

## 1. КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ФОТОНОВ

Закон сохранения импульса:  $\vec{p}_1 = \vec{p}_2 + \vec{p}_3$ ,

Закон сохранения энергии:  $E_1 = E_2 + E_3$ ,

где  $\vec{p}_1$  и  $\vec{p}_2$ ,  $E_1$  и  $E_2$  – импульсы и энергии фотона соответственно до и после рассеяния,  $\vec{p}_3$  и  $E_3$  – импульс и кинетическая энергия электрона после рассеяния.

Изменение длины волны  $\lambda$  фотона при комптоновском рассеянии:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\alpha).$$

где  $h$ - постоянная Планка,  $m$ - масса рассеивающей частицы,  $c$ - скорость света,  $\alpha$ - угол рассеяния.

1.1. Определить максимальное изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии 1) на свободных электронах, 2) на свободных протонах. Ответ: 4,9 пм, 2,6 фм.

1.2. Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на рассеивающее вещество. При этом длина волны излучения, рассеянного под углами  $60^\circ$  и  $120^\circ$ , отличаются друг от друга в 2 раза. Считая, что рассеяние происходит на свободных электронах, найти длину волны падающего излучения. Ответ: 1,2 пм.

1.3. Фотон с энергией 0,25 МэВ рассеялся на свободном электроном. Энергия рассеянного фотона равна 0,20 МэВ. Определить угол рассеяния. Ответ:  $59^\circ$ .

1.4. Какая доля энергии фотона при эффекте Комптона приходится на электрон отдачи если фотон претерпел рассеяние на угол  $180^\circ$ ? Энергия фотона до рассеяния 0,255 МэВ. Ответ: 0,5.

1.5. Фотон с энергией 0,4 МэВ рассеялся под углом  $90^\circ$  на свободном электроном. Определить энергию рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона отдачи. Ответ: 0,225 МэВ, 0,175 МэВ.

1.6. Рентгеновский фотон с энергией 30 кэВ упруго взаимодействует с покоящимся электроном. В результате электрон начинает двигаться со скоростью 20 Мм/с. Найдите угол рассеяния фотона. Ответ:  $71^\circ$ .

1.7. Фотон с энергией, равной энергии покоя электрона, был рассеян на угол  $180^\circ$ . Определить импульс рассеянного фотона. Ответ:  $9 \cdot 10^{-23}$  кг·м/с.

1.8. Фотон с длиной волны 6 пм рассеялся под прямым углом на покоившемся свободном электроне. Найти: 1) частоту рассеянного фотона, 2) кинетическую энергию электрона отдачи. Ответ:  $3,6 \cdot 10^{19}$  1/с; 0,06 МэВ.

1.9. Фотон с энергией 1 МэВ рассеялся на свободном покоившемся электроне. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, если в результате рассеяния длина волны фотона изменилась на 25%. Ответ: 0,2 МэВ.

1.10. Фотон с начальной энергией 100 кэВ после рассеяния на свободном электроне имеет длину волны 14,85 ПМ. Электрон отдачи движется под углом  $30^\circ$  к направлению первоначального распространения фотона. Во сколько раз отличаются импульсы фотона и электрона после рассеяния? Ответ: 2.

1.11. Угол рассеяния фотона равен  $90^\circ$ . Угол отдачи электрона равен  $30^\circ$ . Определить энергию падающего фотона. Ответ: 0,37 МэВ.

1.12. Фотон с импульсом  $p_1 = 5,44 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с рассеялся на свободном покоившемся электроне, в результате чего его импульс стал равен  $p_2 = 1,36 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с. Под каким углом рассеялся фотон? Какую кинетическую энергию получил при этом электрон? Ответ:  $117^\circ$ ; 0,77 МэВ.

1.13. В результате упругого рассеяния  $\gamma$ -кванта на свободном электроне первоначальная энергия фотона 0,1 МэВ уменьшилась на 16,3 кэВ. При этом оказалось что импульс электрона отдачи в 2 раза больше импульса рассеянного фотона. В каком направлении движется электрон? Ответ:  $30^\circ$ .

1.14. В явлении Комптона энергия падающего фотона распределилась поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен  $\pi/2$ . Найти энергию и импульс рассеянного фотона. Ответ: 0,26 МэВ;  $1,4 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с.

1.15. В результате комптоновского рассеяния  $\gamma$ -фотона на покоившемся свободном электроне энергия фотона изменилась от 414 кэВ до 248 кэВ, а электрон получил импульс  $3,94 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с. Под каким углом друг относительно друга движутся электрон и фотон после рассеяния? Ответ:  $140^\circ$ .

1.16. Фотон мягкого рентгеновского излучения с энергией 15 кэВ рассеялся на свободном электроне под углом  $90^\circ$  и изменил свою энергию на 0,43 кэВ. Под каким углом движется электрон отдачи? Рассеивающий электрон считать нерелятивистским. Ответ:  $44^\circ$ .

1.17. Излучение с длиной волны 17,8 нм рассеивается свободными электронами вещества. Наблюдается излучение, рассеянное под углом  $\pi/3$ . Определить угол между падающим фотоном и электроном отдачи. Ответ:  $65^\circ$ .

1.18. Фотон с энергией 0,28 МэВ в результате рассеяния на покоившемся свободном электроне уменьшил свою энергию до 133,7 кэВ. Найти импульс и направление распространения электрона отдачи. Ответ:  $2,2 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с.

1.19. После рассеяния  $\gamma$ -кванта на свободном электроне эти частицы движутся под углом  $140^\circ$  друг к другу. Длина волны фотона до и после рассеяния равна соответственно 3 и 5 нм. Определить импульс электрона отдачи. Ответ:  $4 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с.

1.20. Фотон рентгеновского излучения с длиной волны 21,4 нм в результате эффекта Комптона испытал рассеяние под углом  $90^\circ$  к первоначальному направлению. Какую часть своей энергии фотон передал электрону? В каком направлении полетит электрон? Ответ: 10,2%,  $42^\circ$ .

1.21. Длина волны рентгеновского фотона, имевшего первоначально энергию 200 кэВ, в результате упругого рассеяния на свободном электроне изменилась на 4 нм. В каком направлении начал двигаться электрон? Ответ:  $37,5^\circ$ .

## 2. ФОТОЭФФЕКТ

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$E = A + W_m,$$

где  $E$  – энергия фотона (по формуле Планка  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ , где

$h$ -постоянная Планка,  $c$ -скорость света,  $\nu$ ,  $\lambda$ - частота и длина волны света),

$W_m$  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов,

$A$ - работа выхода электрона из металла.

Металл	Cs	K	Li	Zn	Cu	W	Pt
A, эВ	1,89	2,15	2,39	3,74	4,47	4,50	5,3

2.1. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 275 нм. Найти: 1) работу выхода электрона из этого металла, 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из этого металла светом с длиной волн 180 нм, 3) максимальную кинетическую энергию этих электронов. Ответ: 4,52эВ;  $9,1 \cdot 10^5$  м/с; 2,38эВ.

2.2. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания электрона, если красная граница фотоэффекта 307 нм и максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов 1 эВ? Ответ: 0,8.

2.3. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла соответствует частоте  $1,03 \cdot 10^{15}$  1/с падающего света. Какая часть энергии фотона, вызывающего фотоэффект, расходуется на работу выхода, если максимальная скорость электронов, вырванных с поверхности металла, составляет 1 Мм/с? Ответ: 0,6.

2.4. Определить красную границу фотоэффекта для цинка и максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с его поверхности электромагнитным излучением с длиной волны 250 нм. Ответ: 332 нм;  $6,6 \cdot 10^5$  м/с.

2.5. Кванты света с энергией 4,9 эВ вырывают фотоэлектроны из вольфрама. Найти максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона. Ответ:  $3,4 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с.

2.6. Найти частоту света, вырывающего с поверхности металла электроны, полностью задерживающиеся обратным потенциалом 3В. Фотоэффект у этого металла начинается при частоте падающего света в  $6 \cdot 10^{14}$  1/с. Найти работу выхода электрона из этого металла. Ответ:  $13,2 \cdot 10^{14}$  1/с ; 2,48 эВ.

2.7. На поверхность лития падает монохроматический свет с длиной волны 304 нм. Чтобы прекратить фотоэмиссию электронов,

нужно приложить задерживающую разность потенциалов не менее 1,7 В. Определить работу выхода электронов из лития. Ответ: 2,39эВ.

2.8. Определить наименьший задерживающий потенциал, необходимый для прекращения эмиссии с поверхности фотокатода, если он освещается излучением с длиной волны 0,4 мкм, а красная граница для материала катода равна 0,67 мкм. Ответ: 1,24 В.

2.9. Для прекращения фотоэффекта, вызванного облучением ультрафиолетовым светом платиновой пластинки, нужна задерживающая разность потенциалов 3,7 В. Если платиновую пластинку заменить другой, то задерживающую разность потенциалов придется увеличить до 6 В. Определить работу выхода электронов с поверхности второй пластинки. Найти длину волны облучающего света. Ответ: 3 эВ ; 0,14 мкм.

2.10. Определить постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности некоторого металла светом с частотой  $2,2 \cdot 10^{15}$  1/с полностью задерживаются обратным потенциалом 6,6 В, а вырывающиеся светом с частотой  $4,6 \cdot 10^{15}$  1/с – потенциалом 16,5 В. Используя полученные данные найти работу выхода электронов из этого металла. Ответ:  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с; 4,2 эВ.

2.11. При фотоэффекте с платиновой поверхности величина задерживающего потенциала оказалась равной 0,8 В. Найти: 1)длину волны применяемого излучения, 2)максимальную длину волны, при которой еще возможен фотоэффект. Ответ: 0,204мкм; 0,234мкм.

2.12. Вакуумный фотоэлемент состоит из центрального катода (вольфрамовый шарик) и анода (посеребренная внутренняя поверхность колбы). Контактная разность потенциалов между электродами равна 0,6 В и ускоряет вылетающие фотоэлектроны. Если между электродами фотоэлемента приложить задерживающую разность потенциалов 1 В, то при какой предельной длине волны падающего на катод света начнется фотоэффект? Ответ: 0,254 мкм.

2.13. При поочередном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн 0,35мкм и 0,54 мкм обнаружили, что соответствующие максимумы скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в 2 раза. Найти работу выхода электронов с поверхности этого металла. Ответ: 1,9 эВ.

2.14. На литиевый катод фотоэлемента с площадью поверхности  $2 \text{ см}^2$  падают одновременно два монохроматических излучения с длинами волн 0,6 мкм и 0,5 мкм и с интенсивностями 0,2 Вт/см<sup>2</sup> и 0,3 Вт/см<sup>2</sup>. Считая, что фотоэлектрический выход составляет в среднем 0,02 фотоэлектрона на фотон, найти количество электронов, выходящих в секунду со всей поверхности катода в результате фотоэффекта. Ответ:  $3 \cdot 10^{16}$  1/с.

2.15. До какого максимального потенциала зарядится удаленный от других тел медный шарик при облучении его электромагнитным излучением с длиной волны 140 нм? Ответ: 4,4 В.

2.16. Уединенный цинковый шарик радиусом 1 см находится в вакууме и длительное время освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 0,25 мкм. Определить число недостающих электронов в объеме шарика. Ответ:  $8,5 \cdot 10^6$ .

2.17. На одну из двух медных пластин плоского конденсатора падает электромагнитное излучение с длиной волны 100 нм. Расстояние между пластинами 2 см. Какова напряженность электрического поля между пластинами в режиме электрического равновесия? Ответ: 400 В/м.

2.18. Плоский конденсатор состоит из двух медных пластин с площадью по 5 см<sup>2</sup>, расположенных близко друг к другу. Одна пластина освещается ультрафиолетовым излучением с интенсивностью 1 Вт/см<sup>2</sup> и частотой  $1,5 \cdot 10^{15}$  1/с. Между пластинами приложено напряжение, обеспечивающее протекание тока насыщения. Какова сила этого тока, если фотоэлектрический выход электронов составляет 0,01 фотоэлектрон на фотон? Каким станет ток между пластинами, если использовать излучение с длиной волны 0,3 мкм? Ответ: 8,1 мА.

2.19. Катод вакуумного фотоэлемента покрыт литием. На него падает световое излучение, которое включает в себя все видимые волны с длинами от 0,4 до 0,7 мкм. Между катодом и анодом фотоэлемента установлена ускоряющая разность потенциалов 1,2 В. В каком числовом диапазоне лежат скорости электронов, падающих на анод? Ответ:  $(6,5 \div 8,2) \cdot 10^5$  м/с.

2.20. На металлический шарик диаметром 1 см, находящийся в вакууме, падает монохроматическое излучение с частотой  $2 \cdot 10^{15}$  1/с. Установившийся равновесный заряд шарика 2,1 пКл. Из какого металла сделан шарик? Ответ: W.