

*Белый Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»*

*Бабаев Джамиль Джониевич, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛОСКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННОЙ ЦИНКОВОЙ ПЛАСТИНОЙ

Аннотация: В данной статье проводится исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии видимого излучения с плоской металлической заряженной пластиной. Результатом исследования являются зависимости модуля напряжённости электростатического поля возле металлической пластины, имеющей равномерно распределённый поверхностный заряд, от величины дистанции «пробега» фотоэлектрона, «вырванного» фотоном падающего на пластину монохроматического излучения видимого диапазона.

Ключевые слова: внешний фотоэффект, электростатическое поле, фотоэлектрон, распределённый электрический заряд, фототок, потенциал поля.

Annotation: This article investigates the phenomenon of the external photoelectric effect in the interaction of visible radiation with a flat metal charged plate. The result of the study is the dependence of the modulus of the electrostatic field strength near a metal plate with a uniformly distributed surface charge, on the distance of the "run" of the photoelectron, "pulled out" by a photon of the monochromatic radiation of the visible range incident on the plate.

Key words: external photoelectric effect, electrostatic field, photoelectron, distributed electric charge, photocurrent, field potential.

Введение. В данной научной статье проводится исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии оптического излучения видимого диапазона с плоской металлической заряженной пластиной, выполненной из цинка. Целью научного труда является исследование влияния потенциальных характеристик электростатического поля, создаваемого между анодом и катодом в экспериментальной установке (рисунок 1) по исследованию явления внешнего фотоэффекта, на длину «пробега» вырванных с поверхности катода фотоэлектронов, в сторону анода. Данная цель достигается путём решения двух взаимосвязанных между собой задач:

1. Аналитический вывод функции зависимости электрической напряжённости электростатического поля, создаваемого между анодом и катодом за счёт равномерного распределения заряженных частиц по поверхности металлических пластин экспериментальной установки от величины «пробега» вырванных с поверхности катода фотоэлектронов.

2. Построение графика зависимости напряжённости электростатического поля от величины «пробега» вырванных с поверхности катода фотоэлектронов, отдельно для трёх заранее выбранных величин длин волн монохроматического излучения, соответствующих красному, зелёному и синему цветам.



Рисунок 1 – Внешний вид установки для исследования явления внешнего фотоэффекта [1]

Методическим инструментарием для проведения научного исследования являются положения и нормы, достаточно чётко и подробно описанные в [2, с. 312-354; 3, с. 82-156; 4, с. 124-207]. Данная научная методика успешно реализована в трудах [5, с. 25-30; 6, с. 182-197; 7, с. 87-96] в ходе исследования процессов, в том числе и не имеющих тесной взаимосвязи с внешним фотоэффектом.

Постановка задачи. Предположим, что металлическая пластина экспериментальной установки (рисунок 2), выполненная из цинка и имеющая равномерно распределённый по всей своей поверхности заряд, взаимодействует с монохроматической электромагнитной волной оптического диапазона излучений.

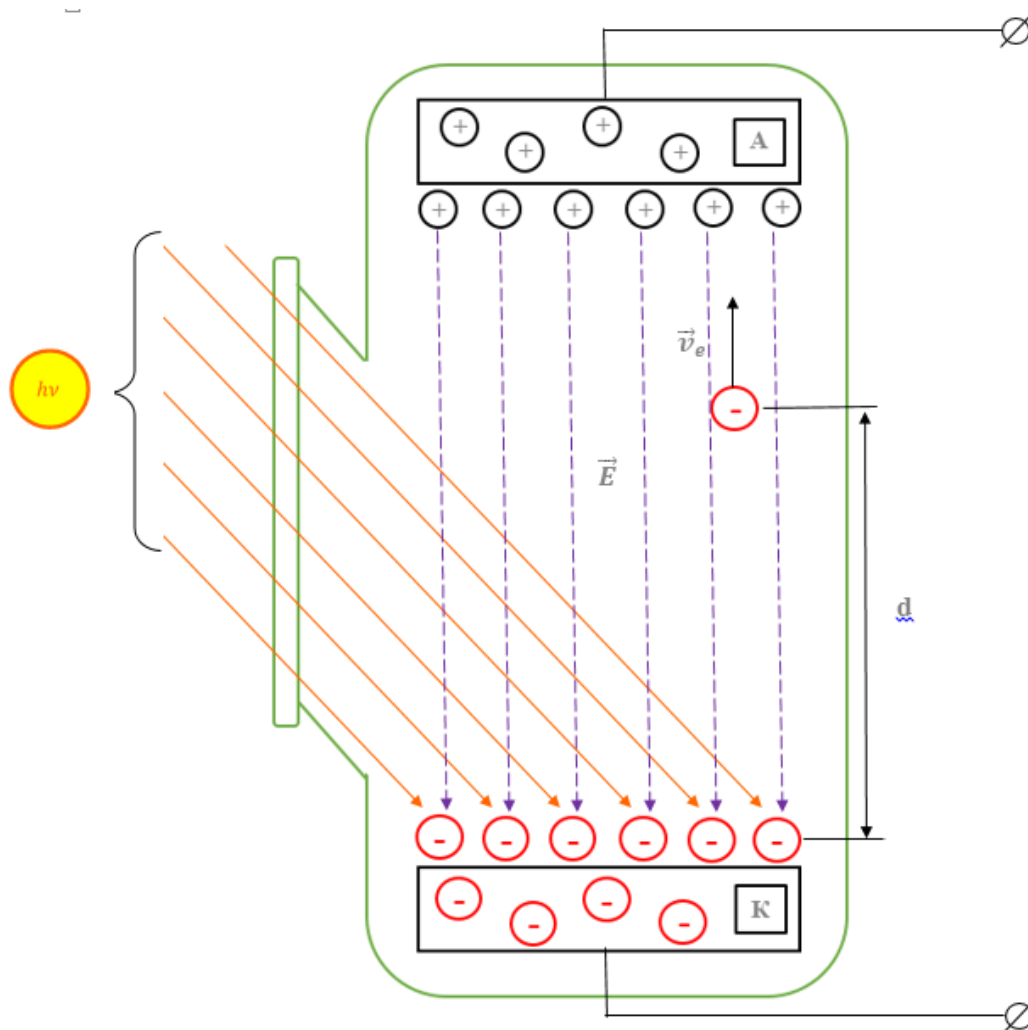


Рисунок 2 – Схема эксперимента по исследованию внешнего фотоэффекта

Длина волны в процессе взаимодействия не изменяется. Значение длины волны находится в известном диапазоне волн видимой части спектра электромагнитных излучений, ограниченном значениями $(0,38 \cdot 10^{-6} \dots 0,78 \cdot 10^{-6})$ [м] по длине волны и $(3,84 \cdot 10^{14} \dots 7,89 \cdot 10^{14})$ [Гц] по частоте. Электрическое поле пластины является однородным задерживающим электрическим полем для фотоэлектронов, вырываемых с её поверхности из-за взаимодействия последней с монохроматическим излучением видимого диапазона волн [8, с. 520], [9, с. 12-17]. В процессе взаимодействия оптического излучения с поверхностью заряженной пластины, оторвавшийся фотоэлектрон способен пролететь, преодолев определённое расстояние d , далее, остановившись под действием задерживающего электрического поля напряжённостью \vec{E} , создаваемого заряженной пластиной, возвращается назад. Задача сводится к исследованию зависимости модуля напряжённости $|\vec{E}|$ электростатического поля возле металлической пластины, имеющей равномерно распределённый поверхностный заряд, от величины дистанции «пробега» d фотоэлектрона, «вырванного» фотоном падающего на пластину монохроматического излучения.

Решение задачи. Сначала, по известному значению расстояния d , необходимо определить связь между величиной задерживающего напряжения U и модулем напряжённости однородного электростатического поля $|\vec{E}|$, создаваемого равномерно распределённым по поверхности металлической пластины зарядом:

$$U = |\vec{E}| \cdot d. \quad (1)$$

Задерживающее напряжение U определяется величиной работы, затрачиваемой на остановку фотоэлектронов. Известно, что условием остановки фотоэлектрона является равенство потенциала $e \cdot U$ задерживающего фотоэлектрон электростатического поля, создаваемого данным и кинетической энергией $W_{\text{кин}}$ фотоэлектрона:

$$W_{\text{кин}} = e \cdot U. \quad (2)$$

С учётом (1), выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$W_{\text{кин}} = e \cdot |\vec{E}| \cdot d. \quad (3)$$

Необходимым условием создания фототока является наличие достаточного запаса энергии у фотоэлектрона, позволяющего последнему [10, с. 605]:

– преодолеть воздействие задерживающего электростатического поля заряженной пластины. Воздействие считается преодолённым при обязательном выполнении неравенства вида $W_{\text{кин}} > e \cdot U$;

– преодолеть расстояние между пластинами фотоэлектронного умножителя. Для этого необходим запас энергии $W_{\text{кин}} > e \cdot |\vec{E}| \cdot d$.

Данный запас энергии фотоэлектрону может быть передан фотоном, взаимодействующим с заряженной пластиной. В соответствии с уравнением Эйнштейна

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = A_{\text{вых}} + W_{\text{кин}}. \quad (4)$$

В левой части уравнения (4) записано выражение для энергии фотона, соответствующей длине волны λ монохроматического излучения, взаимодействующего с равномерно заряженной поверхностью металлической пластины. С учётом (3) уравнение Эйнштейна запишется в виде:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = A_{\text{вых}} + e \cdot |\vec{E}| \cdot d. \quad (5)$$

Чтобы исследовать зависимость модуля напряжённости $|\vec{E}|$ электростатического поля возле металлической пластины, имеющей равномерно распределённый поверхностный заряд, от величины дистанции «пробега» d фотоэлектрона, «вырванного» фотоном падающего на пластину монохроматического излучения, требуется из выражения (5) выразить величину $|\vec{E}|$:

$$|\vec{E}| = \frac{1}{e \cdot d} \cdot \left(\frac{h \cdot c}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right). \quad (6)$$

Таким образом, получается окончательное уравнение зависимости модуля напряжённости $|\vec{E}|$ электростатического поля возле металлической пластины,

имеющей равномерно распределённый поверхностный заряд, от величины дистанции «пробега» d фотоэлектрона.

Пример решения задачи графическим методом позволяет наглядно представить модуль напряжённости $|\vec{E}|$ электростатического поля от величины дистанции «пробега» d фотоэлектрона.

Исходные данные:

- работа выхода фотоэлектрона с поверхности цинковой пластины:
 $A_{\text{вых}} = 5,82 \cdot 10^{-19}$ [Дж];
- длина волны монохроматического излучения видимого диапазона, соответствующая красному цвету: $\lambda_1 = 0,69 \cdot 10^{-6}$ [м];
- длина волны монохроматического излучения видимого диапазона, соответствующая зелёному цвету: $\lambda_2 = 0,53 \cdot 10^{-6}$ [м];
- длина волны монохроматического излучения видимого диапазона, соответствующая синему цвету: $\lambda_3 = 0,46 \cdot 10^{-6}$ [м].

Требуется построить график функции вида $|\vec{E}| = f(d)$, в соответствии с уравнением (6).

График функции, построенный по уравнению (6) в соответствии с исходными данными, представлен на рисунке 3.

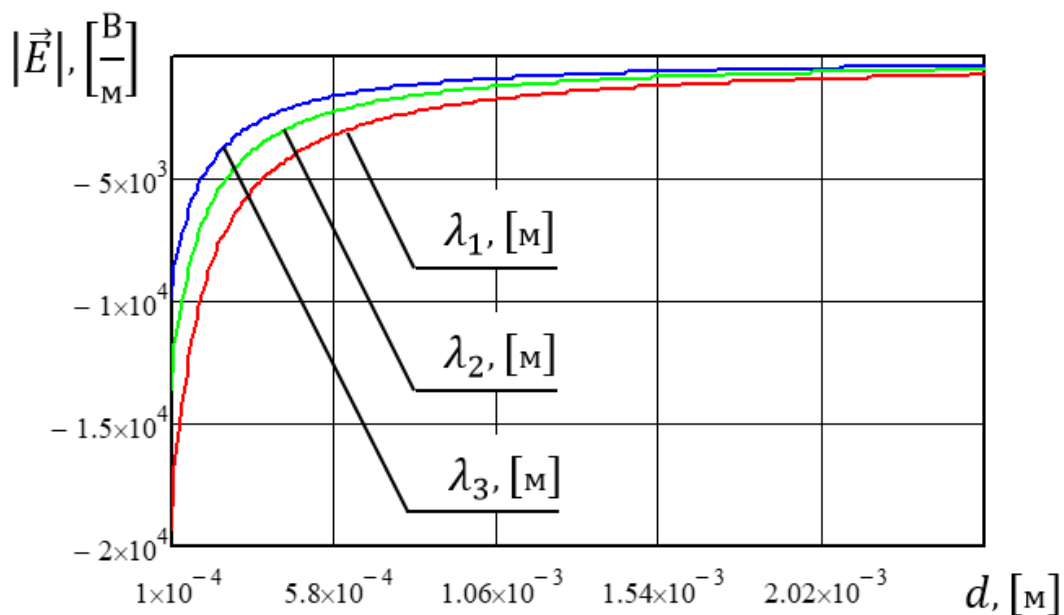


Рисунок 3 – График зависимости вида $|\vec{E}| = f(d)$

Выводы:

– электростатическое поле, создаваемое заряженными частицами на аноде и катоде экспериментальной установки, распределённых по поверхности последних равномерно, оказывает примерно одинаковое влияние на траектории пробегов фотоэлектронов, «вырванных» с поверхности катода, выполненного из цинка;

– наибольший пробег d совершается фотоэлектронами, «вырванными» с поверхности катода монохроматическим излучением красного цвета, наименьший пробег – фотоэлектронами, «вырванными» излучением синего цвета при условии наличия в обоих случаях одинакового потенциала задерживающего электростатического поля;

– одинаковые пробеги d при разных длинах волн монохроматического облучения будут иметь место при различных значениях напряжённости электростатического поля, причём наибольший потенциал задерживающего поля требуется для случая облучения катода излучением, соответствующим синему цвету;

– величина напряжённости задерживающего электростатического поля при удалении фотоэлектрона от катода на расстояние более 1 [мм] уже практически не будет зависеть от длины волны облучения катода.

Библиографический список:

1. Задачи ЕГЭ по квантовой физике и элементам астрофизики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://slide-share.ru/zadachi-egeh-po-kvantovoj-fizike-ehlementam-astrofiziki-426968>. (Дата обращения: 25.01.2022).
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 720 с.
3. Пантел Р., Путхов Г. Основы квантовой электроники. – М.: Мир, 1972. – 379 с.

4. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.
5. Белый В.С., Брыль С.В. Уравнения регрессии для случайных величин исходного и конечного влагосодержания пенополимерминеральной изоляции труб магистральных теплопроводов. Экология и строительство. 2019. № 1. С. 25-30.
6. Белый В.С., Поборцев В.В., Серёгин В.О., Харитонов Р.Д. Корреляционный анализ процессов водопоглощения пенополиминеральной изоляции труб магистральных теплопроводов. В книге: Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы. Материалы V Международной научно-практической конференции. 2018. С. 182-197.
7. Белый В.С. Основные выводы по результатам исследования распределения влагосодержания в материале пенополимерминеральной изоляции стальных труб магистральных теплопроводов при погружении их в воду. Евразийское Научное Объединение. – 2020. – № 8-2(66). – С. 87-96.
8. Cohen-Tannoudji C., Dupont-Roc J., Grynberg G. Atom-Photon Interactions. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2004. – 520 p.
9. Белый В.С. Алгоритм определения форм-фактора газового лазера в режиме развитой генерации / В.С. Белый / Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – №11. – с. 12-17. – DOI 10.25791/asu.11.2021.1324.
10. Haroche S., Raimond J.-M. Exploring the Quantum: Atoms, Cavities, and Photons. – Oxford: Oxford University Press, 2006. – 605 p.