

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 530.1

Угловое распределение энергии электронов при их взаимодействии с фотонами

А.Н. Волобуев, А.В. Скворцов

Рассмотрено явление внутреннего фотоэффекта для нерелятивистского и релятивистского случаев, а также Комpton-эффект на свободных электронах применительно к схеме фотоэлемента с обратным облучением катода. Уточнено угловое распределение фотоэлектронов для этих явлений. Найдена формула работы выхода для комптоновских свободных электронов.

При конструировании фотоэлементов возникает проблема получения максимального фототока при облучении металла потоком электромагнитного излучения [1]. Величина фототока может зависеть от многих факторов, в частности от направления облучения катода: со стороны анода или с противоположной стороны при очень тонком катоде. Кроме того, фотон может взаимодействовать как со связанными электронами, так и со свободными. Относительная доля этих фотоэлектронов также определяет величину общего фототока в фотоэлементе.

Вследствие этого представляет интерес рассмотреть различие в угловом распределении фотоэлектронов при внутреннем фотоэффекте и Комpton-эффекте, которые до взаимодействия с фотоном находились либо в составе атома, либо были свободными.

1. Внутренний фотоэффект (нерелятивистский случай)

Несмотря на то, что природа фотоэффекта была объяснена Эйнштейном еще в начале XX века, в описании углового распределения фотоэлектронов, выбиваемых фотонами из атомов, существуют значительные разногласия. Например, в [2] указывается, что в направлении

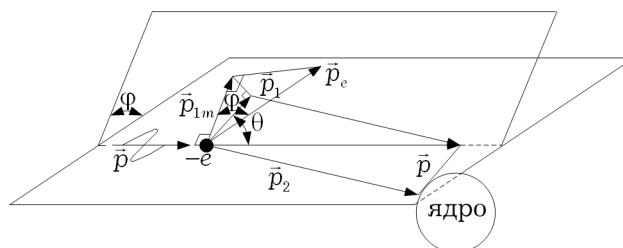


Рис. 1. Направление векторов импульсов частиц при внутреннем фотоэффекте

распространения кванта фотоэлектроны не вылетают. Это заключение делается на основании положений, которые в упрощенном варианте представляются следующими.

Импульс, вылетевшего электрона определяется в основном действием на электрон электрического вектора кванта света. В случае, если электрон вылетает в направлении электрического вектора кванта, то он приобретает импульс $\vec{p}_e$. В плоскости, расположенной под углом φ к плоскости поляризации кванта света (рис. 1) величина импульса электрона будет $p_{1m} = p_e \cos \varphi$. Если импульс электрона, кроме того, направлен под углом θ к направлению кванта света, то его величина составит значение:

$$p_1 = p_e \cos \varphi \sin \theta. \quad (1.1)$$

Следовательно, энергия фотоэлектрона равна:

$$E_1 = \frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{p_e^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta}{2m_1}, \quad (1.2)$$

где m_1 – масса электрона.

При $\theta = 0$ энергия фотоэлектронов $E_1 = 0$. Фотоэлектроны в максимальной степени вылетают в направлении светового вектора или вектора поляризации, т.е. вектора напряженности элек-

А.Н. Волобуев

г. Самара, Самарский государственный медицинский университет

А.В. Скворцов

г. Москва, Московский государственный открытый университет

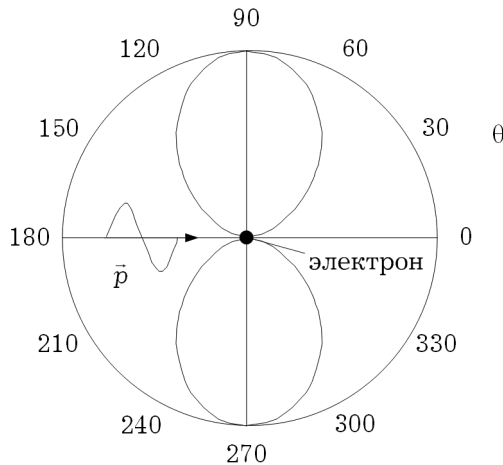


Рис. 2. Угловое распределение фотоэлектронов при отсутствии у них продольного импульса

трического поля кванта света. Такая же зависимость предлагается и в [3]. Формула (1.2) носит упрощенный характер по сравнению [2, 3], но верно передает основную зависимость энергии распределения вылета фотоэлектронов от углов φ и θ .

Зависимость (1.2) имеет тот недостаток, что при ее выводе не использовался закон сохранения импульса, поэтому и отсутствует движение электрона в направлении $\theta = 0$. Использование уравнения сохранения импульса в [2, 3] не может считаться удовлетворительным, т.к. в проведенном авторами анализе оно носит вспомогательный характер. В основе анализа [2, 3] лежит переход электрона из дискретного энергетического спектра в состояние непрерывного спектра под влиянием гармонического возмущения, т.е. матричный элемент оператора возмущения является гармонической функцией времени. Другими словами, упор делается на волновую природу кванта, взаимодействующего с электроном. Угловое распределение энергии электронов в относительных единицах, построенное по формуле (1.2), показано на рис. 2.

В [4] рассмотрено распределение угла вылета электронов только в релятивистском случае. При этом получено, что электроны испускаются преимущественно в направлении распространения фотона. Однако проведенный вывод также фактически основывается на формуле (1.1) и не использует закон сохранения импульса. Поэтому недостаток вывода [4] проявляется в отсутствии в окончательных формулах углового распределения электронов массы ядра m_2 . А ведь масса ядра определяет долю импульса фотона, которую может взять на себя ядро.

Рассмотрим явление внутреннего фотоэффекта более подробно, рис. 1. Квант света импульсом $\vec{p}$ и энергией E выбивает электрон из атома, совершая работу выхода $A_{\text{вых}}$. При этом должны соблюдаться как закон сохранения энергии:

$$E = A_{\text{вых}} + E_1 = E_2 + E_1, \quad (1.3)$$

где E_1 – кинетическая энергия вылетевшего электрона, так и закон сохранения импульса:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2, \quad (1.4)$$

где $\vec{p}_1$ – импульс вылетевшего электрона, $\vec{p}_2$ – импульс, переданный ядру.

Формула (1.3) показывает, что работа выхода представляет собой энергию, передаваемую ядру $A_{\text{вых}} = E_2$, которая, в конечном счете, идет на нагревание вещества.

Величину импульса, переданного ядру, можно найти по формуле, следующей из (1.4):

$$p_2^2 = p^2 + p_1^2 - 2pp_1 \cos \theta. \quad (1.5)$$

Для совместного решения системы уравнений (1.3) и (1.5) уравнение (1.3) удобно выразить через импульсы. Учитывая $E = pc$, где c – скорость света в вакууме, найдем:

$$pc = A_{\text{вых}} + \frac{p_1^2}{2m_1}, \quad (1.6)$$

где m_1 – масса электрона.

Используя формулу для энергии электрона на орбите водородоподобного атома

$$E_{\text{эл}} = -\frac{m_1 e^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} [5],$$

где e – заряд электрона, Z – зарядовое число ядра, ϵ_0 – электрическая постоянная, h – постоянная Планка, n – главное квантовое число, а также учитывая $A_{\text{вых}} = -E_{\text{эл}}$, получим:

$$pc = A_{\text{вых}} + \frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{m_1 e^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} + \frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{p_1^2}{2m_1} (1 + \varsigma^2), \quad (1.7)$$

где параметр

$$\varsigma = \frac{m_1 e^2 Z}{2\epsilon_0 h n p_1} = \frac{e^2 Z}{2\epsilon_0 h n V} = \alpha \frac{Z}{n} \frac{c}{V}.$$

Величина

$$\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h c} = \frac{1}{137}$$

– постоянная тонкой структуры [5], V – скорость электрона.

Учитывая $A_{\text{вых}} = E_2$, получаем отношение энергий фотона и электрона при внутреннем фотоэффекте:

$$\frac{E}{E_1} = (1 + \zeta^2). \quad (1.8)$$

Такая же формула получена в [4].

Энергия, передаваемая ядру:

$$E_2 = E - E_1 = \zeta^2 E_1. \quad (1.9)$$

Уравнение для импульсов (1.5) можно записать через энергии, учитывая $E = pc$, $E_1 = p_1^2 / (2m_1)$ и $E_2 = p_2^2 / (2m_2)$, где m_1 и m_2 – массы электрона и ядра. Таким образом:

$$2m_2 E_2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 + 2m_1 E_1 - 2\frac{E}{c} \sqrt{2m_1 E_1} \cos\theta. \quad (1.10)$$

Используя (1.8) и (1.9), находим:

$$2m_2 \zeta^2 E_1 = \left(\frac{E_1}{c}\right)^2 (1 + \zeta^2)^2 + 2m_1 E_1 - 2\frac{E_1 (1 + \zeta^2)}{c} \sqrt{2m_1 E_1} \cos\theta. \quad (1.11)$$

Первым решением уравнения (1.11) является условие $E_1 = 0$, т.е. фотоэлектрон не вылетает из ядра. Данное решение указывает, что явление внутреннего фотоэффекта не наблюдается, т.к. $E < A_{\text{вых}}$.

Сокращая уравнение (1.11) на E_1 и обозначая

$$G = \frac{\sqrt{E_1} (1 + \zeta^2)}{c},$$

запишем (1.11) в виде:

$$G^2 - 2\sqrt{2m_1} G \cos\theta + 2m_1 - 2m_2 \zeta^2 = 0. \quad (1.12)$$

Решения уравнения (1.12) имеют вид:

$$G_{1,2} = \sqrt{2m_1} \cos\theta \pm \sqrt{2m_2 \zeta^2 - 2m_1 \sin^2\theta} = \sqrt{2m_1} \left(\cos\theta \pm \sqrt{\frac{m_2}{m_1} \zeta^2 - \sin^2\theta} \right). \quad (1.13)$$

Соответственно, получаем еще два решения уравнения (1.11):

$$(E_1)_{2,3} = \frac{2m_1 c^2}{(1 + \zeta^2)^2} \left(\cos\theta \pm \sqrt{\frac{m_2}{m_1} \zeta^2 - \sin^2\theta} \right)^2. \quad (1.14)$$

Полученный результат существенно отличается от (1.4).

Обозначим

$$\gamma = \frac{m_2}{m_1} \zeta^2 = \frac{m_2}{m_1} \left(\alpha \frac{Z}{n} \frac{c}{V} \right)^2 = \frac{m_2}{m_1} \left(\alpha \frac{Z}{\beta n} \right)^2,$$

где $\beta = V/c$ показывает, какую долю составляет скорость электрона от скорости света в вакууме.

Принимая $Z = n = 1$ как у водорода, а также подставляя отношение массы ядра водорода к массе электрона $m_2/m_1 = 1824$, находим $\gamma = (0,312/\beta)^2$.

Следовательно, формула (1.14) приобретает вид:

- 1 $\beta = 0.01$
- 2 $\beta = 0.1$
- 3 $\beta = 0.2$
- 4 $\beta = 0.312$

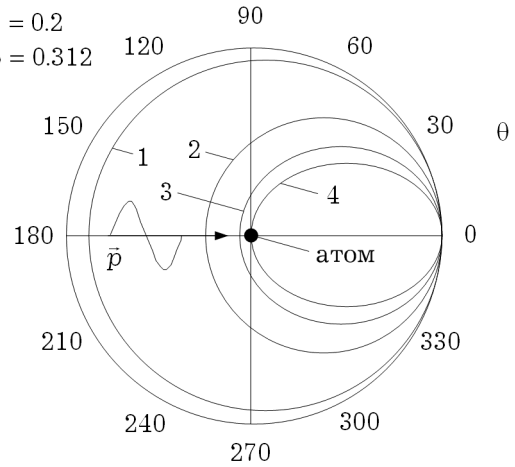


Рис. 3. Угловое распределение фотоэлектронов при внутреннем фотоэффекте в зависимости от их относительной скорости $\beta = V/c$

$$E_1 = \frac{2m_1 c^2}{(1 + \zeta^2)^2} \left(\cos\theta + \sqrt{\gamma - \sin^2\theta} \right)^2. \quad (1.15)$$

Анализ формулы (1.15) показывает, что перед корнем надо брать знак плюс, т.к. иначе рассеяние электронов идет в сторону, обратную, направлению падающего фотона. Кроме того, величина $\gamma \geq 1$. В противном случае под корнем может возникнуть отрицательное значение при углах θ близких к $\pi/2$. Данное ограничение показывает, что величина $\beta = V/c \leq 0,312$. Полученное условие характеризует максимально возможную скорость, которую может получить электрон при внутреннем фотоэффекте на водороде.

На рис. 3 показано угловое распределение вылета электронов при внутреннем фотоэффекте в относительных единицах, построенное по формуле (1.15), для нескольких значений β . При малых скоростях вылета электронов вероятность вылета их из атома в различных направлениях почти одинакова, что полностью противоречит выводам [2, 3]. При больших скоростях фотоэлектронов они испускаются преимущественно по направлению падающего на атом фотона, даже в нерелятивистском случае.

2. Внутренний фотоэффект (релятивистский случай)

При рассмотрении релятивистского варианта внутреннего фотоэффекта закон сохранения энергии нужно записать в виде:

$$E = A_{\text{вых}} + E_{\text{кин}} = E_2 + E_{\text{кин}}, \quad (2.1)$$

где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия фотоэлектрона.

Закон сохранения импульса остается в форме (1.5). Используя релятивистскую связь между энергией и импульсом для электрона:

$$E_1^2 = p_1^2 c^2 + m_1^2 c^4, \quad (2.2)$$

где E_1 – полная энергия электрона, m_1 – в данном случае его масса покоя, выразим из (2.2) импульс электрона и подставим в уравнение (1.5). Для удобства дальнейших преобразований запишем (2.2) в виде:

$$p_1^2 = \frac{E_1^2 - m_1^2 c^4}{c^2} = \frac{(E_1 + m_1 c^2) E_{\text{кин}}}{c^2}. \quad (2.3)$$

При записи (2.3) использовано соотношение:

$$E_{\text{кин}} = E_1 - m_1 c^2. \quad (2.4)$$

Уравнение (1.5) преобразуется к виду:

$$2m_2 c^2 E_2 = E^2 + (E_1 + m_1 c^2) E_{\text{кин}} - 2E \sqrt{(E_1 + m_1 c^2) E_{\text{кин}}} \cos \theta. \quad (2.5)$$

Преобразуем закон сохранения энергии (2.1):

$$E = E_{\text{кин}} \left(1 + \frac{E_2}{E_{\text{кин}}} \right) = E_{\text{кин}} (1 + \zeta^2). \quad (2.6)$$

В (2.6.) обозначено $\zeta^2 = E_2 / E_{\text{кин}}$. Или:

$$E_2 = \zeta^2 E_{\text{кин}}. \quad (2.7)$$

Подставляя, как и в нерелятивистском случае, (2.6) и (2.7) в (2.5), и сокращая результат на $E_{\text{кин}} \neq 0$, что для релятивистского случая, очевидно, подразумевается, получаем:

$$2m_2 c^2 \zeta^2 = E_{\text{кин}} (1 + \zeta^2)^2 + (E_1 + m_1 c^2) - 2(1 + \zeta^2) \sqrt{(E_1 + m_1 c^2) E_{\text{кин}}} \cos \theta. \quad (2.8)$$

Решая уравнение (2.8), аналогично нерелятивистскому случаю находим:

$$E_{\text{кин}} = \frac{E_1 + m_1 c^2}{(1 + \zeta^2)^2} \left(\cos \theta + \sqrt{\gamma - \sin^2 \theta} \right). \quad (2.9)$$

В формуле (2.9) обозначено:

$$\gamma = \frac{2m_2 c^2 \zeta^2}{E_1 + m_1 c^2} = \frac{2m_2 \zeta^2}{m_1 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} + 1 \right)}. \quad (2.10)$$

В (2.10) использовано известное соотношение специальной теории относительности

$$E_1 = \frac{m_1 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Величина ζ^2 преобразуется к следующему виду:

$$\zeta^2 = \frac{E_2}{E_{\text{кин}}} = \frac{E_2}{E_1 - m_1 c^2} = \frac{E_2}{m_1 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)}. \quad (2.11)$$

Принимая, как и в нерелятивистском случае,

$$E_2 = A_{\text{вых}} = \frac{m_1 e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} = \frac{m_1 c^2 \alpha^2 Z^2}{2 n^2},$$

находим:

$$\zeta^2 = \frac{\alpha^2 Z^2}{2 n^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)}. \quad (2.12)$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{m_2}{m_1} \frac{\alpha^2 Z^2}{n^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)} \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} + 1 \right)} = \\ &= \frac{m_2}{m_1} \frac{\alpha^2 Z^2}{n^2} \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

При $\beta^2 \ll 1$ формулы (2.9) и (2.13) переходит в свой нерелятивистский аналог (1.15). Максимально возможная скорость, которую может получить электрон при внутреннем фотоэффекте на водороде, определяется условием $\gamma \geq 1$. С учетом (2.13), при $Z = n = 1$, находим

$$\alpha^2 \frac{m_2}{m_1} \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} \geq 1.$$

Откуда следует $\beta = V / c \leq 0,298$, что практически равно значению величины β в нерелятивистском случае.

В заключение данного раздела можно отметить, что угловое распределение вылетающих при релятивистском фотоэффекте электронов (2.9) по своей форме полностью повторяет нерелятивистское распределение (1.15) (рис. 3).

3. Угловое распределение

электронов при Комптон-эффекте

Рассмотрим возникновение электрического тока в вакуумном фотоэлементе, в случае если поток электромагнитной энергии направлен на очень тонкий металлический катод со стороны, противоположной аноду (рис. 4). В этом случае в создании фототока играют роль и электроны, вылетевшие из катода, которые получают при взаимодействии кванта света со свободным электроном, т.е. в явлении Комптон-эффекта.

Рассмотрим это явление более подробно, (рис. 5) [2]. Законы сохранения энергии и импульса запишем в виде:

$$m_0 c^2 + E = E_1 + E_2, \quad (3.1)$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2, \quad (3.2)$$

где E и $\vec{p}$ – энергия и импульс фотона, падающего на свободный, покоящийся электрон;

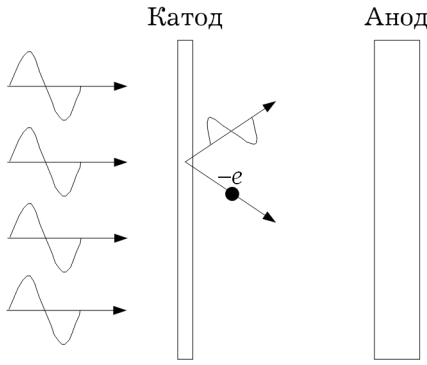


Рис. 4. Схема фотоэлемента с обратным облучением катода

E_1 , $\vec{p}_1$ и m_0 – энергия, импульс и масса покоя электрона после его взаимодействия с фотоном; E_2 и $\vec{p}_2$ – энергия и импульс вторичного фотона, возникающего в результате взаимодействия первичного фотона с электроном.

Для анализа системы уравнений (3.1) и (3.2) удобно ввести кинетическую энергию электрона $E_{\text{кин}}$ после его взаимодействия с фотоном, так что:

$$E_1 = m_0 c^2 + E_{\text{кин}}. \quad (3.3)$$

Тогда уравнение (3.1) преобразуется к виду:

$$E = E_{\text{кин}} + E_2. \quad (3.4)$$

Используя уравнение (3.2) и рис. 5, находим:

$$p_1^2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{c}\right)^2 - 2 \frac{EE_2}{c^2} \cos \varphi, \quad (3.5)$$

где учтено, что для фотонов $E = pc$ и $E_2 = p_2 c$. В данном случае угол φ это угол между падающим и излученным фотонами.

Воспользуемся известным соотношением для релятивистских частиц:

$$E_1^2 = p_1^2 c^2 + m_0^2 c^4. \quad (3.6)$$

Учитывая (3.3), из (3.6) получаем:

$$E_{\text{кин}}^2 + 2E_{\text{кин}} m_0 c^2 = p_1^2 c^2. \quad (3.7)$$

Подставляя (3.7) в (3.5), находим:

$$E_{\text{кин}}^2 + 2E_{\text{кин}} m_0 c^2 = E^2 + E_2^2 - 2EE_2 \cos \theta. \quad (3.8)$$

Исключая величину $E_{\text{кин}}$ в системе (3.4), (3.8), получаем:

$$E_2 = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \varphi)}. \quad (3.9)$$

Используя (3.4) и (3.9), найдем кинетическую энергию электрона после его взаимодействия с фотоном:

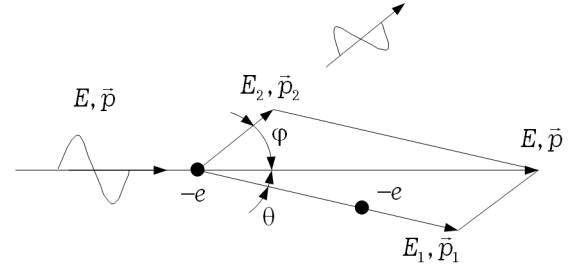


Рис. 5. Направление векторов импульсов частиц при Комптон-эффекте

$$E_{\text{кин}} = E - E_2 = \frac{\frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \varphi)}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \varphi)} E. \quad (3.10)$$

Преобразуем выражение (3.10), введя постоянную величину, называемую комптоновской длиной волны $\Lambda = h / (m_0 c) = 2,426 \cdot 10^{-3}$ нм. Учитывая, что

$$E / (m_0 c^2) = h / \lambda m_0 c = \Lambda / \lambda,$$

где λ – длина волны кванта, взаимодействующего с электроном, находим:

$$E_{\text{кин}} = \frac{\Lambda (1 - \cos \varphi)}{\lambda + \Lambda (1 - \cos \varphi)} E. \quad (3.11)$$

Такая же формула получена, например, в [2]. Найдем зависимость кинетической энергии электрона от угла его рассеяния θ . Исходя из рис. 5, можно записать:

$$p = p_1 \cos \theta + p_2 \cos \varphi. \quad (3.12)$$

Умножая обе части равенства (3.12) на скорость света c , с учетом (3.4), находим:

$$E = E_2 + E_{\text{кин}} = p_1 c \cos \theta + E_2 \cos \varphi. \quad (3.13)$$

Следовательно:

$$1 - \cos \varphi = \frac{p_1 c \cos \theta - E_{\text{кин}}}{E_2}. \quad (3.14)$$

Подставив (3.14) в (3.11), найдем квадратное уравнение относительно $E_{\text{кин}}$:

$$(\lambda + \Lambda) E_{\text{кин}}^2 - [(\lambda + \Lambda) E + \Lambda p_1 c \cos \theta] E_{\text{кин}} + \Lambda p_1 c E \cos \theta = 0. \quad (3.15)$$

Решениями уравнения (3.15) являются соотношения:

$$E_{\text{кин}}^{(1)} = E, \quad (3.16)$$

$$E_{\text{кин}}^{(2)} = \frac{\Lambda p_1 c \cos \theta}{\lambda + \Lambda}, \quad (3.17)$$

Учитывая, что $E_{\text{кин}} = p_1 V / 2$, где V – скорость электрона, из формулы (3.17) можно найти скорость электрона:

$$V = \frac{2 \Lambda c \cos \theta}{\lambda + \Lambda}, \quad (3.18)$$

а также кинетическую энергию электрона. Для относительно небольших скоростей электронов

имеем:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_0 V^2}{2} = \frac{2\Lambda^2 m_0 c^2 \cos^2 \theta}{(\lambda + \Lambda)^2}. \quad (3.19)$$

Полученные решения (3.16) и (3.17), а также следующая из (3.17) формула (3.19), требуют некоторого обсуждения. Угловое распределение вылетевших при Комpton-эффекте электронов в относительных единицах, построенное по формуле (3.19), показано на рис. 6. Сравнивая формулы (1.15) и (3.19), можно отметить их сходство при $\theta \rightarrow 0$. При этом роль отношения λ / Λ в формуле (3.19) играет величина ζ^2 в формуле (1.15).

Принято считать, что явление фотоэффекта представляет собой яркий случай проявления квантовой природы света. Действительно, квант света как обычная частица выбивает электрон из атома, на что расходуется часть его энергии. Другая часть энергии расходуется на придание электрону некоторой кинетической энергии. Эти два эффекта отражены формулой Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}, \quad (3.20)$$

где ν – частота падающего на атом кванта, m – масса электрона.

Но с «точки зрения электрона», как субъекта процесса, квант света при взаимодействии с ним ведет себя в большей степени как электромагнитная волна. Почти весь импульс кванта отдается ядру, а сам электрон получает только его незначительную часть. Т.е., для электрона у кванта импульс фактически отсутствует, как это имеет место при взаимодействии с волной. Большое воздействие на направление траектории вылетающего из атома электрона при его небольших скоростях оказывает вектор электрического поля кванта как электромагнитной волны. Поэтому при малых скоростях электрон вылетает, как уже ранее указывалось, равномерно во всех направлениях (рис. 3).

Совсем иная ситуация возникает при взаимодействии кванта света со свободным электроном. С «точки зрения электрона» квант света ведет себя именно как частица. На это указывают решения (3.16) и (3.17). Решение (3.16) могло бы быть справедливым, если бы квант света, как легкая частица, полностью передал бы свой импульс и энергию электрону [2]. При этом квант должен остановиться, т.е. исчезнуть. Возможно ли такое явление, и при каких условиях, до настоящего времени не исследовалось. Хотя исчез-



Рис. 6. Угловое распределение электронов при Комpton-эффекте

новение кванта при взаимодействии с электроном процесс широко распространенный, например, при возбуждении атома квантом и переходе электрона на более высокий энергетический уровень. Отражением процесса исчезновения кванта является формула Бора $h\nu = W_2 - W_1$. В данном случае W_1 и W_2 – энергии электронов на атомных энергетических уровнях.

Формула (3.17) отражает поведение кванта с «точки зрения электрона» в основном как частицы, хотя этот процесс принято называть некогерентным рассеянием. Электрон, получая значительную часть импульса $\vec{p}_1$ первичного фотона $\vec{p}$ (остальная часть импульса $\vec{p}_2$ уносится вторичным фотоном), рассеивается в основном вперед по закону (3.19) (рис. 6.) Вбок относительно направления движения первичного фотона, т.е. при $\theta = \pi/2$, поток электронов равен нулю. Это явление сходно с фотоэффектом при больших скоростях фотоэлектронов, и отличается от фотоэффекта при малых скоростях.

Можно отметить еще один момент. Использование формулы углового распределения электронов (1.2) для фотоэффекта фактически означает, как уже отмечалось ранее, что при взаимодействии электромагнитного излучения и электрона мы рассматриваем электромагнитное излучение как волну, силовое воздействие которой на электрон направлено в основном перпендикулярно направлению волны. В этом случае вылет электронов в направлении волны принципиально отсутствует (рис. 2). Способ учета уравнения сохранения импульса (1.4) в [2, 3] представляет собой попытку учесть корпускулярные свойства электромагнитного излучения. Но это не изменяет основного вывода: под углом $\theta = 0$ вылет электронов отсутствует. Решение системы

(1.3), (1.4) в настоящей работе для взаимодействия кванта света и электрона при фотоэффекте означает, что мы в основном учитываем корпускулярные свойства кванта света. Угловое распределение вылетающих электронов, (рис. 3), принципиально отличается от углового распределения, показанного на рис. 2. Максимальная вероятность вылета наблюдается вдоль траектории кванта, т.е. при $\theta = 0$.

Какие свойства кванта проявятся при угловом распределении фотоэлектронов в процессе фотоэффекта, волновые или корпускулярные, в настоящее время может ответить только эксперимент. Последовательная теория, которая учитывала бы дуалистические свойства кванта, аналогичная хорошо разработанной теории учитывающей дуалистические свойства электрона, в настоящий момент отсутствует. Замечание [4], что роль уравнения Шредингера для фотона играют уравнения Максвелла, вряд ли можно считать серьезной предпосылкой подобной теории. Это мнение нарушает физическую логику. Действительно, уравнение Шредингера, имеющее волновую природу, описывает волновые свойства электрона, который в своей основе является частицей вещества. Корпускулярные свойства фотона, который, в своей основе, является элементом электромагнитного поля, не могут описывать волновые уравнения Максвелла. Уравнения, описывающие корпускулярные свойства фотона, возможно, должны следовать из второго закона Ньютона. Более того, при рассмотрении волновых свойств электрона теряется координата его местоположения, в то время как рассмотрение корпускулярных свойств фотона должно привести к появлению его пространственной координаты. Поэтому уравнение, описывающее корпускулярные свойства кванта, по-видимому, не должно иметь операторный характер.

Данное затруднение связано с недостаточностью квантовой электродинамики. Например, энергия квантового осциллятора не исчезает на самом низшем энергетическом уровне. Отождествление фотона с квантовым осциллятором приводит к необходимости введения энергии вакуума, зависящей от частоты фотона. Эта зависимость остается и при отсутствии фотона, что совершенно абсурдно, либо энергия вакуума оказывается бесконечной [7]. Но рассмотрение различных аспектов затруднений квантовой электродинамики и, как следствие, дуализма

природы кванта не является целью данной статьи.

Длина свободного пробега электрона в металле $L \approx (200 \div 250)a$, где a – период кристаллической решетки металла [2]. Все периоды решеток металлов составляют примерно $0,7 \div 0,8$ нм. Поэтому длина пробега электрона в металле $L = 140 \div 200$ нм. По-видимому, оптимальная толщина напыления катода в фотоэлементе на стекло при его обратном облучении световым потоком лежит в районе 1 мкм.

Электрон, получивший определенную кинетическую энергию в результате взаимодействия с фотоном, может вылететь из катода. Красная граница вылета электрона из катода определяется с помощью формулы (3.19) при $\theta = 0$ из условия:

$$E_{\text{кин}} \geq A_{\text{вых}}; \quad \frac{2\Lambda^2 m_0 c^2}{(\lambda_{\text{к}} + \Lambda)^2} \geq A_{\text{вых}}, \quad (3.21)$$

где $\lambda_{\text{к}}$ – максимальная длина волны, вызывающая вылет электрона из катода, $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона с поверхности металла, т.е. работа выхода при внешнем фотоэффекте.

Следовательно:

$$\lambda_{\text{к}} \leq \Lambda \left(\sqrt{\frac{2m_0 c^2}{A_{\text{вых}}}} - 1 \right). \quad (3.22)$$

Например, для цинка [6] работа выхода $A_{\text{вых}} \approx 5,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Следовательно, красная граница внешнего фотоэффекта на свободных электронах $\lambda_{\text{к}} \leq 1,312$ нм, т.е. лежит в рентгеновском диапазоне.

Литература

1. Скворцов А.В., Волобуев А.Н., Скворцова Д.А. Фотоэлемент. Патент на полезную модель №59325 от 10 декабря 2006 г.
2. В.Г. Левич. Курс теоретической физики. – Т. 1. – С. 246, 248, 249; Т. 2. – С. 439, 442, 661, 706. – М.: Физматгиз, 1962.
3. А.С. Давыдов Квантовая механика. – М.: Физматгиз, 1963. – С. 366.
4. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика. – Т. 4., М.: Наука, 1989. – С. 26, 249.
5. Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – С. 457, 578.
6. Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1980. – С. 173.
7. Р. Фейнман, А. Хибс. Квантовая механика и интегралы по траекториям // Пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – С. 265.

Angular Distribution of Energy Electrons at Their Interaction with Photons

A.N. Volobuev, A.V. Skvortsov

The phenomenon of an internal photoeffect for not relativistic and relativistic cases, and also Compton-effect on free electrons with reference to the circuit of a photo cell with a return irradiation of the cathode is considered. Angular distribution of photoelectrons for these phenomena is specified. The formula of work of an output for Compton free electrons is found.



Волобуев Андрей Николаевич, 1947 г. рождения, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской и биологической физики Самарского государственного медицинского университета. Член Европейского физического общества, Нью-Йоркской академии наук, Американского, Немецкого и Всемирного обществ по нейронауке и т.д. Председатель Самарского отделения Физического общества Российской федерации. Автор более 270 научных работ и изобретений, в том числе 2 монографии, 3 учебных пособия. Область научных интересов: волновые процессы в биофизике, нелинейная радиофизика.



Скворцов Александр Владимирович, 1947 года рождения, к.т.н., профессор кафедры «Технология автоматизированного производства» Московского государственного открытого университета. Научный руководитель компьютерного центра СALS. Публикации: 2 монографии, 114 статей, 15 патентов. Научные интересы: компьютерные информационные технологии и нанотехнологии.