверхности).
3. Для каждого фотокатода существует минимальная частота ν_{\min} , при которой еще фиксируется фототок. Эта частота называется «красной границей фотоэффекта» и зависит только от материала катода.

$\nu = \text{const} \quad E_2 > E_1$



2. Красная граница фотоэффекта. Применимо ли это понятие к внутреннему фотоэффекту?

Ответ:

Красная граница фотоэффекта

Красной границей фотоэффекта называется минимальная частота и соответствующая ей максимальная длина волны, при которой наблюдается фотоэффект. Почему она так называется – красная граница?

Если мы возьмем свет такой частоты, при которой будет наблюдаться фотоэффект, и будем ее уменьшать, мы будем по оси частоты смещаться влево,

пока не дойдем до предела, при котором фотоэффект прекратится. Можно поставить рядом ось длин волн.

Если мы будем так же смещаться в видимом спектре, то мы будем двигаться к красному свету, который является граничным для нашего глаза. Свет меньших частот или бóльших длин волн мы уже не видим. Граница видимости соответствует красному цвету.

Для фотоэффекта предельная частота не обязательно соответствует красному цвету, но по аналогии называется красной границей (см. рис. 1).

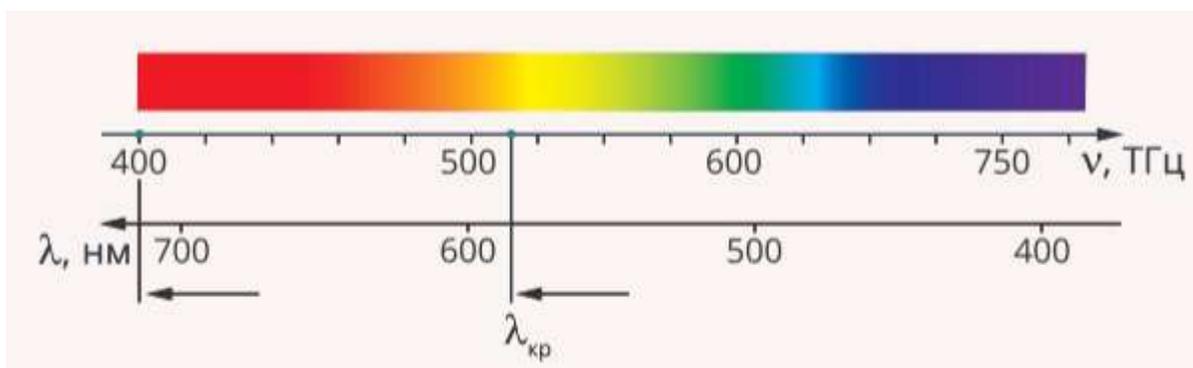


Рис.

Рис.1. Красная граница фотоэффекта и граница спектра видимого света.

Как найти красную границу фотоэффекта.

пишем уравнение Эйнштейна для этого случая. Т. к. энергии такого кванта хватает только на то, чтобы выбить электрон, и на его разгон энергии уже нет (см. рис. 2), составляющая $(mv^2)/2$ будет равна нулю:

$$h\nu_{min} = A_{\text{в}}$$

$$\nu_{min} = \frac{A_{\text{в}}}{h}$$

$$\lambda_{max} = \frac{c}{\nu_{min}} = \frac{hc}{A_{\text{в}}} = \lambda_{кр} \text{ — красная граница фотоэффекта.}$$

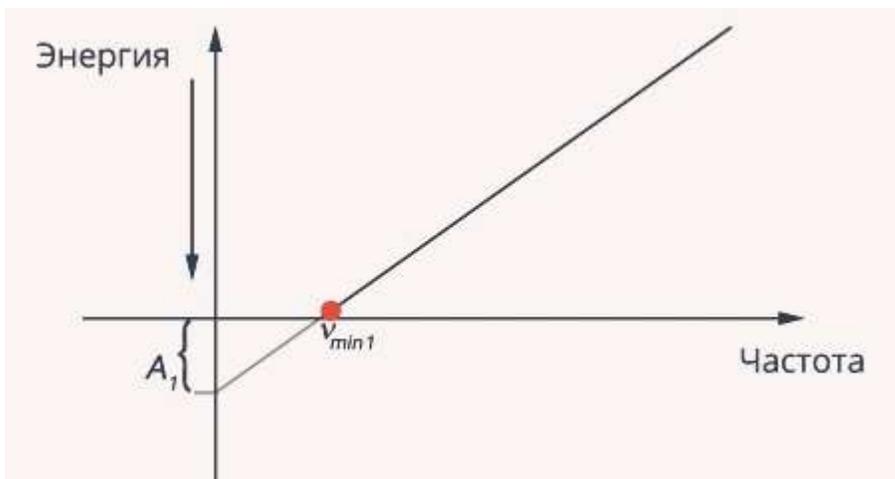


Рис.2. Зависимость кинетической энергии фотоэлектрона от частоты падающего света.

Частота или длина волны, соответствующие красной границе фотоэффекта, зависят от вещества и определяются величиной работы выхода электрона из данного вещества (см. рис. 3).

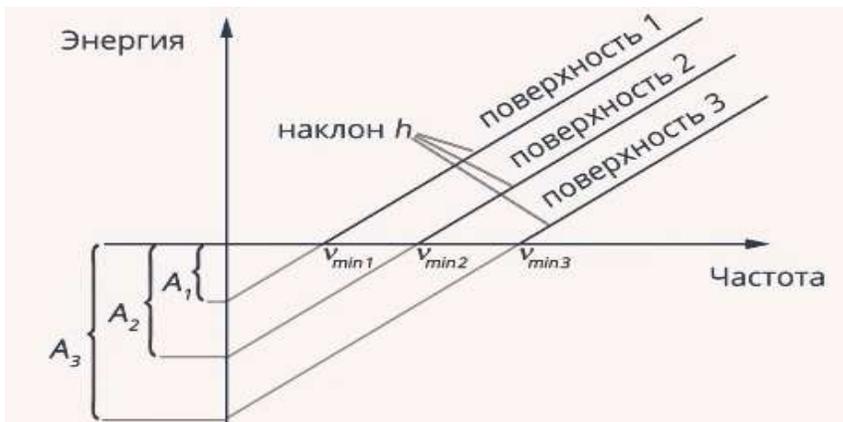


Рис. 3. Зависимость частоты (длины волны) от вещества.

Суммарная энергия квантов $h\nu$ в световом потоке, падающем на металл, – это **интенсивность света**. Если мы изменяем интенсивность света данной частоты, то это значит, что мы изменяем количество фотонов, а значит, и количество фотоэлектронов. Скорость каждого выбитого из металла электрона от интенсивности света не зависит.

3. Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности металла, полностью задерживаются при приложении обратного напряжения $U_3 = 3$ В. Фотоэффект для этого металла начинается при частоте падающего монохроматического света $\nu_{кр} = 6 \times 10^{14}$ Гц. Определить: 1) работу выхода A электронов из этого металла; 2) частоту ν применяемого облучения.

Ответ:

3. Дано $U_3 = 3\text{В}$ $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14}\text{Гц}$ $\nu = ?$ $A_{\text{вых}} = ?$	Решение Красная граница фотоэффекта $A_{\text{вых}} = h\nu_0 = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} = 3,9722 \cdot 10^{-19}\text{ Дж} = 2,48\text{эВ}$ Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}$
	По закону сохранения энергии: $\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = e \cdot U_3$
	Искомая частота света: $\nu = \frac{A_{\text{вых}} + eU_3}{h} = \frac{3,972 \cdot 10^{-19} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 1,325 \cdot 10^{15}\text{ Гц}$
	Ответ: $A_{\text{вых}} = 3,9722 \cdot 10^{-19}\text{ [Дж]} = 2,48\text{ [эВ]}$ $\nu = 1,325 \cdot 10^{15}\text{ [Гц]}$