

Шиллер Михаил Павлович

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Камалетдинова Алина Ильдаровна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Иванова Олеся Сергеевна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Трандин Семён Евгеньевич

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА И ЕГО ОБЪЯСНЕНИЕ В РАМКАХ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА

Аннотация. В работе рассматривается внешний фотоэлектрический эффект — испускание электронов веществом под действием света. Целью является систематизация представлений о законах фотоэффекта и анализ их объяснения на основе квантовой гипотезы. Показана несостоятельность волновой трактовки явления, приведено уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и проанализировано понятие красной границы. Полученные выводы лежат в основе работы фотоэлементов, солнечных батарей и приборов ночного видения.

Ключевые слова: фотоэффект, фотон, квант света, работа выхода, красная граница, уравнение Эйнштейна, фотоэлектрон.

Shiller Mikhail Pavlovich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Kamaletdinova Alina Ildarovna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Ivanova Olesya Sergeevna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Trandin Semyon Evgenievich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

THEORETICAL ANALYSIS OF THE EXTERNAL PHOTOELECTRIC EFFECT AND ITS EXPLANATION WITHIN THE QUANTUM THEORY OF LIGHT

Abstract. The paper considers the external photoelectric effect — the emission of electrons by a substance under the action of light. The goal is to systematize ideas about the laws of the photoelectric effect and to analyze their explanation based on the quantum hypothesis. The inconsistency of the wave interpretation of the phenomenon is shown, Einstein's equation for the photoelectric effect is given, and the concept of the red boundary is analyzed. The conclusions underlie the operation of photocells, solar batteries, and night vision devices.

Keywords: photoelectric effect, photon, light quantum, work function, red boundary, Einstein's equation, photoelectron.

Введение

На рубеже XIX и XX веков классическая физика столкнулась с рядом явлений, которые не находили объяснения в рамках волновой теории света. Одним из таких явлений стал внешний фотоэлектрический эффект — испускание электронов поверхностью металла под действием падающего на неё электромагнитного излучения, открытое Генрихом Герцем в 1887 году и детально исследованное А.Г. Столетовым.

Экспериментально были установлены закономерности фотоэффекта, которые вступали в прямое противоречие с предсказаниями волновой теории. В частности, максимальная кинетическая энергия вылетающих электронов не зависела от интенсивности света, а определялась только его частотой; кроме того, существовала минимальная частота, ниже которой фотоэффект не наблюдался вовсе, независимо от мощности источника.

Актуальность изучения фотоэффекта определяется тем, что именно его объяснение, данное А. Эйнштейном в 1905 году, стало одним из краеугольных камней квантовой физики и принесло автору Нобелевскую премию. Сегодня фотоэффект лежит в основе работы множества устройств — от солнечных батарей до фотоумножителей и приборов ночного видения.

Целью данного исследования является теоретический анализ законов внешнего фотоэффекта и обоснование невозможности их объяснения в рамках классической волновой теории с последующим переходом к квантовому описанию.

Методы и теоретические основы

Согласно классической волновой теории, энергия световой волны пропорциональна квадрату её амплитуды, то есть интенсивности. Из этого

следовало бы, что при увеличении интенсивности света энергия вырываемых электронов должна возрастать, а при достаточно ярком освещении фотоэффект должен наблюдаться на любой частоте. Эксперимент опровергал оба этих вывода.

Для разрешения противоречия А. Эйнштейн развил гипотезу М. Планка о квантовании энергии и предположил, что свет не только излучается, но и распространяется и поглощается отдельными порциями — квантами (фотонами). Энергия одного фотона определяется его частотой:

$$E = h \cdot \nu$$

где h — постоянная Планка, ν — частота излучения. В этой картине каждый электрон поглощает энергию одного фотона целиком. Часть этой энергии затрачивается на преодоление сил связи электрона с металлом — работу выхода A , а остаток переходит в кинетическую энергию вылетевшего электрона. Закон сохранения энергии для одного акта поглощения записывается в виде уравнения Эйнштейна:

$$h \cdot \nu = A + m \cdot v^2 / 2$$

Из уравнения непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растёт с частотой света и совершенно не зависит от его интенсивности. Интенсивность определяет лишь число падающих фотонов, а значит, и число вырванных электронов, но не их энергию.

Если энергия фотона меньше работы выхода, электрон не может покинуть металл ни при какой интенсивности освещения. Граничная частота, при которой фотоэффект ещё возможен, называется красной границей фотоэффекта и определяется условием равенства энергии фотона работе выхода:

$$\nu_0 = A / h$$

Результаты теоретического анализа

Квантовая теория полностью и количественно объясняет все экспериментальные законы фотоэффекта. Во-первых, линейная зависимость максимальной кинетической энергии электронов от частоты излучения прямо вытекает из уравнения Эйнштейна; при этом тангенс угла наклона графика равен постоянной Планка, что было блестяще подтверждено опытами Р. Милликена.

Во-вторых, существование красной границы получает естественное объяснение: при частоте ниже пороговой энергии отдельного фотона недостаточно для совершения работы выхода, и увеличение числа таких

фотонов ничего не меняет, поскольку электрон поглощает энергию лишь одного кванта.

В-третьих, безынерционность фотоэффекта (электроны вылетают практически мгновенно после начала освещения) объясняется тем, что акт поглощения фотона является элементарным и не требует времени на накопление энергии, как предполагала бы волновая модель.

Практическая значимость фотоэффекта огромна. На внешнем фотоэффекте основана работа вакуумных фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей, регистрирующих слабые световые потоки. Родственный внутренний фотоэффект используется в полупроводниковых фотодиодах и солнечных батареях, преобразующих энергию света в электрическую. На этих же принципах работают приборы ночного видения и системы автоматического управления освещением.

Заключение

Проведённый теоретический анализ подтверждает, что внешний фотоэффект является явлением, принципиально не объяснимым в рамках классической волновой теории и требующим квантовых представлений о природе света.

Основные выводы исследования:

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется частотой света, а не его интенсивностью, что прямо следует из уравнения Эйнштейна.

Существование красной границы фотоэффекта обусловлено тем, что энергия фотона должна быть не меньше работы выхода электрона из вещества.

Безынерционность и пороговый характер явления свидетельствуют о дискретной (квантовой) структуре светового излучения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением внутреннего и вентильного фотоэффекта в полупроводниковых структурах, лежащих в основе современной фотовольтаики и оптоэлектроники.

Использованные источники

Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы. — М.: Лаборатория знаний, 2014. — 256 с.

Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. — М.: Лань, 2018. — 320 с.

Шпольский Э.В. Атомная физика. Том 1. — М.: Лань, 2010. — 560 с.