

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Д.Б. Золотухин

**ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА  
СТОЛЕТОВА И ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ ЭЙНШТЕЙНА**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы  
для студентов всех специальностей

Томск  
2024

УДК 535.215  
ББК 22.3  
381

**Рецензент**  
**Немирович-Данченко Л.Ю.**, старший преподаватель

Одобрено на заседании каф. физики, протокол № 110 от 01.02.2024.

**Золотухин, Денис Борисович**

381 Внешний фотоэффект. Изучение закона Столетова и проверка формулы Эйнштейна: метод. указания по выполнению лабораторной работы / Д.Б. Золотухин. – Томск: ТУСУР, 2024. – 12 с.

Представлена краткая теория основных законов внешнего фотоэффекта. Описана экспериментальная установка для изучения основных законов внешнего фотоэффекта и проверки формулы Эйнштейна, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

УДК 535.215  
ББК 22.3

© Золотухин Д.Б, 2024  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ .....	4
2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	5
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ .....	7
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	9
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	11
6 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	13

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение основных законов внешнего фотоэффекта на основе измерения световой и вольт-амперной характеристик вакуумного фотоэлемента.

### 1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Внешним фотоэффектом называется явление испускания электронов под действием света. Закономерности, которым подчиняется это явление, формулируются в виде трех положений:

- 1) фототок насыщения ( $I_{\text{нас}}$ ) пропорционален световому потоку;
- 2) максимальная скорость фотоэлектронов определяется длиной волны (частотой) света и не зависит от его интенсивности;
- 3) для каждого материала существует минимальная частота света (максимальная длина волны), при которой еще возможен внешний фотоэффект. Другими словами, существует «красная граница фотоэффекта».

**Первое положение называется законом Столетова, второе и третье объединяются формулой Эйнштейна.**

Согласно современным воззрениям, свет представляет собой поток световых квантов – фотонов, энергия каждого из которых равна  $h\nu$  ( $\nu$  – частота,  $h$  – постоянная Планка). При поглощении света веществом каждый фотон отдает свою энергию одному электрону (монофотонный фотоэффект), который при определенном соотношении между энергией поглощенного фотона и величиной потенциального барьера на границе вещество-вакуум (работа выхода) может покинуть вещество. Фотоэлектроны могут накапливаться в вакууме вблизи поверхности вещества так, что их совокупный отрицательный пространственный заряд оказывается способным возвращать вышедшие электроны обратно в вещество. Для устранения такого влияния фотоэлектроны необходимо удалять от поверхности вещества. Это достигается подачей разности потенциалов, ускоряющей электроны, между фотокатодом и анодом. Начиная с некоторой разности потенциалов (20 – 30 В) фототок перестает от нее зависеть, т.е. становится током насыщения. Очевидно, что в условиях отсутствия пространственного заряда количество фотоэлектронов, безвозвратно покидающих вещество в единицу времени, следовательно, и фототок,

прямо пропорциональны числу фотонов, падающих на поверхность вещества в единицу времени, т.е. световому потоку. При этом энергия фотона не оказывает влияния на количество фотоэлектронов. Получив энергию от фотона, электрон теряет часть ее вследствие случайных столкновений в веществе. Энергия, равная работе выхода  $A$ , тратится электроном на преодоление потенциального барьера на границе металл-вакуум. Оставшаяся часть энергии образует кинетическую энергию электрона, вышедшего в вакуум. Максимальной кинетической энергией обладают электроны, вышедшие в вакуум непосредственно с поверхности вещества. Для таких электронов потери на столкновения равны нулю, и их кинетическая энергия  $\frac{mv^2}{2}$  связана с энергией фотона и работой выхода  $A$  формулой Эйнштейна

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A. \quad (1.1)$$

## 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Проверка первого закона фотоэффекта заключается в подтверждении линейной зависимости между фототоком насыщения  $I_{нас}$  и световым потоком, падающим на фотоэлемент. Изменять световой поток можно изменением расстояния  $r$  между источником света и фотоэлементом. Действительно, если  $N$  – число фотонов, испускаемых точечным источником света в единицу времени, то число фотонов  $\Phi$ , попадающих на фотоэлемент (которое пропорционально световому потоку) равно

$$\Phi = \frac{N}{4\pi r^2} S, \quad (2.1)$$

где  $S$  – площадь катода фотоэлемента.

Таким образом, задача сводится к подтверждению линейной зависимости между фототоком насыщения  $I_{нас}$  и  $1/r^2$ , поскольку коэффициент перед  $1/r^2$  в выражении (2.1) представляет собой константу в условиях постоянства накала источника света.

Проверка выражения (1.1) состоит в установлении линейной зависимости между кинетической энергией фотоэлектронов и частотой

света, а также в определении постоянной Планка  $h$  и работы выхода  $A$  материала фотокатода. Частоту света можно изменять плавно, используя монохроматор, или дискретно, располагая между источником белого света и фотоэлементом светофильтры. В настоящей работе цвет излучения изменяют последовательным включением разных светодиодов. При этом следует отметить, что ширина спектра излучения светодиода значительно уже полосы пропускания светофильтра. В настоящей работе рекомендуется полагать излучение светодиода монохроматичным и однозначно сопоставлять ему длину волны  $\lambda$  и частоту  $\nu$ . Определение кинетической энергии фотоэлектронов в данной работе производится методом задерживающего потенциала, при подаче на фотоэлемент напряжения в заперном направлении и увеличении его до тех пор, пока фототок не станет равным нулю. При этом максимальная кинетическая энергия  $\frac{mv^2}{2}$  фотоэлектронов и напряжение запираения  $U_3$  фотоэлемента оказываются связанными соотношением

$$eU_3 = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.2)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

С учетом изложенного, выражение (1.1) преобразуется в

$$eU_3 = h\nu - A, \quad (2.3)$$

или, после деления на заряд электрона  $e$ , в выражение

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{1}{e}A. \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) является рабочим и отражает линейную зависимость  $U_3$  от частоты  $\nu$ . При сравнении (2.4) с уравнением прямой  $y = ax - b$  экспериментальной зависимости  $U_3 = f(\nu)$  могут быть найдены  $h$  и  $A$ :

$$h = ae, A = b. \quad (2.5)$$

### 3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Внешний фотоэффект используется в приборах, которые называются фотоэлементами. В данной работе используется вакуумный фотоэлемент типа СЦВ-4. Фотоэлемент состоит из стеклянного баллона 1 (рисунок 3.1), фотокатода 2 в виде тонкого слоя сурьмяноцезиевого сплава на внутренней поверхности баллона, металлического анода 3 и внешних выводов 4.

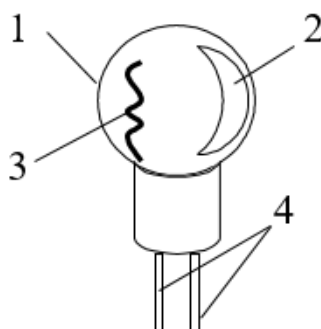


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение фотоэлемента  
1 – стеклянный баллон; 2 – фотокатод; 3 – анод; 4 – выводы

Кроме фотоэлемента (ФЭ) (рисунок 3.2), экспериментальная установка включает в себя источник постоянного напряжения  $E$ , потенциометр  $R1$  для регулировки напряжения, подаваемого на ФЭ, переключатель  $K$  для смены полярности напряжения и приборы для измерения фототока и напряжения на ФЭ.

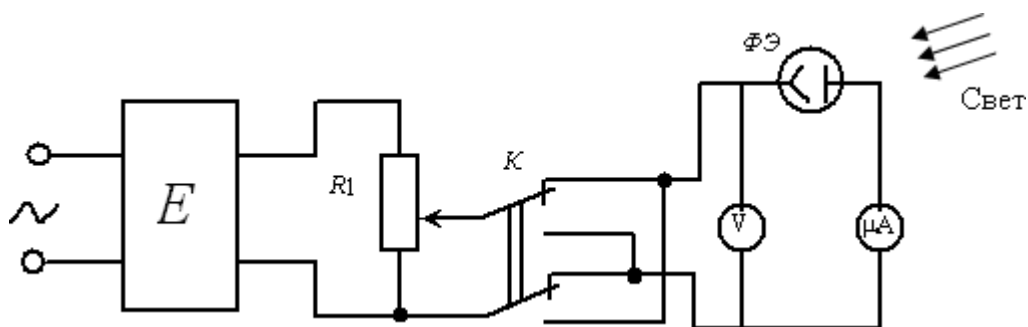


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки

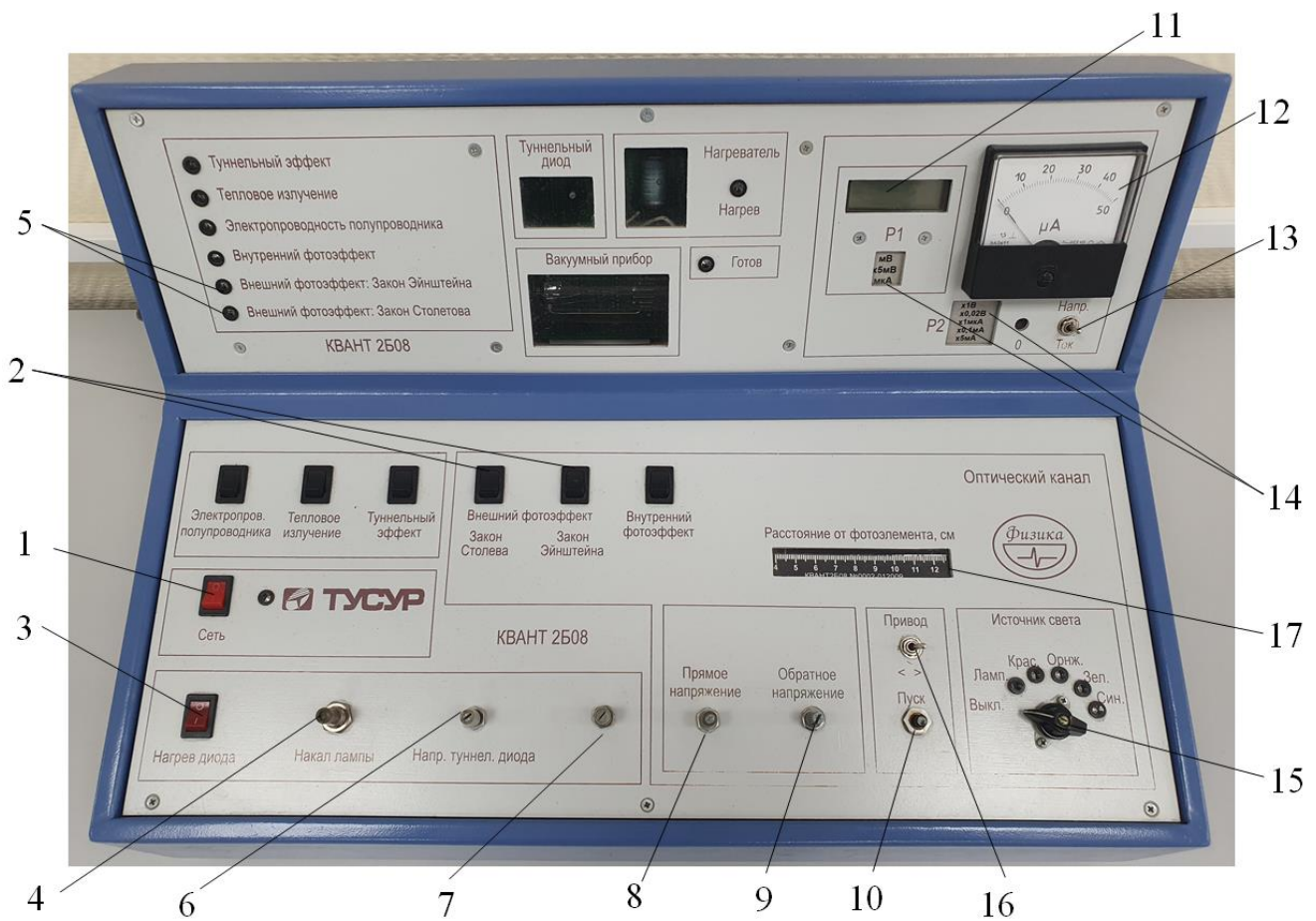


Рисунок 3.3 – Внешний вид установки

Конструктивно установка оформлена в виде настольного блока, внешний вид которого приведен на рисунке 3.3. Органы управления выведены на горизонтальную панель установки, а на наклонной панели расположены контрольно-измерительные приборы. Рукоятки 8, 9 служат для регулировки напряжения на фотоэлементе. Приборы 11, 12 показывают фототок и напряжение на фотоэлементе. Расстояние от источника света до фотоэлемента измеряют по линейке 17. Изменяют расстояние кнопкой 10 и переключателем 16. Переключатель 15 позволяют использовать в качестве источника света лампу накаливания либо цветные светодиоды.



## 4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом работы повернуть все потенциометры против часовой стрелки в крайнее положение. Все кнопки поставить в положение «0», т.е. «выкл». Включить установку кнопкой «Сеть» 1, при этом загорится сигнальная лампочка.

Лабораторная работа рассчитана на выполнение двух предложенных заданий.

### Задание 1. Проверка закона Столетова

1.1 Выбрать соответствующую работу переключателем 2 (рисунок 3.3), при этом загорится соответствующий индикатор 5. Включив тумблер направления движения 16 источника света «влево» и нажав кнопку «пуск» 10, переместить источник света в ближнее к фотоэлементу положение. Переключателем 15 выбрать в качестве источника света лампу накаливания.

1.2 Выставить расстояние  $r = 6$  см по линейке. Вращая рукоятку 8 и регистрируя ток и напряжение по приборам 11, 12, снять зависимость фототока от прямого напряжения. Результаты измерений занести в таблицу 4.1. Учсть, что прибор 11 дает показания в мкА, прибор 12 в вольтах с использованием множителя  $\times 1$  В.

1.3 Повторить п. 1.2 для значений  $r$  равных 7 см и 8 см. Результаты всех измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 Значения фототока  $I$  при различных значениях  $U$  и расстояниях  $r$  от источника света до фотоэлемента

$U, \text{В}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$I, \text{мкА}$ $r = 6 \text{ см}$											
$I, \text{мкА}$ $r = 7 \text{ см}$											
$I, \text{мкА}$ $r = 8 \text{ см}$											

1.4 Построить семейство вольтамперных характеристик на одном графике.

1.5 Зафиксировать величины тока насыщения  $I_{\text{нас}}$  для каждого значения  $r$  по таблице 4.1 или по графику  $I = f(U)$ . Данные занести в таблицу 4.2.

1.6 Для других значений  $r$  получить токи насыщения на приборе (значение тока при максимальном напряжении). Рассчитать величины  $1/r^2$ . Данные занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 Значения фототока насыщения  $I_{\text{нас}}$  при различных расстояниях  $r$  от источника света до фотоэлемента

$I_{\text{нас}}$ , мкА								
$r$ , м	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
$1/r^2$ , $1/\text{м}^2$								

1.7 Нанести экспериментальные точки на график в координатных осях  $x = \frac{1}{r^2}$ ,  $y = I_{\text{нас}}$ . Убедиться в линейности зависимости  $I_{\text{нас}} = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$ . Сделать вывод относительно справедливости фотонной модели и закона Столетова.

## Задание 2. Проверка формулы Эйнштейна

2.1 Выключить кнопкой 2 «Закон Столетова» и включить «Закон Эйнштейна» (рисунок 3.3). Убедиться в загорании соответствующего индикатора 5 и передвижении лампы накаливания в ближнее к фотоэлементу положение, о чем будет свидетельствовать загорание лампочки «Готов» на наклонной панели установки. Переключателем 15 установить в качестве источника света красный светодиод. Вращая рукоятку 9, определить по прибору 12 напряжение, при котором фототок, измеряемый прибором 11, равен нулю. Учесть, что при измерении напряжения следует использовать множитель **0,02 В**. Зафиксировать это напряжение запирающего и занести его в таблицу 4.3.

2.2. Повторить измерения с тремя другими светодиодами выбирая их переключателем 15.

Таблица 4.3. Значения напряжения запираания  $U_3$  при использовании различных светофильтров

Светофильтр	Красный	Оранжевый	Зеленый	Синий
$\lambda$ , нм	655	615	495	440
$\nu$ , с <sup>-1</sup>				
$U_3$ , В				

2.3 Рассчитать частоты  $\nu$  излучения светодиодов, исходя из длин волн  $\lambda$ , указанных в таблице, и используя соотношение  $\nu = c/\lambda$ . Нанести экспериментальные точки на график в координатах  $x = \nu$ ,  $y = U_3$ . Убедиться в наличии линейной зависимости  $U_3 = f(\nu)$ .

2.4 Используя метод наименьших квадратов, определить коэффициенты и их погрешности в уравнении прямой  $U_3 = f(\nu)$ .

2.5 По коэффициентам уравнения прямой определить постоянную Планка  $h$  и работу выхода  $A$  (формула (2.5)).

2.6 Оценить погрешности измерений. Сравнить полученное значение постоянной Планка с табличным значением  $h_T = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с.

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. В чем заключается сущность явления внешнего фотоэффекта?

5.2. Объясните принцип работы фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

5.3. Что такое «красная граница» фотоэффекта? Чем обусловлено ее наличие и положение на шкале длин волн?

5.4. Объясните причину различия вольтамперных характеристик в прямом направлении для разных световых потоков.

5.5. При каких условиях возникает ток насыщения?

5.6. Изобразите вольтамперную характеристику в обратном направлении, поясните ее.

5.7. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.

5.8. Какие закономерности фотоэффекта не удастся объяснить с позиции волновой теории света?

5.9. Запишите и поясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

5.10. Может ли свободный электрон поглотить фотон?

5.11. В чем заключается суть метода задерживающего потенциала для определения постоянной Планка?

5.12. Чем определяется точность полученных результатов в данной работе?

## 6 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

6.1 Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5 т. Том 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Электронный ресурс]: Учебник для вузов / И.В. Савельев. – СПб.: Лань, 2022. – 384 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/210611>. (дата обращения: 30.01.24)

6.2 Физические основы твердотельной электроники [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / Ю.А. Бурачевский [и др.]. – Томск: ТУСУР, 2019. – 152 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/9026>. (дата обращения: 30.01.24)

6.3 Зенин, А.А. Общие требования и правила оформления отчета по лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А.А. Зенин. – Томск: ТУСУР, 2023. – 21 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10389>. (дата обращения: 30.01.24)

6.4 Мухачев, В.А. Оценка погрешностей измерений: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / В.А. Мухачев. – Томск: ТУСУР, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>. (дата обращения: 30.01.24)