

Министерство образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

ФИЗИКА

Часть 2

Методические указания и задания для контрольной
работы № 4

Под редакцией А.С. Тайлашева

Томск 2011

Физика. Часть 2: методические указания и задания
для контрольной работы № 4 / Сост. Ю.А. Грибов,
Е.Е.Дерюгин, Е.Л.Никоненко, В.П.Пашко,
А.С.Тайлашев, Л.И.Тришкина; под ред.
А.С.Тайлашева. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-
строит. ун-та, 2011. – с.

Рецензент профессор А.А.Клопотов
Редактор Е.Ю. Глотова

Методические указания и задачи к контрольной работе
№ 4 по дисциплине ЕН. Ф.3 «Физика» для студентов всех
специальностей заочной формы обучения.

Печатются по решению методического семинара ка-
федры физики № 2 от 15.09.2010 г.

с 01.11.11
до 01.11.16

Подписано в печать
Формат 60×84. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. . Тираж 1000 экз. Заказ №

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.

ВВЕДЕНИЕ

Волновая оптика

Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников.

Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распределение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на одной щели и дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа-Брэгга. Принцип голографии. Исследования структуры кристаллов. Оптически неоднородная среда. Дисперсия света. Области нормальной и аномальной дисперсии. Электронная теория дисперсии света. Эффект Доплера. Излучение Вавилова-Черенкова. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Поляроиды и поляризационные призмы. Закон Малюса.

Квантовая природа излучения

Тепловое излучение. Черное тело. Закон Кирхгофа. Закон Стефана-Больцмана. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Квантовая гипотеза и формула Планка. Оптическая пирометрия. Внешний фотоэффект и его законы. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Давление света. опыты Лебедева. Квантовое и волновое объяснения давления света. Эффект Комптона и его теория. Диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

Элементы атомной физики и квантовой механики

Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма свойств вещества. Формула де Бройля. Соотношение неопределенностей как проявление корпускулярно-волнового дуализма свойств материи. Волновая функция и ее статический смысл. Ограниченность механического детерминизма. Принцип причинности в квантовой механике. Стационарные состояния. Уравнение Шредингера для стационарных состояний. Свободная частица. Туннельный эффект. Частица в одномерной прямоугольной «потенциальной яме». Квантование энергии и импульса частицы. Понятие о линейном гармоническом осцилляторе. Атом водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Понятие об энергетических уровнях молекул. Спектры атомов и молекул. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения. Понятие о лазере.

Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Работы Иваненко и Гейзенберга. Нуклоны. Взаимодействие нуклонов и понятие о свойствах и природе ядерных сил. Дефект массы и энергия связи ядра. Закономерности и происхождение альфа-, бета- и гамма-излучения ядер. Цепная реакция деления. Понятие о ядерной энергетике. Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций. Элементарные частицы. Их классификация и взаимная превращаемость. Четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные. Понятие об основных проблемах современной физики и астрофизики.

Вариант	Номера задач				
0	410	420	430	440	450
1	411	421	431	441	451
2	412	422	432	442	452
3	413	423	433	443	453
4	414	424	434	444	454
5	415	425	435	445	455
6	416	426	436	446	456
7	417	427	437	447	457
8	418	428	438	448	458
9	419	429	439	449	459

1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

1. Абсолютный показатель преломления среды:

$$n = \frac{c}{v},$$

где c – скорость света в вакууме, v – скорость света в среде.

2. Оптический ход световой волны:

$$L = n \cdot \ell,$$

где ℓ – геометрическая длина пути световой волны.

3. Оптическая разность хода двух световых волн:

$$\Delta = n_1 \ell_1 - n_2 \ell_2.$$

4. Соотношение между разностью фаз ($\Delta\varphi$) и оптической разностью хода двух световых волн:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right),$$

где λ – длина волны.

5. Условие максимального усиления интенсивности света при интерференции двух волн:

$$\Delta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

6. Условие минимальной интенсивности света при интерференции двух волн:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

7. Результат интерференции света в тонких плоско-параллельных пленках (в проходящем свете) определяется формулами:

усиление света

$$2dn \cdot \cos\beta = 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

или

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

ослабление света

$$2dn \cdot \cos\beta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

или

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m + 0, 1, 2, \dots),$$

где m – толщина пленки, n – показатель преломления, α – угол падения, β – угол преломления, λ – длина волны света.

8. Положения максимумов интенсивности света при дифракции от щели, на которую нормально падает пучок параллельных лучей, определяется из условия:

$$a \sin \varphi = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m + 0, 1, 2, \dots),$$

где a – ширина щели, φ – дифракционный угол, m – порядок дифракционного максимума, λ – длина волны света.

9. Положения минимумов интенсивности света при дифракции от щели определяется их условия:

$$a \sin \varphi = \pm m\lambda \quad (m + 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

10. Положения максимумов интенсивности света при дифракции от дифракционной решетки, на которую нормально падает пучок параллельных лучей, определяется из условия:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m\lambda \quad (m + 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

где d – период (или постоянная) дифракционной решетки, φ – дифракционный угол, m – порядок дифракционного максимума, λ – длина волны света.

11. Положения минимумов интенсивности при дифракции от дифракционной решетки при нормальном падении пучка параллельных лучей света определяется их условия:

$$d \cdot \sin \varphi = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m + 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

где d – период дифракционной решетки, φ – дифракционный угол, m – порядок дифракционного минимума, λ – длина волны света.

Пример 1. На тонкую пленку с показателем преломления $n = 1,33$ падает пучок белого света. Угол падения $\alpha = 52^\circ$. При какой толщине пленки отраженный свет будет окрашен в желтый свет?

Дано:

$n = 1,33$

$\alpha = 52^\circ$

$\lambda = 0,60$ мкм

$d = ?$

Решение

При падении света на пленку он частично отражается от верхней поверхности пленки, частично на ней преломляется. Преломленный луч частично отражается от нижней поверхности пленки, вновь проходит сквозь пленку и испытывает преломление на верхней поверхности

пленки. Возникают два параллельных луча света, отраженных от поверхностей пленки. Эти лучи когерентны. Они приобретают разность хода

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}.$$

При отражении световой волны от оптической более плотной среды (с большим показателем преломления) фаза волны меняется на π . Говорят, что «теряется» полволны $\lambda/2$. С учетом потери полуволны разность хода

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \lambda/2.$$

Условие интерференционного максимума:

$$\Delta = 2m\frac{\lambda}{2} = m\lambda,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$.

Отсюда:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2} = 2m\frac{\lambda}{2},$$

или

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}.$$

$$d = (2m+1)\lambda / 4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}.$$

Проведем расчет:

$$\begin{aligned} d &= (2m+1) \cdot 0,60 \text{ мкм} / 4\sqrt{1,33^2 - \sin^2 52^\circ} = \\ &= (2m+1)0,14 \text{ мкм} \end{aligned}$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$.

Ответ: $d = (2m+1)0,14$ мкм, где $m = 0, 1, 2, \dots$.

Пример 2. Найти наибольший порядок m спектра для желтой линии натрия ($\lambda = 589$ нм), если постоянная дифракционной решетки $d = 2$ мкм.

Дано:	Решение
$\lambda = 589$ нм $d = 2$ мкм	Условие дифракционного максимума от решетки: $d \sin \varphi = m\lambda$, где $m = 0, 1, 2, \dots$ - порядок дифракционного максимума. Находим: $\sin \varphi = \frac{m\lambda}{d}.$
$m - ?$	

Так как $\sin \varphi \leq 1$, то

$$\frac{m\lambda}{d} \leq 1.$$

Отсюда:

$$m \leq \frac{d}{\lambda}.$$

Проведем вычисления:

$$m \leq \frac{2 \text{ мкм}}{0,589 \text{ мкм}} = 3,39.$$

Так как m – целое число, то $m = 3$.

Ответ: $m = 3$.

Задачи

410. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить толщину d_{\min} пленки, если показатель преломления материала пленки $n = 1,4$. [0,09 мкм]

411. На мыльную пленку падает белый свет под углом $\alpha = 45^\circ$ к поверхности пленки. При какой наименьшей толщине d пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый свет ($\lambda = 600$ нм)? Показатель преломления мыльной воды $n = 1,33$. [0,13 мкм]

412. На стеклянную пластину с показателем преломления $n = 1,5$ нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления $n_1 = 1,3$. Пластина освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны $\lambda = 640$ нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину d_{\min} должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость? [0,12 мкм]

413. Определите минимальную толщину просветляющей пленки, наносимой на стекло, в области длины волны $\lambda_0 = 550$ нм. Свет падает на стекло нормально, показатель преломления материала пленки $n_1 = 1,22$, стекла - $n = 1,5$. [0,11 мкм]

414. Чему равна толщина оптического покрытия на стекле MgF_2 ($n = 1,38$), предназначенного для гашения отраженного света в окрестности длин волн 550 нм при нормальном падении света на стекло с $n = 1,50$? [0,10 мкм]

415. На щель шириной $a = 0,1$ мм нормально падает монохроматический пучок света с длиной волны

0,7 мкм. Определить угол отклонения лучей (дифракционный угол φ), дающий первый дифракционный максимум. [36°]

416. На непрозрачную пластинку с узкой щелью шириной $a = 0,1$ мм нормально падает луч света с длиной волны $\lambda = 0,7$ мкм. Сколько зон Френеля (z) «укладывается» в щели для дифракционного угла $\varphi = 1^\circ$. [5]

417. Пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 0,76$ мкм падает нормально на узкую щель, давая первый дифракционный минимум под углом $\varphi = 14^\circ 30'$. Определить ширину щели. [3 мкм]

418. На дифракционную решетку нормально падает пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Решетка имеет 200 штрихов на миллиметр. Определить число дифракционных максимумов, возникающих в этом случае. [17]

419. Сколько штрихов на сантиметр имеет дифракционная решетка, если максимум четвертого порядка при нормальном падении пучка света с длиной волны $\lambda = 0,65$ мкм, наблюдается под углом $\varphi = 6^\circ$. [400 см^{-1}]

2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Основные формулы

1. Закон Брюстера: отраженный от границы раздела двух диэлектриков естественный свет полностью поляризован, если

$$\text{tg} \alpha_A = n_{21}.$$

Здесь: α_B – угол падения луча света, удовлетворяющий закону Брюстера, называется углом Брюстера;

n_{21} – относительный показатель преломления, $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$.

2. Закон Малюса: интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор,

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где I_0 – интенсивность света, прошедшего через поляризатор, φ – угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

3. Угол ϑ поворота плоскости поляризации поляризованного света, прошедшего через слой оптически активного вещества толщиной ℓ , выражается соотношениями:

$$\vartheta = \alpha \ell C \text{ (для растворов),}$$

$$\vartheta = \alpha^* \ell \text{ (для кристаллов),}$$

где α и α^* – удельные вращения соответственно для растворов и кристаллов; C – концентрация раствора (масса оптически активного вещества в единице объема раствора).

Пример 1. Определить скорость света v в алмазе, если угол полной поляризации при отражении света от поверхности алмаза $67^\circ 30'$.

Решение

По закону Брюстера

$$\operatorname{tg} \alpha_A = n_{21}.$$

где α_B – угол Брюстера, n_{21} – показатель преломления алмаза относительно воздуха, с большой точностью его

можно считать абсолютным показателем преломления для алмаза (относительно вакуума).

Показатель преломления показывает во сколько раз скорость света в среде (алмазе) больше чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v},$$

где c – скорость света в вакууме, v – скорость света в алмазе. Подставим в выражение закона Брюстера:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c}{v}.$$

Отсюда

$$v = \frac{c}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Проведем расчет:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с} / \operatorname{tg} 67^\circ 30'}{1} = 1,24 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v = 1,24 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$

Задачи

420. Найти угол α_B полной поляризации при отражении света от стекла, показатель преломления которого $n = 1,57$. [57,5°]

421. Под каким углом θ к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были наиболее полно поляризованы? Показатель преломления воды $n = 1,33$. [37°]

422. Определите угол α_B полной поляризации света, отраженного от алмаза, показатель преломления которого $n = 2,42$. [67,55°]

423. Найти показатель преломления n стекла, если отраженный от него луч света будет полностью поляризован при угле преломления $\beta = 30^\circ$. [1,73]

424. Интенсивность света после прохождения через поляризатор и анализатор уменьшилась в четыре раза. Найти угол ϕ между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если на поляризатор падал естественный свет. Поглощением света пренебречь. [45°]

425. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в 8 раз. Определить угол ϕ между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Поглощением света пренебречь. [$\phi = 60^\circ$]

426. Определить концентрацию сахарного раствора, если при прохождении света через кювету длиной $\ell = 0,2$ м с этим раствором плоскость поляризации света поворачивается на угол $\phi = 10^\circ$. Удельная вращательная способность сахара $[\alpha] = 1,17 \cdot 10^{-2}$ (рад·м²)/кг.

427. На кварцевую пластинку, вырезанную перпендикулярно оптической оси кристалла, падает поляризованный монохроматический свет. При толщине $d_1 = 2$ мм, она поворачивает плоскость поляризации света на

угол $\phi_1 = 30^\circ$. Определить толщину d_2 кварцевой пластинки, чтобы данный монохроматический свет гасился полностью. [6 мм]

428. Найти угол ϕ между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, проходящего через поляризатор и анализатор, уменьшается в 3 раза. Поглощением света пренебречь. [35,3°]

429. Зеленый луч света проходит через поляризатор и анализатор. Поляризатор и анализатор скрещены. В этой ситуации приходящий свет максимально ослаблен. Какой толщины пластинку из кварца надо поместить между поляризатором и анализатором, чтобы интенсивность проходящего света стала максимальной, если удельное вращение кварца для зеленого света равно 463 рад/м? [3,4 мм]

3. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Основные формулы

1. Тепловое излучение – это электромагнитное излучение тел, обусловленное тепловым движением электрических зарядов (электронов, ионов) входящих в состав тел.

Абсолютно черное тело – это тело, поглощающее все падающие на него электромагнитное излучение во всем интервале длин волн (или частот).

2. Закон Стефана-Больцмана. Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его температуры:

$$R = \sigma T^4.$$

Здесь R – энергетическая светимость, т.е. энергия, излучаемая в единицу времени с единичной поверхности тела; T – термодинамическая температура, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана. Если тело не абсолютно черное (серое), то

$$R' = k\sigma T^4,$$

где коэффициент серости k всегда меньше единицы.

3. Закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуры

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

4. Второй закон Вина: максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсо-

лютно черного тела пропорциональна пятой степени температуры

$$r_{\max} = b' T^5,$$

где $b' = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$.

Пример. Принимая Солнце за абсолютно черное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны 500нм, определить: 1) температуру поверхности Солнца; 2) энергию, излучаемую Солнцем в виде электромагнитных волн за 10 минут. Радиус Солнца – $6,95 \times 10^8 \text{ м}$.

Дано:	Решение:
$\lambda_{\max} = 500 \text{ нм} = 5 \times 10^{-7} \text{ м}$ $t = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$ $R_c = 6,95 \times 10^8 \text{ м}$	1) Используя закон смещения Вина $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$, найдем температуру поверхности Солнца:
$T - ?$ $W - ?$	$T = \frac{b}{\lambda_{\max}},$

где $b = 2,9 \times 10^{-3}$ – постоянная Вина.

2) Из определения спектральной плотности энергетической светимости (энергия, излучаемая с единицы площади поверхности тела в единицу времени):

$$R_e = \frac{1}{S} \frac{W}{t}$$

выразим $W = R_e S t$, S – площадь поверхности Солнца (сферы) равна $4\pi R^2$; R – радиус Солнца; R_e – энергетическая светимость абсолютно черного тела. По закону Стефана – Больцмана:

$$R_e = \sigma T^4,$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ – постоянная Стефана – Больцмана:

получим:

$$W = \sigma T^4 4\pi R^2 t.$$

Подставим в формулы числовые значения величин, выраженные в единицах СИ и, выполнив вычисления, получим:

$$T = 5,8 \cdot 10^3 \text{ К}, \\ W = 2,34 \cdot 10^{29} \text{ Дж}.$$

Ответ: $T = 5,8 \cdot 10^3 \text{ К}$, $W = 2,34 \cdot 10^{29} \text{ Дж}$.

Задачи

430. Определить, во сколько раз необходимо уменьшить термодинамическую температуру абсолютно черного тела, чтобы его энергетическая светимость R_e ослабилась в 16 раз. [в 2 раза].

431. Определить, во сколько раз изменится мощность излучения абсолютно черного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с $\lambda_1 = 720 \text{ нм}$ до $\lambda_2 = 400 \text{ нм}$.

432. Энергетическая светимость абсолютно черного тела $R_e = 10 \text{ кВт/м}^2$. Определить длину волны, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости этого тела. [4,47 мкм].

433. Абсолютно черное тело находится при температуре $T_1 = 3 \text{ К}$. При остывании тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на $\Delta\lambda = 8 \text{ мкм}$. Определите температуру T_2 , до которой тело охладилось. [323К].

434. Абсолютно черное тело нагрели от температуры $T_1 = 600 \text{ К}$ до $T_2 = 2400 \text{ К}$. Определить: 1) во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость; 2) как изменилась длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости. [в 256; уменьшилась на 3,62 мкм].

435. Считая никель абсолютно черным телом, определить мощность, необходимую для поддержания температуры расплавленного никеля $1453 \text{ }^\circ\text{C}$ неизменной, если площадь его поверхности равна $0,5 \text{ см}^2$. Потери энергии пренебречь. [25,2 Вт].

436. Мощность излучения абсолютно черного тела $P = 10 \text{ кВт}$. Найти площадь излучающей поверхности тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны $\lambda = 700 \text{ нм}$. [6 см²].

437. Какую энергетическую светимость R_e имеет абсолютно черное тело, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны $\lambda = 484 \text{ нм}$? [73,5 МВт/м²].

438. Какую мощность излучения P имеет Солнце? Излучение Солнца считать близким к излучению абсо-

лотно черного тела. Температура поверхности Солнца $T = 5800$ К. Радиус поверхности Солнца принять равным $7 \cdot 10^8$ м. $[3,9 \cdot 10^{26}$ Вт].

439. При нагревании абсолютно черного тела длина волны λ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от $\lambda_1 = 690$ нм до $\lambda_2 = 500$ нм. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость тела? [в 3,6 раза].

4. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Основные формулы

1. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A + T_{\max},$$

где $h\nu = \frac{h\tilde{\nu}}{\lambda} = \varepsilon$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; ν – частота света; λ – длина световой волны; c – скорость света в вакууме; A – работа выхода электрона из металла; T_{\max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона в двух случаях (нерелятивистском и релятивистском) выражается различными формулами:

а) если фотоэффект вызван фотоном, имеющим незначительную энергию ($\varepsilon \approx 5$ кэВ), то:

$$\dot{O}_{\max} = \frac{m_0 v_{\max}^2}{2},$$

где m_0 – масса покоя электрона;

б) если фотоэффект вызван фотоном, обладающим большой энергией ($\varepsilon \geq 5$ кэВ), то:

$$\dot{O}_{\max} = (m - m_0) \tilde{\nu}^2,$$

или

$$T_{\max} = m_0 \tilde{\nu}^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right);$$

где $\beta = \frac{v_{\max}}{\tilde{\nu}}$; m – масса релятивистского электрона.

3. Красная граница фотоэффекта:

$$\lambda_0 = \frac{h\tilde{\nu}}{A} \text{ или } \nu_0 = \frac{A}{h}, \text{ т.к. } \nu_0 = \frac{\tilde{\nu}}{\lambda_0},$$

где λ_0 – максимальная длина волны излучений; ν_0 – минимальная частота излучения, при которой ещё возможен фотоэффект.

4. Для обращения фототока в ноль необходимо приложить некоторое задерживающее напряжение U_3 . По величине тормозящей разности потенциалов U_3 , при которой фототок обращается в ноль, можно определить скорость самых быстрых фотоэлектронов:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3,$$

где m , e , v_{\max} – масса, заряд и максимальная скорость этих электронов.

Пример. Определить максимальную скорость v_{\max} и величину задерживающего потенциала фотоэлектронов, вырванных с поверхности серебра:

1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны $\lambda_1 = 0,155$ мкм;

2) γ излучением с длиной волны $\lambda_2 = 2,47$ пм.

Дано:	Решение:
$A = 4,7 \text{ эВ} = 4,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ $\lambda_1 = 0,155 \text{ мкм} = 1,55 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ $\lambda_2 = 2,47 \text{ пм} = 2,47 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ $C = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$	<p>Максимальную скорость фотоэлектронов определим из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:</p> $\varepsilon = A + T_{\text{max}}$ <p>Кинетическая энергия фотоэлектрона в зависимости от того, какая скорость ему сообщается, может быть выражена или по классической формуле:</p>
$v_{1\text{max}} - ? \quad v_{2\text{max}} - ?$	

$$T = \frac{mv^2}{2}.$$

1. Произведя вычисления для ультрафиолетового излучения, получим:

$$\varepsilon_1 = h\nu_1 = \frac{h\tilde{\nu}}{\lambda_1}; \quad \varepsilon_1 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{155 \cdot 10^{-9}} = 1,28 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

$$\varepsilon_1 = 8 \text{ эВ}.$$

Это значение энергии фотона меньше энергии покоя электрона ($\varepsilon_0 = 0,51 \text{ МэВ}$).

Следовательно, для данного случая $T_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$

и тогда уравнение фотоэффекта запишется:

$$\varepsilon_1 = A + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2};$$

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(\varepsilon_1 - A)}{m}};$$

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(8 - 4,7) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,1 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Величину задерживающего потенциала для данного случая определим из соотношения:

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_{\text{с}}, \text{ где } U_{\text{с}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2e}$$

$$U_{\text{с}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,1 \cdot 10^6}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,44 \text{ В}.$$

Ответ: $v_{1\text{max}} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м/с}; U_{13} = 3,44 \text{ В}.$

2. Вычислим максимальную скорость и величину задерживающего потенциала для фотоэлектронов, вырванных γ – излучением, для этого найдем энергию фотона γ – излучения:

$$\varepsilon_{2\text{max}} = h\nu_2 = h \frac{\tilde{\nu}}{\lambda_2};$$

$$\varepsilon_{2\text{max}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2,47 \cdot 10^{-9}} = 8,04 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 0,502 \text{ эВ}.$$

Так как в данном случае энергия фотона сравнима с энергией покоя электрона (0,51 МэВ), то для вычисления скорости электрона следует взять релятивистскую формулу его кинетической энергии:

$$\dot{O}_{2\max} = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right),$$

где $\dot{A}_0 = m_0 \dot{\hbar}^2$; $\dot{A}_0 = 0,512 \text{ Дж}$; $\beta = \frac{v_{2\max}}{\dot{\hbar}}$.

Определим $T_{2\max}$ из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта.

$$\varepsilon_2 = \dot{A} + \dot{O}_{2\max} \text{ или } T_{2\max} = \varepsilon_2 - A$$

$$\dot{O}_{2\max} = 0,502 \cdot 10^6 - 4,7 \approx 0,502 \text{ (Дж)}.$$

Из формулы $\dot{O}_{2\max} = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$ найдем β :

$$\beta = \sqrt{\frac{(2E_0 + T_{2\max}) \cdot T_{2\max}}{E_0 + T_{2\max}}};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{(1,024 + 0,502) \cdot 0,502}{0,512 + 0,502}} = 0,755.$$

Зная, что $\beta = \frac{v_{2\max}}{\dot{\hbar}}$ определим $v_{2\max}$.

Ответ: $v_{2\max} = \beta \dot{\hbar} = 0,755 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} / \dot{\hbar} = 226 \text{ (м/с)}.$

Задачи

440. Определить максимальную скорость электронов (v_{\max}), вылетающих из цинка под действием γ – излучения с длиной волны 100 нм. Как изменится v_{\max} , если γ – излучение заменить ультрафиолетовыми лучами?

Работа выхода для цинка равна 4,0 эВ. [$1,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; v_{\max} – уменьшится].

441. При освещении фотокатода светом с длиной волны $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$, а затем с $\lambda_2 = 500 \text{ нм}$ обнаружено, что задерживающее напряжение, прекращающее фотоэффект, изменилось в 2 раза. Определить работу выхода электрона из материала фотокатода. Результат представьте в электрон-вольтах. [1,86 эВ].

442. Шар радиусом 1 см, несущий заряд $q = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$, облучается светом с длиной волны 331 нм. Определите, на какое расстояние удалится электрон, если работа выхода электрона с поверхности металла, из которого изготовлен шар, равна $2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. [0,255 мм].

443. Кванты света с энергией $\varepsilon = 4,93 \text{ Дж}$ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода, равной 4,5 эВ. Определите максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона. [$3,45 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$].

444. Определите постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности металла светом с частотой $2,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, полностью задерживаются разностью потенциалов 6,6 В, а вырывающиеся светом с частотой $4,6 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – разностью потенциалов 16,5 В. [$6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$].

445. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки (работа выхода 6,3 эВ) составляет 3,7 В. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определить работу выхода электронов из этой пластинки. [4,7 эВ].

446. Фотоны с энергией 5эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода $\hat{A} = 4,7 \text{ эВ}$. Определите максимальный импульс, передаваемый поверхности этого металла при вылете электрона. $[2,96 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$.

447. Найти задерживающую разность потенциалов для электронов, вырванных при освещении калия светом с длиной волны $\lambda = 330 \text{ нм}$. $[1,75 \text{ В}]$.

448. Вакуумный фотоэлемент состоит из центрального катода (вольфрамового шарика) и анода (внутренней поверхности посеребренной внутри колбы). Контактная разность потенциалов между электродами $U_0 = 0,6 \text{ В}$ ускоряет вылетающие электроны. Фотоэлемент освещается светом с длиной волны $\lambda = 230 \text{ нм}$. Какую задерживающую разность потенциалов U надо приложить? $[1,5 \text{ В}]$.

449. Поверхность серебряной пластинки освещается ультрафиолетовым светом ($\lambda = 300 \text{ нм}$). Работа выхода электронов из серебра 4,7 эВ. Будет ли иметь место фотоэффект? [Нет]

5. ДЕФЕКТ МАССЫ И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. СТРОЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР. РАДИОАКТИВНОСТЬ

Основные формулы

1. Дефект массы ядра определяется по формуле

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}},$$

где Δm – дефект массы атомного ядра; Z – зарядовое число (число протонов в ядре); A – массовое число (число нуклонов в ядре; m_n – масса нейтрона; m_p – масса протона; $m_{\text{я}}$ – масса ядра.

2. Энергия связи ядра определяется соотношением:

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m.$$

3. Удельная энергия связи – это энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$E_{\text{уд}} = E_{\text{св}}/A.$$

4. Символическая запись ядерной реакции

$$X + a \rightarrow Y + b \text{ или } X(\alpha, b)Y,$$

где X и Y – исходное и конечное ядра; α, b – исходная и конечная частицы в реакции. Для обозначения α и b приняты следующие символы: p – протон; n – нейтрон; d – дейтрон; α – альфа-частица; γ – гамма-фотон.

5. Энергия ядерной реакции (тепловой эффект):

$$Q = c^2 [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где m_1, m_2 – массы покоя ядра – мишени и бомбардирующей частицы; $(m_3 + m_4)$ – сумма масс покоя ядер и продуктов реакции.

6. Нейтральный атом и его ядро обозначаются одним и тем же символом A_ZX , где X – символ химического элемента; Z – зарядовое число (число протонов в ядре, равное числу электронов в электронной оболочке нейтрального атома); A – массовое число (число нуклонов в ядре).

7. Число нейтронов в ядре

$$(N = A - Z).$$

8. Радиус ядра

$$r = r_0 A^{1/3},$$

где r_o - коэффициент пропорциональности, который для всех ядер считается постоянным и равным $1,4 \cdot 10^{-15}$ м.

9. Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N – число нераспавшихся атомов в момент времени t ; N_0 – число нераспавшихся атомов в момент, принятый за начальный (при $t = 0$); e – основание натуральных логарифмов; λ – постоянная радиоактивного распада.

10. Период полураспада T – промежуток времени, за который число нераспавшихся атомов уменьшится в 2 раза. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением:

$$T = \ln 2 / \lambda$$

11. Среднее время жизни τ радиоактивного изотопа – промежуток времени, за который число нераспавшихся атомов уменьшится в e раз

$$\tau = 1/\lambda.$$

12. Число атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе,

$$N = m/\mu \cdot N_A,$$

где m – масса изотопа; μ – его молярная масса; N_A – постоянная Авогадро.

13. Активность α радиоактивного препарата

$$\alpha = -dN/dt = \lambda N \text{ или } \alpha = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

14. Активность радиоактивного препарата в начальный момент времени

$$\alpha_0 = \lambda N_0.$$

15. Активность радиоактивного препарата изменяется со временем по тому же закону, что и число нераспавшихся ядер:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\lambda t}.$$

16. Удельная активность – активность единицы массы радиоактивного вещества:

Пример 1. Определить дефект массы m и энергию связи $E_{св}$ ядра азота $^{14}N_7$. Масса нейтрального атома азота $m_N = 14,00307$ а.е.м.

Решение. Дефект массы ядра определим по формуле:

$$\Delta m = Z m_H + (A - Z) m_n - m_N \quad (1).$$

Вычисления дефекта массы выполним во внесистемных единицах (а.е.м). Для ядра азота $^{14}N_7$ $Z = 7$, $A = 14$. Масса нейтрального атома водорода $m_H = 1,00783$ а.е.м.

Подставив в (1) числовые значения и произведя вычисления, получим:

$$\Delta m = 7 \cdot 1,00783 + (14 - 7) 1,00783 - 14,00307 = 0,11243 \text{ а.е.м.}$$

Энергия связи ядра

$$E_{св} = c^2 \Delta m. \quad (2)$$

Энергия связи ядра также найдем во внесистемных единицах (МэВ). Для этого дефект массы Δm подставим в формулу (2) в а.е.м., а коэффициент пропорциональности C^2 - МэВ/ а.е.м. ($C^2 = 931,4$ МэВ/ а.е.м).

Тогда

$$E_{св} = 931,4 \cdot 0,11243 = 104,72 \text{ МэВ}$$

Ответ: $\Delta m = 0,11243$ а.е.м., $E_{св} = 104,72$ МэВ

с

$$\alpha_{уд} = \alpha/m.$$

Пример2.. Во сколько раз число распадов ядер радона ^{222}Rn в течение первых суток больше числа распадов в течение вторых суток? Период полураспада ^{222}Rn равен 3,8 суток.

Дано:	Решение:
$T = 3,8$ суток	Количество распадов ΔN_1 в течение первых суток $\Delta N_1 = N_0 - N_1$. Количество распадов ΔN_2 в течение вторых суток $\Delta N_2 = N_0 - N_2$.
$\Delta N_1/\Delta N_2$ -?	

Здесь N_0 и N_1 – количество ядер радона к началу первых и вторых суток соответственно; N_2 – количество ядер радона к исходу вторых суток. Согласно закону радиоактивного распада

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda t}, N_2 = N_1 e^{-\lambda t},$$

где t - время, равное продолжительности одних суток.

Тогда

$$N_1 = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0(1 - e^{-\lambda t}),$$

$$N_2 = N_0 e^{-\lambda t} - N_0 e^{-\lambda t} e^{-\lambda t} = N_0(1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda t}.$$

Отношение

$$\Delta N_1/\Delta N_2 = e^{\lambda t}.$$

Используя связь между постоянной радиоактивного распада λ и периодом полураспада T , последнее выражение можно представить в виде

$$\Delta N_1/\Delta N_2 = e^{\ln 2 t/T}.$$

Произведя вычисления:

$$\Delta N_1/\Delta N_2 = e^{\ln 2/3,8} = 1,2$$

Ответ: $\Delta N_1/\Delta N_2 = 1,2$.

Задачи

450. Определить энергию E , которая выделяется при образовании из протонов и нейтронов ядер гелия

$^4\text{He}_2$ массой $m = 1$ г. Масса нейтрального атома гелия $m_{\text{He}} = 4,0026$ а.е.м. [$4,26 \cdot 10^{24}$ МэВ].

451. Какую минимальную энергию надо затратить для отрыва одного протона от ядра бора $^{10}\text{B}_5$? Масса нейтрального атома бора $m_B = 10,01354$ а.е.м., масса нейтрального атома бериллия $^9\text{Be}_4$ $m_{\text{Be}} = 9,01219$ а.е.м., масса протона $m_p = 1,00728$ а.е.м., масса электрона $m_e = 0,00055$ а.е.м.. [$6,59$ МэВ].

452. Определить дефект массы Δm и энергию связи ядра $E_{\text{св}}$ ядра атома фтора $^{19}\text{F}_9$. Масса нейтрального атома фтора $m_F = 18,9984$ а.е.м. [$0,15877$ а.е.м.; $147,99$ МэВ].

453. Найти удельную энергию связи в ядрах $^4\text{He}_2$, $^{31}\text{Si}_{14}$. [$5,61$ МэВ; $8,47$ МэВ].

454. Найти энергию реакции $^6\text{Li}_3 + ^1\text{H}_1 \rightarrow ^4\text{He}_2 + ^3\text{He}_2$ [$4,03$ МэВ].

455. Сколько тепла выделится при образовании 1 г $^4\text{He}_2$ из дейтерия $^2\text{D}_1$? [$5,74 \cdot 10^7$ кДж].

456. За время, равное 33,2 суток, распалось 80% начального количества ядер радиоактивного изотопа. Определите его период полураспада. [$14,3$ суток].

457. Определить массу полония $^{210}\text{Po}_{84}$, активность которого $\alpha = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. [$0,22$ мкг].

458. Определите, какая масса радия, период полураспада которого $1,62 \cdot 10^{13}$ лет, распадается в течение суток из 1 г чистого препарата. [$1,17$ мкг].

459. Определите удельную активность плутония ^{239}Pu , период полураспада которого равен $2,4 \cdot 10^4$ лет. [$62,3$ мКи/г]

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И.Трофимова. – М.: Академия, 2008. -558с.
2. Волькенштейн В.С. Все решения к «Сборнику задач по общему курсу физики» в 2 кн. Кн. 2 /В.С.Волькенштейн. – М.: Изд-во АСТ, 1999. – 432 с.
3. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями / Т.И.Трофимова, З.Г.Павлова. – М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
4. Лисицына Л.А. Физика. Волновая и квантовая оптика: учебное пособие. Л.А.Лисицына, Н.О. Солоницина, А.А. Клопотов, Н.А. Конева.- Томск, ТГАСУ, 2002.-100 с.
5. Старенченко С.В. Физика. Элементы атомной и ядерной физики: учебное пособие /С.В. Старенченко, В.Б.Каширин, Ю.В.Соловьева, Н.А.Конева.- Томск, ТГАСУ, 2002.-106с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Волновая оптика. Интерференция света. Дифракция света.....	5
2. Поляризация света.....	12
3. Тепловое излучение.....	17
4. Фотоэлектрический эффект.....	21
5. Дефект массы и энергия связи ядра. Ядерные реакции. Строение атомных ядер. Радиоактивность.....	27
Рекомендуемая литература.....	33