Цель настоящих методических указаний – оказать помощь студентам заочного факультета Ленинградского кораблестроительного института в изучении курса общей физики.

Указания содержат основные формулы, примеры решения задач и контрольные задания по оптике, физике атома и атомного ядра, по физике твердого тела, а также некоторые справочные таблицы.

ПАНТОВ
Юрий Евгеньевич
ШВЕЦ
Галина Ивановна

Ф И З И К А

Часть 3

Методические указания к контрольной работе № 5 "Оптика" и контрольной работе № 6 "Физика атома и атомного ядра. Основы квантовой механики. Физика твердого тела"

Ответственный редактор
д-р физ.-мат.наук, проф.Б.С.Монозон
Литературный редактор Т.А.Канн

Зак.Р-173. Тир.1000. Уч.-изд.л.3. 12.12.1989.
Бесплатно. Тип.ЛКИ, Лоцманская, 10.

I. О П Т И К А

I.I. Основные формулы

Скорость света в среде:

$$v = c/n ,$$

где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны:

$$L = nl ,$$

где l – геометрическая длина пути световой волны в среде с показателем преломления n.

Оптическая разность хода двух световых волн:

$$\Delta = L_1 - L_2 .$$

Зависимость разности фаз от оптической разности хода световых волн:

$$\Delta\varphi = 2\pi(\Delta/\lambda),$$

где λ – длина световой волны.

Условие максимального усиления света при интерференции:

$$\Delta = \pm k\lambda \; (k = 0, 1, 2, \ldots).$$

Условие максимального ослабления света:

$$\Delta = \pm(2k+1)\lambda/2 .$$

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от тонкой пленки:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \lambda/2 ,$$

или

$$\Delta = 2dn\cos i_2 + \lambda/2 ,$$

где d -толщина пленки; n - показатель преломления пленки; i_1 - угол падения; i_2 - угол преломления света в пленке.

Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете:

$$r_k = \sqrt{(2k-1)R\lambda/2} \quad (k=1,2,3,\ldots),$$

где k - номер кольца; R - радиус кривизны.

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете:

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} .$$

Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции на одной щели, определяется из условия

$$a\sin\varphi = (2k+1)\lambda/2 \quad (k=0,1,2,3,\ldots),$$

где a - ширина щели; k - порядковый номер максимума.

Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции света на дифракционной решетке, определяется из условия

$$d\sin\varphi = \pm k\lambda \quad (k=0,1,2,3,\ldots),$$

где d - период дифракционной решетки.

Разрешающая способность дифракционной решетки:

$$R = \lambda/\Delta\lambda = kN ,$$

где $\Delta\lambda$ - наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda+\Delta\lambda$), при которой эти линии могут быть видны раздельно в спектре, полученном посредством данной решетки; N - полное число щелей решетки.

Формула Вульфа - Брэггов:

$$2d\sin\theta = k\lambda ,$$

где θ - угол скольжения (угол между направлением параллельного пучка рентгеновского излучения, падающего на кристалл, и атомной плоскостью в кристалле; d - расстояние между атомными плоскостями кристалла.

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_1 = n_{21} ,$$

где i_1 - угол падения, при котором отразившийся от диэлектрика луч полностью поляризован; n_{21} - относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Закон Малюса:

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

где I_0 - интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор; I - интенсивность этого света после анализатора; α - угол между направлением колебаний электрического вектора света, падающего на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора (если колебания электрического вектора падающего света совпадают с этой плоскостью, то анализатор пропускает данный свет без ослабления).

Угол поворота плоскости поляризации монохроматического света при прохождении через оптически активное вещество:

а) в твердых телах

$$\varphi = \alpha d ,$$

где α - постоянная вращения; d - длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;

б) в растворах

$$\varphi = [\alpha]\rho d ,$$

где $[\alpha]$ - удельное вращение; ρ - массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Релятивистская масса:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} , \quad \text{или} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} ,$$

где m_0 - масса покоя частицы; v - ее скорость; c - скорость света в вакууме; β - скорость частицы, выраженная в долях скорости света ($\beta = v/c$).

Взаимосвязь массы и энергии релятивистской частицы:

$$E = mc^2, \quad \text{или} \quad E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1-\beta^2}} ,$$

где $E_0 = m_0c^2$ - энергия покоя частицы.

Полная энергия свободной частицы:

$$E = E_0 + T ,$$

где T - кинетическая энергия релятивистской частицы.

Кинетическая энергия релятивистской частицы:

$$T = (m - m_0)c^2, \quad \text{или} \quad T = E_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right).$$

Импульс релятивистской частицы:

$$p = \frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} , \text{ или } p = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} m_0 c .$$

Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы:

$$E^2 = E_0^2 + (pc)^2 .$$

Закон Стефана - Больцмана:

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

где R_e - энергетическая светимость (излучательность) абсолютно черного тела; σ - постоянная Стефана - Больцмана; T - термодинамическая температура Кельвина.

Закон смещения Вина:

$$\lambda_m = b/T ,$$

где λ_m - длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения; b - постоянная Вина.

Энергия фотона:

$$\varepsilon = h\nu , \qquad \text{или} \qquad \varepsilon = \hbar\omega ,$$

где h - постоянная Планка; $\hbar$ - постоянная Планка, деленная на 2π; ν - частота фотона; ω - циклическая частота.

Масса фотона:

$$m = \varepsilon/c^2 = h/(c\lambda) ,$$

где c - скорость света в вакууме; λ - длина волны фотона.

Импульс фотона:

$$p = mc = h/\lambda .$$

Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A + T_{max} = A + m\upsilon^2_{max}/2 ,$$

где $h\nu$ - энергия фотона, падающего на поверхность металла; A - работа выхода электрона; T_{max} - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_0 = A/h \qquad \text{или} \qquad \lambda_0 = hc/A ,$$

где ν_0 - минимальная частота света, при которой еще возможен фотоэффект; λ_0 - максимальная длина волны света, при которой еще возможен фотоэффект; h - постоянная Планка; c - скорость света в вакууме.

Формула Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) ,$$

или

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\frac{h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2} ,$$

где λ - длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабо связанным электроном; λ' - длина волны фотона, рассеянного на угол θ после столкновения с электроном; m_0 - масса покоящегося электрона.

Комптоновская длина волны:

$$\Lambda = h/(m_0 c) \qquad (\Lambda = 2{,}436 \text{ пм}).$$

Давление света при нормальном падении на поверхность:

$$p = E_e(1-\rho)/c = \omega(1+\rho) ,$$

где E_e - энергетическая освещенность (облученность); ω - объемная плотность энергии излучения; ρ - коэффициент отражения.

I.2. Примеры решения задач

П р и м е р I. От двух когерентных источников S_1 и S_2 (λ = 0,8 мкм) лучи попадают на экран, где наблюдается интерференционная картина. Когда на пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили мыльную пленку (n = I,33), интерференционная картина изменилась на противоположную. При какой наименьшей толщине d_{min} пленки это возможно?

РЕШЕНИЕ. Изменение интерференционной картины на противоположную означает, что на тех участках экрана, где наблюдались интерференционные максимумы, стали наблюдаться интерференционные минимумы. Это возможно при изменении оптической разности хода пучков световых волн на нечетное число половин длин волн:

$$\Delta_2 - \Delta_1 = (2k+1)\lambda/2, \qquad \text{(I)}$$

где Δ_1 - оптическая разность хода пучков световых волн до внесения пленки; Δ_2 - оптическая разность хода тех же пучков после внесения пленки; k = 0, ±I, ±2,... Наименьшей толщине d_{min} пленки соответствует k = 0. При этом формула (I) примет вид

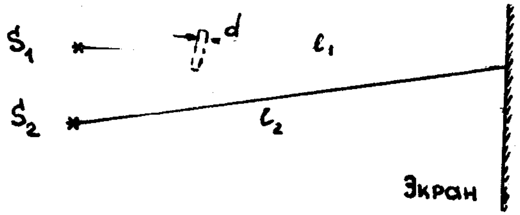

Рис.I.I

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \lambda/2. \qquad \text{(2)}$$

Выразим оптические разности хода Δ_2 и Δ_1. Из рис.I.I следует:

$$\Delta_1 = l_1 - l_2, \ \Delta_2 = [(l_1 - d_{min}) + nd_{min}] - l_2 = (l_1 - l_2) + d_{min}(n-1).$$

Подставим выражения Δ_1 и Δ_2 в формулу (2), получим

$$(l_1 - l_2) + d_{min}(n-1) - (l_1 - l_2) = \lambda/2,$$

или

$$d_{min}(n-1) = \lambda/2.$$

Отсюда

$$d_{min} = \lambda/[2(n-1)].$$

Произведем вычисления:

$$d_{min} = \frac{0{,}8}{2(1{,}33-1)} = 1{,}21 \text{ мкм}.$$

П р и м е р 2. На стеклянный клин с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны λ = 0,6 мкм. Число m возникающих при этом интерференционных полос, приходящихся на I см, равно IO. Определить угол α клина.

РЕШЕНИЕ. Параллельный пучок света, падая нормально к грани клина, отражается как от верхней, так и от нижней грани. Эти отраженные пучки света когерентны, поэтому на поверхности клина будут наблюдаться интерференционные полосы. Так как угол клина мал, отраженные пучки I и 2 света (рис.I.2) будут практически параллельными.

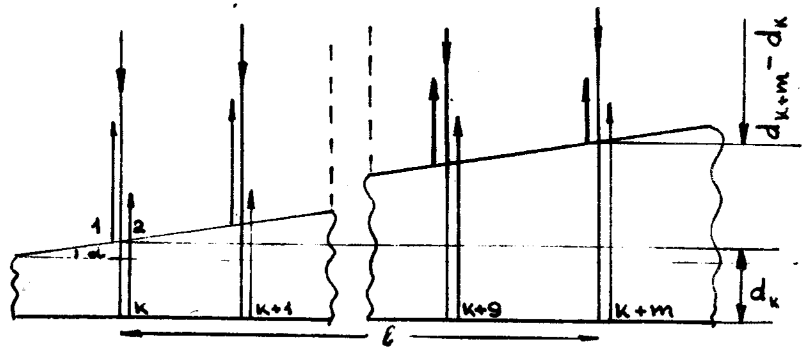

Рис.I.2

Темные полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода лучей кратна нечетному числу половин длин волн:

$$\Delta = (2k+1)\lambda/2 \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots). \qquad \text{(I)}$$

Разность хода Δ двух волн складывается из разности оптических длин путей этих волн ($2dn\cos i_2$) и половины длины волны ($\lambda/2$). Величина $\lambda/2$ представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении световой волны I (см.рис.I.2) от оптически более плотной среды. Подставляя в формулу (I) разность хода Δ световых волн, получаем

$$2d_k n\cos i_2+\lambda/2=(2k+1)\lambda/2,$$

где n - показатель преломления стекла (n = 1,5); d_k - толщина клина в том месте, где наблюдается темная полоса, соответствующая номеру k ; i_2 - угол преломления.

Согласно условию угол падения равен нулю, следовательно, и угол преломления равен нулю, а $\cos i_2 = 1$. Раскрыв скобки в правой части равенства (2), после упрощения получим

$$2d_k n=k\lambda. \qquad (3)$$

Пусть произвольной темной полосе k-го номера соответствует толщина d_k клина, а темной полосе ($k+m$)-го номера - толщина d_{k+m} клина. Тогда (см. рис. 1.2), учитывая, что m полос укладывается на расстоянии l, найдем

$$\sin\alpha=(d_{k+m}-d_k)/l. \qquad (4)$$

Выразим из (3) d_k и d_{k+m} и подставим их в формулу (4). Поскольку $\sin\alpha=\alpha$ (из-за малости угла α), получим

$$\alpha=\frac{(k+m)\lambda/(2n)-k\lambda/(2n)}{l}=\frac{m\lambda}{2nl}.$$

Подставляя численные значения физических величин, найдем

$$\alpha=\frac{10\cdot 0{,}6\cdot 10^{-4}}{2\cdot 1{,}5\cdot 1}\ \text{рад}=2\cdot 10^{-4}\ \text{рад}.$$

Выразим α в градусах. Для этого воспользуемся соотношением между радианом и секундой: 1 рад = 206265" $\approx$ $\approx 2{,}06\cdot 10^5$", т.е. $\alpha = 2\cdot 10^{-4}\cdot 2{,}06\cdot 10^5$" = 41,2".

П р и м е р 3. На дифракционную решетку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет. Период решетки d = 2 мкм. Определить наибольший порядок дифракционного максимума, который дает эта решетка для красного (λ_1 = 0,7 мкм) и для фиолетового (λ_2 = 0,41 мкм) света.

РЕШЕНИЕ. Из формулы, определяющей положение главных максимумов дифракционной решетки, найдем порядок m дифракционного максимума:

$$m=d\sin\varphi/\lambda, \qquad (1)$$

$d \sin \alpha = m\lambda$

где d - период решетки; φ - угол дифракции; λ - длина волны монохроматического света. Поскольку $\sin\varphi$ не может быть больше 1, число m не может быть больше d/λ, т.е.

$$m\le d/\lambda. \qquad (2)$$

Подставив в формулу (2) численные значения, получим:

$m \le 2/0{,}7 = 2{,}86$ (для красных лучей);

$m \le 2/0{,}41 = 4{,}88$ (для фиолетовых лучей).

Если учесть, что порядок максимумов является целым числом, то для красного света m_{max} = 2, а для фиолетового m_{max} = 4.

П р и м е р 4. Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света образует угол φ = 97° с падающим пучком. Определить показатель преломления жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.

РЕШЕНИЕ. Согласно закону Брюстера, пучок света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован в том случае, если тангенс угла падения численно равен относительному показателю преломления $\operatorname{tg} i_1 = n_{21}$, где n_{21} - показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости).

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления. Следовательно, $\operatorname{tg} i_1 = n_2/n_1$.

Поскольку угол падения равен углу отражения, $i_1=\varphi/2$ и, следовательно, $\operatorname{tg}\varphi/2=n_2/n_1$, откуда

$$n_1=\frac{n_2}{\operatorname{tg}\varphi/2}.$$

Произведем вычисления:

$$n_1=\frac{1{,}5}{(97^\circ/2)}=\frac{1{,}5}{1{,}13}=1{,}33.$$

П р и м е р 5. Два николя N_1 и N_2 расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет $\alpha = 60^0$. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность I_0 естественного света: I) при прохождении через один николь N_1; 2) при прохождении через оба николя. Коэффициент поглощения света в николе $k = 0{,}05$. Потери на отражение света не учитывать.

РЕШЕНИЕ. I. Естественный свет, падая на грань призмы николя (рис.I.3), расщепляется вследствие двойного лучепреломления на два пучка: обыкновенный и необыкновенный. Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний необыкновенного пучка лежит в плоскости чертежа (плоскость главного сечения). Плоскость колебаний обыкновенного пучка перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный пучок света (О) вследствие полного отражения от границы AB отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею. Необыкновенный пучок (l) проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через первую призму, равна

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1-k).$$

Относительное уменьшение интенсивности света получим, разделив интенсивность I_0 естественного света, падающего на первый николь, на интенсивность I_1 поляризованного света:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{I_0}{1/2\, I_0 (1-k)} = \frac{2}{1-k}. \qquad (I)$$

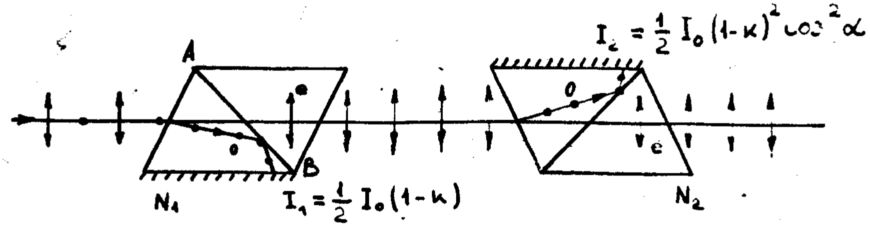

Рис.I.3

Произведем вычисления:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2}{1-0{,}05} = 2{,}1. \qquad (2)$$

Таким образом, интенсивность уменьшается в 2,I раза.

2. Плоскополяризованный пучок света интенсивности I_1 падает на второй николь N_2 и так же расщепляется на два пучка различной интенсивности: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный пучок полностью поглощается призмой, поэтому интенсивность его нас не интересует. Интенсивность I_2 необыкновенного пучка, вышедшего из призмы N_2, определяется законом Малюса (без учета поглощения света во втором николе):

$$I_2 = I_1 \cos^2\alpha,$$

где α – угол между плоскостью колебаний в поляризованном пучке и плоскостью пропускания николя N_2.

Учитывая потери интенсивности на поглощение во втором николе, получаем

$$I_2 = I_1 (1-k)\cos^2\alpha.$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя найдем, разделив интенсивность I_0 естественного света на интенсивность I_2 света, прошедшего систему из двух николей:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1 (1-k)\cos^2\alpha}.$$

Заменяя отношение I_0/I_1 его выражением по формуле (I), получаем

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-k)^2\cos^2\alpha}.$$

Произведем вычисления:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0{,}05)^2\cos^2 60^\circ} = 8{,}86.$$

Таким образом, после прохождения света через два николя интенсивность его уменьшится в 8,86 раза.

П р и м е р 6. Плоскополяризованный монохроматический пучок света падает на поляроид и полностью им гасится.

Когда на пути пучка поместили кварцевую пластину, интенсивность I пучка света после поляроида стала равна половине интенсивности пучка, падающего на поляроид. Определить минимальную толщину кварцевой пластины. Поглощением и отражением света поляроидом пренебречь, постоянную вращения α кварца принять равной 48,9 град/мм.

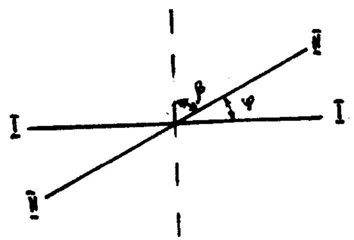

Рис.I.4

РЕШЕНИЕ. Полное гашение света поляроидом означает, что плоскость пропускания поляроида (пунктир на рис.I.4) перпендикулярна плоскости колебаний (I-I) плоскополяризованного света, падающего на него. Введение кварцевой пластины приводит к повороту плоскости колебаний света на угол

$$\varphi = \alpha l, \qquad (I)$$

где l – толщина пластины.

Зная, во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении его через поляроид, определим угол β, который установится между плоскостью пропускания поляроида и новым направлением (П-П на рис.I.4) плоскости колебаний падающего на поляроид плоскополяризованного света. Для этого воспользуемся законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2\beta .$$

Заметив, что $\beta = \pi/2 - \varphi$, можно написать $I = I_0 \cos^2(\pi/2 - \varphi)$, или

$$I = I_0 \sin^2\varphi . \qquad (2)$$

Из равенства (2) с учетом (I) получим $\alpha l = \arcsin\sqrt{I/I_0}$, откуда искомая толщина пластины будет

$$l = (1/\alpha)\arcsin\sqrt{I/I_0} .$$

Произведем вычисления во внесистемных единицах:

$$l = \frac{1}{48{,}9}\arcsin\sqrt{1/2}\ \text{мм} = \frac{45}{48{,}9}\ \text{мм} = 0{,}92\ \text{мм}.$$

П р и м е р 7. Определить импульс p и кинетическую энергию T электрона, движущегося со скоростью $v = 0{,}9\,c$, где c – скорость света в вакууме.

РЕШЕНИЕ. Импульсом частицы называется произведение массы частицы на ее скорость:

$$p = mv . \qquad (I)$$

Так как скорость электрона близка к скорости света, необходимо учесть зависимость массы от скорости, определяемую по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} , \qquad (2)$$

где m – масса движущейся частицы; m_0 – масса покоящейся частицы; $\beta = v/c$ – скорость частицы, выраженная в долях скорости света.

Заменив в формуле (I) массу m ее выражением из (2) и приняв во внимание, что $v = c\beta$, получим выражение для релятивистского импульса:

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\beta c = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\beta c . \qquad (3)$$

Произведем вычисления:

$$p = \frac{9{,}1\cdot 10^{-31}}{1-0{,}81}\,0{,}9\cdot 3\cdot 10^{8}\ \text{кг}\cdot\text{м/с} = 5{,}6\cdot 10^{-22}\ \text{кг}\cdot\text{м/с} .$$

В релятивистской механике кинетическая энергия T частицы определяется как разность между полной энергией E и энергией покоя E_0 этой частицы, т.е. $T = E - E_0$. Так как $E = mc^2$ и $E_0 = m_0c^2$, с учетом зависимости массы от скорости, получаем

$$T = m_0c^2/\sqrt{1-\beta^2} - m_0c^2 ,$$

или

$$T = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right). \qquad (4)$$

Произведем вычисления:

$$T = 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot(3\cdot 10^{8})^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-0{,}81}} - 1\right) = 8{,}18\cdot 10^{-14}\cdot(2{,}29-1) = 1{,}06\cdot 10^{-13}\ \text{Дж}.$$

Поскольку во внесистемных единицах $m_0c^2 = 0{,}51$ МэВ, вычисления упрощаются:

$$T = 0{,}51\cdot 1{,}29 \text{ МэВ} = 0{,}66 \text{ МэВ}.$$

П р и м е р 8. Определить релятивистский импульс электрона, обладающего кинетической энергией $T = 5$ МэВ.

РЕШЕНИЕ. Решение задачи сводится к установлению соотношения между релятивистским импульсом p частицы и ее кинетической энергией T.

Сначала установим связь между релятивистским импульсом и полной энергией частицы. Полная энергия E частицы прямо пропорциональна ее массе, т.е.

$$E = mc^2. \tag{1}$$

Зависимость массы от скорости определяется формулой

$$m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}. \tag{2}$$

Заменив массу m в формуле (1) ее выражением (2) и приняв во внимание, что $m_0c^2 = E_0$, получим

$$E = E_0/\sqrt{1-\beta^2}. \tag{3}$$

Возведя обе части равенства (3) в квадрат, найдем $E^2 = E_0^2/(1-\beta^2)$, откуда

$$E^2 - (\beta E)^2 = E_0^2. \tag{4}$$

Очевидно, что

$$\beta E = (v/c)mc^2 = mvc = pc.$$

Равенство (4) можно переписать в виде $E^2 - p^2c^2 = E_0^2$, откуда релятивистский импульс

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E^2 - E_0^2} = \frac{1}{c}\sqrt{(E-E_0)(E+E_0)}.$$

Разность между полной энергией и энергией покоя есть кинетическая энергия T частицы: $E - E_0 = T$. Легко убедиться, что $E + E_0 = T + 2E_0$, откуда искомая связь между импульсом и кинетической энергией релятивистской частицы выразится формулой

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{T(T+2E_0)}.$$

Вычисления удобно провести в два приема: сначала найти числовое значение радикала во внесистемных единицах, а затем перейти к вычислению в Международной системе единиц. Таким образом:

$$p = \frac{\sqrt{T(T+2E_0)}}{c} = \frac{\sqrt{5(5+2\cdot 0{,}51)}}{c} =$$

$$= 5{,}5 \text{ МэВ/с} = \frac{5{,}5\cdot 1{,}6\cdot 10^{-13}}{3\cdot 10^{8} \text{ м/с}} \text{ Дж} = 2{,}93\cdot 10^{-21} \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

Контрольная работа № 5

4.3.1. Варианты заданий.

Вариант	Номер задачи					
0	501	517	523	536	547	558
1	507	512	526	531	541	559
2	505	519	525	520	548	556
3	502	511	527	539	545	551
4	506	518	524	538	542	560
5	503	516	522	535	549	555
6	508	520	529	537	544	553
7	510	515	528	533	550	554
8	504	513	530	534	546	552
9	509	514	521	532	543	557

501. Расстояние между щелями в опыте Юнга 0,5 мм, а длина волны света 550 нм. Каково расстояние от щелей до экрана, если расстояние между соседними темными полосами на нем равно 1 мм?

502. Какой должна быть толщина пластинки при $n = 1{,}6$ и длиной волны света $\lambda = 550$ нм, если с введением пластинки на пути одного из интерферирующих лучей картина смещается на четыре полосы?

503. Какова наименьшая возможная толщина плоскопараллельной пластинки с показателем преломления 1,5, если при освещении белым светом под углами 45 и 60^0 она окажется красной $\lambda = 0{,}74$ мкм?

504. В каких пределах может изменяться толщина пластинки с показателем преломления 1,5, чтобы в отраженном свете наблюдалось совпадение линий равного наклона для $\lambda_1 = 550$ нм и $\lambda_2 = 525$ нм?

505. В каких пределах может изменяться толщина пластинки, чтобы можно было наблюдать максимум 12-го порядка для $\lambda = 600$ нм? Показатель преломления пластинки равен 1,6,

506. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 550 нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить минимальную толщину пленки, если показатель преломления материала пленки равен 1,4.

507. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм равен 0,82 мм. Радиус кривизны линзы 0,5 м.

508. На стеклянную пластину положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом длиной волны 550 нм. Найти радиус линзы, если радиус четвертого кольца Ньютона в отраженном свете равен 2 мм.

509. Радиус кривизны плосковыпуклой линзы 4 м. Чему равна длина волны падающего света, если радиус пятого светлого кольца в отраженном свете равен 3,6 мм?

510. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, которая вместе с пластинкой позволяет наблюдать кольца Ньютона при освещении желтой линией натрия ($\lambda = 589$ нм), причем в отраженном свете расстояние между первым и вторым светлыми кольцами будет равно 0,5 мм.

511. Для наблюдения колец Ньютона в отраженном свете ($\lambda = 0{,}55$ мкм) плосковыпуклую линзу с радиусом кривизны 3 м в одном случае положили на плоскопараллельную пластинку, а в другом – на вогнутую линзу с радиусом кривизны 6 м. Определить разность радиусов десяти темных колец.

512. Плосковыпуклая линза с фокусным расстоянием 1 м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете 1,1 мм. Определить длину световой волны.

513. Период дифракционной решетки 0,005 мм. Определить число наблюдаемых главных максимумов в спектре дифракционной решетки для $\lambda_1 = 760$ нм и $\lambda_2 = 440$ нм.

514. Сколько штрихов на 1 мм должна иметь дифракционная решетка, чтобы углу 90^0 соответствовал максимум пятого порядка для света с длиной волны 500 нм?

515. Две дифракционные решетки имеют одинаковую ширину 3 мм, но разные периоды: $d_1 = 3\cdot10^{-3}$ мм и $d_2 = 6\cdot10^{-3}$ мм. Определить их наибольшую разрешающую способность для желтой линии натрия $\lambda = 5896$ Å.

516. Расстояние между штрихами дифракционной решетки 4 мкм. На решетку падает нормально свет с длиной волны 0,58 мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

517. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница $\lambda = 780$ нм спектра третьего порядка?

518. На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна $\lambda = 600$ нм. Угол отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному максимуму, равен 20^0. Определить ширину щели.

519. Угол падения луча на поверхность стекла равен 60^0. При этом отраженный пучок света оказался максимально поляризованным. Определить угол преломления луча.

520. Пучок света, проходящий сквозь стеклянный сосуд с глицерином, отражается от дна сосуда. При каком угле падения отраженный пучок света максимально поляризован.

521. Во сколько раз будет ослаблен луч естественного света, если его пропустить через два поляроида, плоскости поля-

ризации которых составляют угол 66°? За счет поглощения света теряется 5% энергии в каждом поляроиде.

√ 522. Луч естественного света при прохождении двух николей был ослаблен в 5 раз. В каждом николе интенсивность света за счет отражения и поглощения уменьшилась на 10%. Определить угол между плоскостями поляризации николей. Сделать чертеж.

523. При прохождении света через слой 5%-ного сахарного раствора толщиной 15 см плоскость поляризации света повернулась на угол 6,5°. На сколько повернет плоскость поляризации 13%-ный раствор с толщиной слоя 12 см?

524. Протон с кинетической энергией 3 ГэВ при торможении потерял треть этой энергии. Определить, во сколько раз изменился релятивистский импульс протона.

525. Определить отношение релятивистского импульса электрона с кинетической энергией 1,55 МэВ к комптоновскому импульсу m_0c электрона.

526. Какой кинетической энергией обладает электрон, двигаясь со скоростью $2,9 \cdot 10^8$ м/с?

527. Найти импульс, полную и кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью, равной 0,7 скорости света.

528. Протон проходит поле с ускоряющей разностью потенциалов $19,5 \cdot 10^5$ В. Чему равна его конечная скорость, полная и кинетическая энергия?

529. На сколько процентов увеличится масса электрона после прохождения им в ускоряющем электрическом поле разности потенциалов $1,55 \cdot 10^6$ В?

530. Электрон движется со скоростью, равной 0,97 скорости света. Навстречу ему движется протон со скоростью, равной 0,5 скорости света. Определить скорость их относительного движения. Во сколько раз отличаются их кинетические энергии?

531. Космическая ракета движется с большой относительной скоростью. Релятивистское сокращение длины при этом составило 33%. Определить, какой скорости достигла ракета.

532. Абсолютно черное тело имеет температуру 500 К. Какова будет температура тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в 4 раза?

533. Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум излучения переместится от красной границы видимого света 760 нм к его фиолетовой границе 380 нм?

534. Из смотрового окошка печи излучается поток, равный 4 кДж/мин. Определить температуру печи, если площадь окошка 8 см^2.

√ 535. Определить температуру и энергетическую светимость (излучательность) абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны 600 нм.

536. Определить поглощательную способность серого тела, для которого температура, измеренная радиационным пирометром, равна 1,3 кК, тогда как истинная температура тела равна 3,2 кК.

537. Площадь поверхности нити накала 60-ваттной вольфрамовой лампы накаливания 0,5 см^2. Интегральная поглощательная способность вольфрама 0,6. Определить температуру нити накала.

538. При нагревании тела длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от 1,55 до 1,05 мкм. На сколько изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела?

539. Температура абсолютно черного тела 2 кК. Определить длину волны, на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости (излучательности) для этой длины волны.

540. Красная граница для некоторого металла 0,6 мкм. Металл освещается светом, длина волны которого 0,4 мкм. Определить максимальную скорость электронов, выбиваемых светом из металла.

541. Рубидий, цезий и натрий облучаются светом с длиной волны λ = 600 нм. Работы выхода электронов из этих металлов равны 1,53; 1,87 и 2,48 эВ соответственно. Определить максимальные скорости электронов.

542. Цезий (работа выхода I,88 эВ) освещается спектральной линией водорода (λ = 0,476 мкм). Какую наименьшую задерживающую разность потенциалов нужно приложить, чтобы фототок прекратился?

543. Монохроматическое излучение с длиной волны 6000 Å падает на фоточувствительную поверхность, чувствительность которой 9 мА/Вт, освобождая при этом 900 фотоэлектронов. Определить число квантов, попавших на поверхность.

544. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла 0,4 мкм. Кинетическая энергия вылетевших электронов 2 эВ. Какая доля энергии падающих фотонов расходуется на работу выхода?

545. Фотон с энергией IO эВ падает на серебряную пластину и вызывает фотоэффект. Определить импульс, полученный пластиной, если направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластин.

546. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны 0,I мкм. Красная граница фотоэффекта 0,3 мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

547. В параллельном пучке $7{,}6\cdot 10^3$ фотонов имеют суммарный импульс, равный среднему импульсу атома гелия при температуре 300 К. Определить число квантов, попавших на поверхность.

548. Определить импульс электрона отдачи при эффекте Комптона, если энергия падающего фотона равна удвоенной энергии покоя электрона и фотон был рассеян на угол 60°.

V 549. Гамма-квант рассеялся на свободном протоне под углом 90°, при этом энергия его уменьшилась в два раза. Определить энергию падающего кванта.

550. Фотон с энергией 0,5 МэВ рассеялся на свободном электроне под углом 60°. Определить энергию рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона отдачи.

551. Фотон рассеивается на свободном электроне. Определить угол рассеяния фотона и энергию фотона, если импульс рассеянного фотона равен половине импульса падающего фотона, а импульс электрона отдачи равен импульсу падающего фотона.

552. Фотон с длиной волны I5 пм рассеялся на свободном электроне. Длина волны рассеянного фотона I6 пм. Определить угол рассеяния.

553. Какая доля энергии фотона приходится при эффекте Комптона на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол 90°? Энергия фотона до рассеяния 0,5I МэВ.

554. Фотон с энергией I,02 МэВ рассеян на свободных электронах на угол I50°. Определить энергию рассеянного фотона.

V 555. Определить угол, на который был рассеян гамма-квант с энергией I,53 МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи 0,5I МэВ.

556. Фотон с энергией 0,5I МэВ был рассеян при эффекте Комптона на свободном электроне на угол I80°. Определить кинетическую энергию электрона отдачи.

557. Определить энергетическую освещенность (облученность) зеркальной поверхности, если давление, производимое излучением, равно 40 мкПа. Излучение падает нормально к поверхности.

558. На зеркальную поверхность нормально падает свет с длиной волны 600 нм и производит на нее давление 4 мкПа. Определить число фотонов, ежесекундно падающих на площадку. Мощность излучения I00 Вт.

559. Поток излучения мощностью 0,8 Вт падает нормально на зеркальную поверхность площадью 6 см². Определить давление и силу давления света на эту поверхность.

560. При энергетической освещенности I20 Вт/м² давление света на поверхность оказалось равным 0,5 мкПа. Определить коэффициент отражения поверхности.

2. ФИЗИКА АТОМОВ И АТОМНОГО ЯДРА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

2.I. Основные формулы

2.I.I. Боровская теория.

Момент импульса электрона (второй постулат Бора):

$$L_n = \hbar n, \quad \text{или} \quad m\upsilon_n r_n = \hbar n,$$

где m – масса электрона; υ_n – скорость электрона на n-й орбите; r_n – радиус n-й стационарной орбиты; $\hbar$ – постоянная Планка; n – главное квантовое число (n = I, 2,...).

Радиус n-й стационарной орбиты:

$$r_n = a_0 n^2,$$

где a_0 – радиус Бора.

Энергия электрона в атоме водорода:

$$E_n = E_i / n^2,$$

где E_i – энергия ионизации атома водорода.

Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода:

$$\varepsilon = \hbar\omega = E_{n_2} - E_{n_1},$$

или

$$\varepsilon = E_i(1/n_1^2 - 1/n_2^2),$$

где n_1 и n_2 – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электроне в атоме.

Спектроскопическое волновое число:

$$\nu = 1/\lambda = R(1/n_1^2 - 1/n_2^2),$$

где λ – длина волны излучения или поглощения атомом; R – постоянная Ридберга.

2.I.2. Волновые свойства частиц.

Длина волны де Бройля:

$$\lambda = 2\pi\hbar / P,$$

где P – импульс частицы.

Импульс частицы и его связь с кинетической энергией T:

а) $P = m_0\upsilon$, $P = \sqrt{2mT}$;

б) $P = m\upsilon = \dfrac{m_0\upsilon}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}$; $P = \dfrac{1}{c}\sqrt{(2E_0+T)T}$,

где m_0 – масса покоя частицы; m – релятивистская масса; υ – скорость частицы; c – скорость света в вакууме; E – энергия покоя частицы ($E_0 = m_0c^2$).

Соотношение неопределенностей:

а) для координаты и импульса

$$\Delta P_x \Delta x \geq \hbar,$$

где ΔP_x – неопределенность проекции импульса на ось x; Δx – неопределенность координаты;

б) для энергии и времени

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где ΔE – неопределенность энергии; Δt – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E-U)\Psi(x) = 0,$$

где $\Psi(x)$ – волновая функция, описывающая состояние частицы; m – масса частицы; E – полная энергия; $U = U(x)$ – потенциальная энергия частицы.

Плотность вероятности:

$$\frac{dw(x)}{dx} = |\Psi(x)|^2,$$

где $dw(x)$ – вероятность того, что частица может быть обнаружена вблизи точки с координатой x на участке dx.

Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2:

$$w = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi(x)|^2 dx.$$

Решение уравнения Шредингера для одномерного, бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика:

а) собственная нормированная волновая функция

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\frac{\pi n}{l} x ;$$

б) собственное значение энергии

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2} ,$$

где n - квантовое число ($n = 1, 2, 3, \ldots$); l - ширина ящика.

В области $0 \le x \le l$ $U = \infty$ и $\Psi(x) = 0$.

2.I.3. Пространственная решетка кристалла.

Молярный объем кристалла:

$$V_m = M/\rho ,$$

где M - молярная масса; ρ - плотность кристалла.

Объем элементарной ячейки для решетки кубической сингонии:

$$V_{эл} = a^3 ,$$

где a - параметр решетки.

Число элементарных ячеек в одном моле кристалла:

$$Z = V_m / V_{эл} ;$$

если кристалл состоит из одинаковых атомов, то

$$Z_m = N_A / n ,$$

где n - число одинаковых атомов, приходящихся на элементарную ячейку; N_A - постоянная Авогадро.

Отношение числа элементарных ячеек к объему кристалла:

$$Z = Z_m / V_m ;$$

если кристалл состоит из одинаковых атомов, то

$$Z = \rho N_A / (nM).$$

Параметр кубической решетки из одинаковых атомов:

$$a = \sqrt[3]{nM/(\rho N_A)} .$$

Расстояние между соседними атомами в кубической решетке:

а) гранецентрированной

$$d = a\sqrt{2} ;$$

б) объемноцентрированной

$$d = (\sqrt{3}/2)a.$$

2.I.4. Теплоемкость кристалла.

Средняя энергия квантового одномерного осциллятора:

$$\langle \dot{\varepsilon} \rangle = \varepsilon_0 + \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/(kT)} - 1} ,$$

где ε_0 - нулевая энергия ($\varepsilon_0 = 1/2\,\hbar\omega$); $\hbar$ - постоянная Планка; ω - круговая частота колебаний осциллятора; k - постоянная Больцмана; T - термодинамическая температура.

Молярная внутренняя энергия системы, состоящей из невзаимодействующих квантовых осцилляторов:

$$U_m = U_{0m} + 3R\theta_E \Big/ (e^{\theta_E/T} - 1) ,$$

где R - молярная газовая постоянная; $\theta_E = \hbar\omega/k$ - характеристическая температура Эйнштейна; $U_{0m} = 2/3\, R\theta_E$ - молярная нулевая энергия (по Эйнштейну).

Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела по Дебаю:

$$C_m = 3R\left[12\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int\limits_0^{\theta_D/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} - \frac{3(\theta_D/T)}{e^{\theta_D/T} - 1}\right],$$

где θ_D - характеристическая температура Дебая ($\theta_D = \hbar\omega_{max}/k$).

Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела в области низких температур (предельный закон Дебая):

$$C_m = \frac{12\pi^4}{5} R\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 = 234R\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \quad (T \gg \theta_D).$$

Теплота, необходимая для нагревания тела:

$$Q = \frac{m}{M}\int_{T_1}^{T_2} C_m\,dT ,$$

где m - масса тела; M - молярная масса; T_1 и T_2 - начальная и конечная температуры тела.

2.1.5. Элементы квантовой статистики.

Распределение свободных электронов в металле по энергиям при 0 К:

$$dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2}\varepsilon^{1/2}d\varepsilon ,$$

где $dn(\varepsilon)$ - концентрация электронов, энергии которых заключены в пределах от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$; m - масса электрона. Это выражение справедливо при $\varepsilon < \varepsilon_F$, где ε_F - энергия или уровень Ферми.

Энергия Ферми в металле при $T = 0$ К

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m}(3\pi^2 n)^{2/3} ,$$

где n - концентрация электронов в металле.

2.1.6. Полупроводники.

Удельная проводимость собственных полупроводников:

$$\gamma = en(b_n + b_p),$$

где e - элементарный заряд; n - концентрация носителей заряда (электронов и дырок); b_n и b_p - подвижности электронов и дырок.

Напряжение на гранях прямоугольного образца при эффекте Холла, холловская разность потенциалов:

$$U_H = R_H B j a ,$$

где R_H - постоянная Холла; B - магнитная индукция; j - плотность тока; a - ширина пластины (образца).

Постоянная Холла для полупроводников типа алмаз, германий, кремний и других, обладающих носителями заряда одного вида (n или p):

$$R_H = 3\pi/(8en),$$

где n - концентрация носителей заряда.

2.1.7. Магнетики.

Связь магнитной индукции $\vec{B}$ с напряженностью $\vec{H}$ магнитного поля в изотропном магнетике:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} ,$$

где μ - магнитная проницаемость среды; μ_0 - магнитная постоянная.

Намагниченность однородного изотропного магнетика:

$$J = \sum_{i=1}^{N} P_{mi}/V ,$$

где P_{mi} - магнитный момент i-й молекулы (атома); N - число молекул в объеме V.

Молярная намагниченность однородного изотропного магнетика:

$$J_m = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{mi}}{m/M} = \frac{M}{\rho} J ,$$

где m - масса магнетика; M - молярная масса; ρ - плотность магнетика.

Удельная намагниченность однородного изотропного магнетика:

$$J_{уд} = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{mi}}{m} = \frac{1}{\rho} J .$$

Магнитная восприимчивость однородного изотропного магнетика

$$\chi = J/H ,$$

где H - напряженность магнитного поля.

Молярная магнитная восприимчивость однородного изотропного магнетика:

$$\chi_m = J_m/H = M\chi/\rho .$$

Удельная магнитная восприимчивость однородного изотропного магнетика:

$$\chi_{уд} = J_{уд}/H = \chi/\rho .$$

Связь магнитной восприимчивости с магнитной проницаемостью:

$$\mu = 1 + \chi .$$

Намагниченность при насыщении в случае однородного изотропного магнетика:

$$\vec{J}_{нас} = n\vec{P}_m ,$$

где n - концентрация молекул атомов с магнитным моментом P_m .

Магнитная восприимчивость парамагнитного однородного изотропного магнетика при условии $P_m B << kT$:

$$\chi = \mu_0 n P_m^2 / (3kT),$$

где k - постоянная Больцмана; T - термодинамическая температура.

Магнетон Бора:

$$\mu_B = e\hbar/(2m_e),$$

где m_e - масса электрона; $\mu_B = 0{,}927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Т.

Частота прецессии Лармора:

$$\omega_L = eB/(2m_e),$$

где B - магнитная индукция.

2.1.8. Атомное ядро. Радиоактивность.

Массовое число ядра (число нуклонов в ядре):

$$A = Z + N ,$$

где Z - зарядное число (число протонов); N - число нейтронов.

Закон радиоактивного распада:

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

где dN - число ядер, распадающихся за интервал времени dt; N - число ядер, нераспавшихся к моменту времени t; N_0 - число ядер в начальный момент ($t = 0$); λ - постоянная радиоактивного распада.

Число ядер, распавшихся за время t:

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

В случае, если интервал времени Δt , за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, то число распавшихся ядер можно определить по формуле

$$\Delta N = \lambda N \Delta t .$$

Зависимость периода полураспада от постоянной радиоактивного распада:

$$T_{1/2} = \ln\frac{2}{\lambda} = 0{,}693/\lambda .$$

Среднее время τ жизни радиоактивного ядра, т.е. интервал времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз:

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

Число N атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

$$N = m N_A / M ,$$

где m - масса изотопа; M - молекулярная масса; N_A - постоянная Авогадро.

Активность A радиоактивного изотопа:

$$A = -dN/dt = \lambda N , \quad \text{или} \quad A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} ,$$

где dN - число ядер, распадающихся за интервал времени dt; A_0 - активность изотопа в начальный момент времени.

Удельная активность изотопа:

$$a = A/m .$$

Дефект массы ядра:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_я ,$$

где Z - зарядовое число (число протонов в ядре); A - массовое число (число нуклонов в ядре); $A - Z$ - число нейтронов в ядре; m_p - масса протона; m_n - масса нейтрона; $m_я$ - масса ядра.

Энергия связи ядра:

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2 ,$$

где Δm - дефект массы ядра; c - скорость света в вакууме.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра равна $E_{св} = 931\,\Delta m$, где дефект массы Δm (а.е.м.); 931 - коэффициент пропорциональности (I а.е.м. $\sim$ 93I МэВ).

2.2. Примеры решения задач

Пример I. Электрон в атоме водорода перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

РЕШЕНИЕ. Для определения энергии фотона воспользуемся сериальной формулой для водородоподобных ионов:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) , \qquad (I)$$

где λ - длина волны фотона; R - постоянная Ридберга; Z - заряд ядра в относительных единицах (при Z = I формула переходит в сериальную формулу для водорода); n_1 - номер орбиты, на которую перешел электрон; n_2 - номер орбиты, с которой перешел электрон (n_1 и n_2 - главные квантовые числа).

Энергия фотона ε выражается формулой

$$\varepsilon = \hbar c/\lambda .$$

Поэтому, умножив обе части равенства (I) на $\hbar c$, получим выражение для энергии фотона:

$$\varepsilon = R\hbar c Z^2 (1/n_1^2 - 1/n_2^2).$$

Поскольку $R\hbar c$ есть энергия ионизации E_i атома водорода, имеем

$$\varepsilon = E_i Z^2 (1/n_1^2 - 1/n_2^2).$$

Вычисления выполним во внесистемных единицах: E_i = = I3,6 эВ (см.табл.I приложения); Z = I; n_1= 2; n_2= 4:

$$\varepsilon = 13{,}6 \cdot 1^2 (1/2^2 - 1/4^2)\ эВ = 2{,}55\ эВ .$$

Пример 2. Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U. Найти длину волны де Бройля λ для двух случаев: I) U_1 = 5I В; 2) U_2 = 5I0 кВ.

РЕШЕНИЕ. Длина волны де Бройля для частицы зависит от ее импульса p и определяется формулой

$$\lambda = h/p , \qquad (I)$$

где h - постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна ее кинетическая энергия T. Связь импульса с кинетической энергией различная для нерелятивистского случая (когда кинетическая энергия частицы много меньше ее покоя) и для релятивистского случая (когда кинематическая энергия сравнима с энергией покоя частицы).

В нерелятивистском случае:

$$p = \sqrt{2m_0 T} , \qquad (2)$$

где m_0 - масса покоя частицы.

В релятивистском случае:

$$p = \sqrt{(2E_0+T)T}\,/c , \qquad (3)$$

где $E_0 = m_0 c^2$ - энергия покоя частицы.

Формула (I) с учетом соотношений (2) и (3) запишется:

- в нерелятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 T}} ; \qquad (4)$$

- в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(2E_0+T)T}\,/c} . \qquad (5)$$

Сравним кинетические энергии электрона, прошедшего заданные в условии задачи разности потенциалов U_1= 5I В и U_2 = 5I0 кВ, с энергией покоя электрона и в зависимости от этого решим, какую из формул (4) или (5) следует применять для вычисления длины волны де Бройля.

Как известно, кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U, будет

$$T = eU.$$

В первом случае $T_1 = eU_1 = 51$ эВ $= 0{,}51\cdot10^{-4}$ МэВ, что много меньше энергии покоя электрона $E_0 = m_0c^2 = 0{,}51$ МэВ. Следовательно, можно применить формулу (4). Для упрощения расчетов заметим, что $T_1 = 10^{-4} m_0c^2$. Подставив это выражение в формулу (4), запишем ее в виде

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_0\cdot10^{-4}\cdot m_0c^2}} = \frac{10^2}{\sqrt{2}}\,\frac{h}{m_0c}.$$

Учитывая, что $h/(m_0c^2)$ есть комптоновская длина волны Λ, получаем

$$\lambda_1 = 10^2\Lambda/\sqrt{2}.$$

Поскольку $\Lambda = 2{,}43$ пм (см. табл. I приложения), имеем:

$$\lambda_1 = 10^2\cdot 2{,}43/\sqrt{2}\ \text{пм} = 171\ \text{пм}.$$

Во втором случае кинетическая энергия $T_2 = eU_2 = 510$ кэВ $= 0{,}51$ МэВ, т.е. равна энергии покоя электрона. В этом случае необходимо применить релятивистскую формулу (5). Учитывая, что $eU_2 = 0{,}51$ МэВ $= mc^2$, по формуле (5) находим

$$\lambda_2 = \frac{h}{\sqrt{(2m_0c^2+m_0c^2)m_0c^2}/c} = \frac{h}{\sqrt{3}\,m_0c},$$

или

$$\lambda_2 = \frac{2{,}43}{\sqrt{3}}\ \text{пм} = 1{,}40\ \text{пм}.$$

Подставив значение Λ, произведем вычисления:

$$\lambda_2 = \frac{2{,}43}{\sqrt{3}}\ \text{пм} = 1{,}40\ \text{пм}.$$

П р и м е р 3. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка $T = 10$ эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

РЕШЕНИЕ. Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид

$$\Delta x\,\Delta P \geq \hbar,$$

где Δx – неопределенность координаты частицы (в данном случае электрона); ΔP – неопределенность импульса частицы (электрона); $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка h, деленная на 2π.

Из соотношения неопределенностей следует, что чем точнее определяется положение частицы в пространстве, тем более неопределенным становится импульс, а следовательно, и энергия частицы. Пусть атом имеет линейные размеры l, тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью

$$\Delta x = l/2. \tag{I}$$

Соотношение неопределенностей (I) тогда можно записать в виде

$$(l/2)\Delta P \geq \hbar,$$

откуда

$$l \geq 2\hbar/\Delta P. \tag{2}$$

Физически разумная неопределенность импульса ΔP во всяком случае не должна превышать значения самого импульса P, т.е. $\Delta P \leq P$. Импульс P связан с кинетической энергией соотношением $P = \sqrt{2mT}$. Заменим ΔP значением $\sqrt{2mT}$ (такая замена не увеличит l). Переходя от неравенства к равенству, получим

$$l_{min} = 2\hbar/\sqrt{2mT}. \tag{3}$$

Проверим, дает ли полученная формула единицу длины. Для этого в правую часть формулы (3) вместо символов величин подставим обозначения их единиц:

$$\frac{[\hbar]}{([m][T])^{1/2}} = \frac{1\,\text{Дж}\cdot\text{с}}{(1\,\text{кг}\cdot1\,\text{Дж})^{1/2}} = \left(\frac{1\,\text{Дж}}{1\,\text{кг}}\right)^{1/2}\cdot 1\,\text{с} =$$

$$= \left(\frac{1\,\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2}{1\,\text{кг}}\right)^{1/2}\cdot 1\,\text{с} = 1\,\text{м}.$$

Найденная единица является единицей длины.

Произведем вычисления:

$$l_{min} = \frac{2\cdot 1{,}05\cdot 10^{-34}}{\sqrt{2\cdot 9{,}1\cdot 10^{-34}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 10}}\ м = 1{,}24\cdot 10^{-10}\ м = 124\ пм.$$

Пример 4. Волновая функция $\Psi(x)=\sqrt{2/l}\,\sin\frac{\pi}{l}x$ описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном ящике шириной l. Вычислить вероятность нахождения частицы в малом интервале $\Delta l = 0{,}01$ в двух случаях: 1) вблизи стенки $(0 \le x \le \Delta l)$; 2) в средней части ящика $(l/2 - \Delta l/2 \le x \le l/2 + \Delta l/2)$.

РЕШЕНИЕ. Вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале dx (от x до $x+dx$), пропорциональна этому интервалу и квадрату модуля волновой функции, описывающей данное состояние, равна

$$dw = |\Psi(x)|^2 dx.$$

В первом случае искомая вероятность найдется интегрированием в пределах от 0 до $0{,}01l$ (рис.2.1):

$$w = \frac{2}{l} = \int_0^{0{,}01l} \sin^2\frac{\pi}{l}x\,dx. \qquad (1)$$

Знак модуля опущен, так как Ψ - функция в данном случае является комплексной.

Так как x изменяется в интервале $0 \le x \le 0{,}01l$ и,

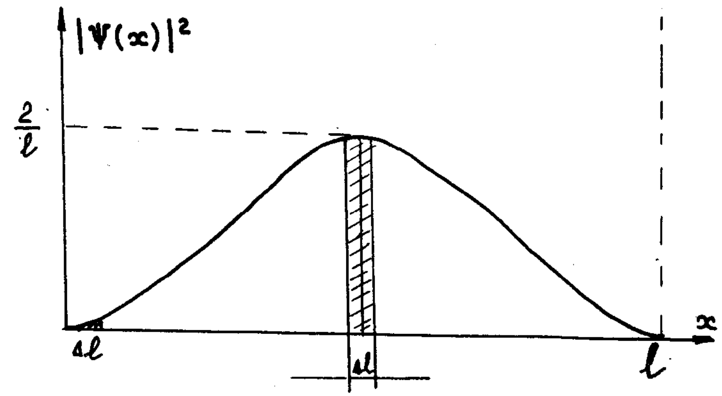

Рис.2.1

следовательно, $\pi x/l \ll 1$, справедливо приближенное равенство

$$\sin^2\frac{\pi}{l}x \approx \left(\frac{\pi}{l}x\right)^2.$$

С учетом этого выражение (1) примет вид

$$w = \frac{2}{l}\int_0^{0{,}01l}\left(\frac{\pi}{l}x\right)^2 dx = \frac{2\pi^2}{l^3}\int_0^{0{,}01l} x^2 dx.$$

После интегрирования получим

$$w = \frac{2}{3}\pi^2\cdot 10^{-6} = 6{,}6\cdot 10^{-6}.$$

Во втором случае можно обойтись без интегрирования, так как квадрат модуля волновой функции вблизи ее максимума в заданном малом интервале $(\Delta l = 0{,}01 l)$ практически не изменяется. Искомая вероятность во втором случае определяется выражением

$$w = |\Psi(l/2)|^2 \Delta l,$$

или

$$w = \frac{2}{l}\left(\sin\frac{\pi}{l}\,\frac{l}{2}\right)^2 \Delta l = \frac{2}{l}\,0{,}01l = 0{,}02.$$

Пример 5. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра ${}^7_3Li$.

РЕШЕНИЕ. Масса ядра всегда меньше суммы масс свободных (находящихся вне ядра) протонов и нейтронов, из которых ядро образовалось. Дефект массы ядра Δm и есть разность между суммой масс свободных нуклонов (протонов и нейтронов) и массой ядра, т.е.

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_я,$$

где Z - атомный номер (число протонов в ядре); A - массовое число (число нуклонов, составляющих ядро); m_p, m_n, $m_я$ - соответственно массы протона, нейтрона и ядра.

В справочных таблицах всегда даются массы нейтральных атомов, но не ядер, поэтому формулу (1) целесообразно преобразовать так, чтобы в нее входила масса m_a нейтрального атома. Можно считать, что масса нейтрального атома равна сумме масс ядра и электронов, составляющих электронную оболочку атома: $m_a = m_я + Zm_e$, откуда

$$m_я = m_a - Zm_e \,. \qquad (2)$$

Выразив в равенстве (I) массу ядра по формуле (2), получаем

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_a + Zm_e \,,$$

или

$$\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A-Z)m_n - m_a .$$

Поскольку $m_p + m_e = m_H$, где m_H – масса атома водорода, окончательно находим

$$\Delta m = Zm_H + (A-Z)m_n - m_a \,. \qquad (3)$$

Подставив в выражение (3) числовые значения масс (см. табл.15 и 17 приложения), получим

$$\Delta m = [3\cdot1{,}00783 + (7-3)\cdot1{,}00867 - 7\cdot0{,}1601]\ а.е.м = 0{,}04216\ а.е.м.$$

В соответствии с законом пропорциональности массы и энергии

$$E = c^2 \Delta m \,,$$

где c – скорость света в вакууме.

Коэффициент пропорциональности c^2 может быть выражен двояко:

$$c^2 = 9\cdot10^{16}\ м^2/c^2, \text{или}\ c^2 = \Delta E/\Delta m = 9\cdot10^{16}\ Дж/кг \,.$$

Если вычислить энергию связи, пользуясь внесистемными единицами, то $c^2 = 931$ МэВ/а.е.м. С учетом этого формула (3) примет вид

$$E = 931\,\Delta m\ (МэВ). \qquad (4)$$

Подставив найденное значение дефекта массы ядра в формулу (4), получим

$$E = 931\cdot0{,}04216\ МэВ = 39{,}2\ МэВ.$$

П р и м е ч а н и е. Термин "дефект массы" часто применяют в другом смысле: дефектом массы Δ называют разность между массой нейтрального атома данного изотопа m_a и его массовым числом A: $\Delta = m_a - A$. Эта величина особого физического смысла не имеет, но ее использование позволяет в ряде случаев значительно упростить вычисления. В настоящих методических указаниях всюду имеется в виду дефект массы Δm, определяемый формулой (I).

П р и м е р 6. При соударении α-частицы с ядром бора ${}^{10}_{5}B$ произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось два новых ядра, одним из них было ядро атома водорода ${}^{1}_{1}H$. Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, записать ядерную реакцию, используя символы, и определить ее энергетический эффект.

РЕШЕНИЕ. Обозначим неизвестное ядро символом ${}^{A}_{Z}X$. Поскольку α-частица представляет собой ядро гелия ${}^{4}_{2}He$, запись реакции имеет вид

$${}^{4}_{2}He + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{A}_{Z}X \,.$$

Применив закон сохранения числа нуклонов, получим уравнение $4 + 10 = 1 + A$, откуда $A = 13$. Применив закон сохранения заряда, получим уравнение $2 + 5 = 1 + Z$, откуда $Z = 6$. Следовательно, неизвестное ядро является ядром атома изотопа углерода ${}^{13}_{6}C$.

Теперь можем записать реакцию в окончательном виде:

$${}^{4}_{2}He + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{13}_{6}C \,.$$

Энергетический эффект ядерной реакции определяется по формуле

$$Q = 931[(m_{He} + m_B) - (m_H + m_C)].$$

Здесь в первых круглых скобках указаны массы исходных ядер, во вторых скобках – массы ядер продуктов реакции. При числовых подсчетах по этой формуле массы ядер заменяют массами нейтральных атомов. Возможность такой замены вытекает из следующих соображений.

Число электронов в электронной оболочке нейтрального атома равно его зарядовому числу Z. Сумма зарядовых чисел исходных ядер равна сумме зарядовых чисел ядер – продуктов реакции. Следовательно, электронные оболочки ядер гелия и бора содержат вместе столько же электронов, сколько их содержат электронные оболочки ядер углерода и водорода.

Очевидно, что при вычитании суммы масс нейтральных атомов углерода и водорода из суммы масс атомов гелия и бора и без учета массы электронов мы получим тот же результат, как если бы брали массы ядер. Подставив массы атомов (см. табл.15 приложения) в расчетную формулу, получим

$$Q = 931[(4{,}00260 + 10{,}01294) - (1{,}00783 + 13{,}00335)]\ МэВ = 4{,}06\ МэВ.$$

Пример 7. Определить начальную активность A_0 радиоактивного препарата магния ^{27}Mg массой $m = 0{,}2$ мкг, а также его активность A через время $t = 6$ ч. Период полураспада $T_{1/2}$ магния считать известным.

РЕШЕНИЕ. Активность A изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа dN ядер, распавшихся за интервал времени dt, к этому интервалу:

$$A = -dN/dt. \qquad (1)$$

Знак минус показывает, что число N радиоактивных ядер с течением времени убывает.

Для того чтобы найти dN/dt, воспользуемся законом радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \qquad (2)$$

где N - число радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, в момент времени t; N_0 - число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за начальный ($t = 0$); λ - постоянная радиационного распада.

Продифференцируем выражение (2) по времени:

$$dN/dt = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \qquad (3)$$

Исключив из формул (1) и (3) dN/dt, находим активность препарата в момент времени:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \qquad (4)$$

Начальную активность A_0 препарата получим при $t = 0$:

$$A_0 = \lambda N_0. \qquad (5)$$

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}. \qquad (6)$$

Число N_0 радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν данного изотопа:

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \qquad (7)$$

где m - масса изотопа; M - молярная масса.

С учетом выражений (6) и (7) формулы (5) и (4) принимают вид

$$A_0 = \frac{m}{M}\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A; \qquad (8)$$

$$A = \frac{m}{M}\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}t}. \qquad (9)$$

Произведем вычисления, учитывая, что $T_{1/2} = 10$ мин = 600 с (см. табл.16 приложения); $\ln = 0{,}693$; $t = 6$ ч = $6 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$ с = $2{,}16 \cdot 10^3$ с:

$$A_0 = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \frac{0{,}693}{600} 6{,}02 \cdot 10^{23}\ Бк = 5{,}13 \cdot 10^{12}\ Бк = 5{,}13\ ТБк.$$

$$A = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \frac{0{,}693}{600} 6{,}02 \cdot 10^{23} e^{-\frac{0{,}693}{600} 2{,}16 \cdot 10^4}\ Бк = 81{,}3\ Бк.$$

Пример 8. Расстояние d между соседними атомами кристалла кальция (решетка кубическая гранецентрированная) равно 0,393 нм. Определить: 1) параметр a решетки; 2) плотность ρ кристалла.

РЕШЕНИЕ. 1. Параметр a решетки и расстояние d между ближайшими соседними атомами связаны простым геометрическим соотношением (рис.2.2):

$$a = d\sqrt{2}.$$

Произведем вычисления:

$$a = 0{,}393\sqrt{2}\ \text{нм} = 0{,}556\ \text{нм} = 5{,}56 \cdot 10^{-10}\ \text{м}.$$

2. Плотность ρ кристалла связана с молярной массой M и молярным объемом V_m соотношением

$$\rho = M/V_m. \qquad (I)$$

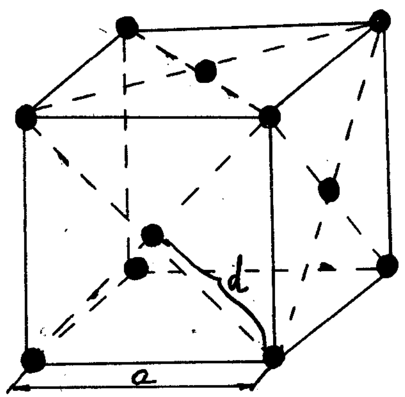

Рис.2.2

Молярный объем V_m найдем как произведение объема a^3 одной элементарной ячейки на число Z_m элементарных ячеек, содержащихся в одном моле кристалла:

$$V_m = a^3 Z_m. \qquad (2)$$

Учитывая, что число элементарных ячеек для кристалла, состоящего из одинаковых атомов, можно найти, разделив постоянную Авогадро N_A на число n атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку, равенство (2) можно записать в виде

$$V_M = a^3 N_A / n. \qquad (3)$$

Подставив в (I) выражение V_m из (2), получим

$$\rho = nM/(N_A a^3).$$

Произведем вычисления, учитывая, что число n в случае кубической гранецентрированной решетки равно 4:

$$\rho = \frac{4 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{6{,}02 \cdot 10^{23}(5{,}56 \cdot 10^{-10})^3}\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 1{,}55 \cdot 10^3\ \text{кг/м}^3.$$

П р и м е р 9. Удельная проводимость γ примесного полупроводника, имеющего решетку типа алмаза, равна 110 Ом/м. Считая, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью, определить: 1) концентрацию n_p дырок; 2) подвижность b_p дырок. Постоянную Холла R_H принять равной $3{,}8 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл.

РЕШЕНИЕ. 1. Концентрация n_p дырок связана с постоянной Холла, которая для полупроводников с решеткой типа алмаза, обладающих носителями только одного знака, выражается формулой $R_H = 3\pi/(8en_p)$, где e - элементарный заряд. Отсюда

$$n_p = 3\pi/(8eR_H). \qquad (I)$$

Произведем вычисления:

$$n_p = \frac{3 \cdot 3{,}14}{8}\ \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 3{,}8 \cdot 10^{-4}}\ \text{м}^3 = 1{,}9 \cdot 10^{22}\ \text{м}^{-3}. \qquad (2)$$

2. Удельная проводимость полупроводников выражается формулой

$$\gamma = e(n_n b_n + n_p b_p), \qquad (3)$$

где n_n и n_p - концентрации электронов и дырок; b_n и b_p - их подвижности.

При отсутствии электронной проводимости первое слагаемое в скобках равно нулю, и формула (3) примет вид $\gamma = e n_p b_p$, откуда

$$b_p = \gamma/(en_p). \qquad (4)$$

Подставим в (3) выражение n_p по формуле (I):

$$b_p = 8\gamma R_H/(3\pi). \qquad (5)$$

Произведем вычисления:

$$b_p = \frac{8 \cdot 110 \cdot 3{,}8 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 3{,}14}\ \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} = 3{,}6 \cdot 10^{-2}\ \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}).$$

Литература
для подготовки к выполнению контрольной работы 6

Тема	Основная: Савельев И.В. Курс общей физики. М., 1977-1979. Т.I	Т.2	Т.3	Дополнительная: Епифанов Г.И. Физика твердого тела. М., 1977.
Волны де Бройля. Соотношение неопределенностей.			§ I8-20	-
Уравнение Шредингера. Потенциальный ящик.			§ 21-23	-
Кристаллическая решетка. Структура кристалла.	§ II0, III			Гл.I, § I6, I9
Теплоемкость твердого тела.	§ II4		§ 46,48	Гл.IУ, § 30-33
Квантовая статистика. Распределение Ферми - Дирака. Электроны в металле.			§ 51,52	Гл.Ш; гл.IУ, § 34
Полупроводники. Эффект Холла		§ 79	§ 57-59	Гл.У, § 42-45
Магнетики		§ 55-58		Гл.УП, § 63-70

2.3. Контрольная работа № 6

2.3.I. Варианты заданий

Вариант	Номер задачи					
0	60I	6II	622	63I	660	66I
I	606	6I6	627	64I	659	666
2	602	6I2	623	632	658	662
3	607	6I7	628	642	657	667
4	603	6I3	624	633	656	663
5	608	6I8	629	643	655	668
6	604	6I4	625	634	654	664
7	609	6I9	630	644	653	669
8	605	6I5	626	635	652	665
9	6I0	620	62I	645	65I	670

60I. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны λ = I02,6 нм. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус r электронной орбиты возбужденного атома водорода.

602. Вычислить по теории Бора радиус r_2 второй стационарной орбиты и скорость v_2 электрона на этой орбите для атома водорода.

603. Вычислить по теории Бора период T вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом $n = 2$.

604. Определить максимальную энергию ε_{max} фотона серии Бальмера в спектре излучения атомарного водорода.

605. Определить первый потенциал φ_1 возбуждения и энергию ионизации E_i атома водорода, находящегося в основном состоянии.

606. Определить энергию ε фотона, испускаемого атомом водорода при переходе электрона с третьей орбиты на вторую.

607. Найти наибольшую λ_{max} и наименьшую λ_{min} длины волн в ультрафиолетовой серии водорода (серия Лаймана).

608. В однозарядном ионе гелия электрон перешел с третьего энергетического уровня на первый. Определить длину волны λ излучения, испущенного ионом гелия.

609. Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определить кинетическую T, потенциальную Π и полную E энергию электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

610. Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией $T = 10$ эВ. Определить энергию ε фотона.

611. Определить длину волны λ де Бройля для частицы массой $m = 1$ г, движущейся со скоростью $v = 10$ м/с. Нужно ли учитывать в этом случае волновые свойства частицы?

612. Вычислить длину волны λ де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией $T = 13{,}6$ эВ (энергия ионизации атома водорода). Сравнить полученное значение λ с диаметром d атома водорода (найти отношение λ/d). Нужно ли учитывать волновые свойства электрона при изучении движения электрона в атоме водорода? Диаметр атома водорода принять равным удвоенному значению боровского радиуса.

613. При анализе рассеяния α-частиц на ядрах (опыты Резерфорда) прицельные расстояния принимались порядка 0,1 нм. Волновые свойства α-частиц ($E = 7{,}7$ МэВ) при этом не учитывались. Допустимо ли это?

614. Вычислить длину волны λ де Бройля для тепловых ($T = 300$ К) нейтронов. Следует ли учитывать волновые свойства нейтронов при анализе их взаимодействия с кристаллом? Расстояние между атомами в кристалле принять равным 0,5 нм.

615. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти протон, чтобы длина волны λ де Бройля была равна: 1) 1 нм; 2) 1 пм?

616. Вычислить длину волны λ де Бройля протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U, равную: 1) 1 МВ; 2) 1 ГВ.

617. Протон обладает кинетической энергией $T = 1$ кэВ. Определить дополнительную энергию ΔT, которую необходимо

ему сообщить для того, чтобы длина волны λ де Бройля уменьшилась в три раза.

618. Определить длины волн де Бройля α-частицы и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ кВ.

619. Электрон обладает кинетической энергией $T = 1{,}02$ МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия T электрона уменьшится вдвое?

620. Кинетическая энергия T электрона равна удвоенному значению его энергии покоя $(2m_0c^2)$. Вычислить длину волны λ де Бройля для такого электрона.

621. Частица находится в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике. Найти отношение разности $\Delta E_{n,n+1}$ соседних энергетических уровней к энергии E_n частицы в трех случаях: 1) $n = 2$; 2) $n = 5$; 3) $n \to \infty$.

622. Используя соотношение неопределенностей, оценить наименьшие ошибки Δp в определении импульса электрона и протона, если координаты центра масс этих частиц могут быть установлены с неопределенностью $\Delta x = 0{,}01$ мм.

623. Время жизни τ возбужденного ядра порядка 1 нс, длина волны λ излучения равна 0,1 нм. С какой наибольшей точностью $\Delta\varepsilon$ может быть определена энергия излучения?

624. Частица в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность w обнаружения частицы в крайней четверти ящика?

625. Атом испустил фотон с длиной волны $\lambda = 800$ нм. Продолжительность излучения $\tau = 10$ нс. Определить наибольшую точность $\Delta\lambda$, с которой может быть измерена длина волны излучения.

626. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину l одномерного потенциального ящика, в котором минимальная энергия электрона $E_{min} = 10$ эВ.

627. Альфа-частица находится в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину l ящика, если известно, что минимальная энергия α-частицы $E_{min} = 8$ МэВ.

628. Электрон находится в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике шириной l. В каких точках в интервале $0 < x < l$ плотности вероятности нахождения электрона на втором и третьем энергетических уровнях одинаковы? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение пояснить графиком.

629. Электрон находится в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике шириной $l = 0{,}1$ нм. Определить в электронвольтах наименьшую разность энергетических уровней электрона.

630. Частица в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике шириной l находится в возбужденном состоянии ($n = 3$). Определить, в каких точках интервала $0 < x < l$ плотность вероятности нахождения частицы имеет максимальное и минимальное значения.

631. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{9}_{4}Be + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n .$$

Освобождается или поглощается энергия?

632. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n .$$

Освобождается или поглощается эта энергия?

633. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n .$$

Освобождается или поглощается эта энергия?

634. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{6}_{3}Li + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}p .$$

Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

635. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{7}_{4}Be + ^{1}_{0}n .$$

636. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{3}H(p,\gamma)^{4}He .$$

637. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{2}H(\alpha,\gamma)^{4}He .$$

638. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии $T = 0{,}51$ МэВ, при взаимодействии превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию ε каждого фотона и соответствующую ему длину волны λ.

639. Фотон с энергией $\varepsilon = 1{,}53$ МэВ превратился в пару электрон-позитрон. Принимая кинетическую энергию частиц одинаковой, определить кинетическую энергию T каждой частицы.

640. Вычислить энергию ядерной реакции

$$^{2}H(n,\gamma)^{3}H .$$

641. Найти период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа, если его активность за время $t = 10$ сут уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной.

642. Определить, какая доля радиоактивного изотопа $^{225}_{89}Ac$ распадается в течение времени $t = 6$ сут.

643. Активность A некоторого изотопа за время $t = 10$ сут уменьшилась на 20%. Определить период полураспада $T_{1/2}$ этого изотопа.

644. Определить массу m изотопа $^{131}_{53}I$, имеющего активность $A = 37$ ГБк.

645. Найти среднюю продолжительность жизни τ атома радиоактивного изотопа кобальта $^{60}_{27}Co$.

646. Счетчик α-частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал $N_1 = 1400$ частиц в минуту, а через время $t = 4$ ч – только $N_2 = 400$. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

647. Во сколько раз уменьшится активность препарата $^{32}_{15}P$ через время $t = 20$ сут ?

648. На сколько процентов уменьшится активность изотопа иридия $^{192}_{77}Ir$ за время $t = 15$ сут ?

649. Определить число N ядер, распадающихся в течение времени: 1) $t = 1$ мин; 2) $t = 5$ сут, в радиоактивном изотопе фосфора $^{32}_{15}P$ массой $m = 1$ мг.

650. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

651. Определить плотность ρ кальция (решетка гранецентрированная кубическая), если расстояние между ближайшими атомами d = 0,393 нм.

652. Стронций имеет гранецентрированную кубическую решетку. Определить расстояние d между ближайшими соседними атомами, если параметр решетки a = 0,605 нм.

653. Определить число z элементарных ячеек в единице объема кристалла бария (решетка объемно центрированная кубическая). Плотность ρ бария считать известной.

654. Найти плотность ρ кристалла неона, если известно, что решетка гранецентрированная кубическая. Постоянная решетки a = 0,451 нм.

√655. Барий имеет объемно центрированную кубическую решетку. Плотность ρ кристалла бария равна $3{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3. Определить параметр a решетки.

656. Алюминий имеет гранецентрированную кубическую решетку. Параметр решетки a = 0,404 нм. Определить плотность алюминия.

657. Ванадий имеет объемно центрированную кубическую решетку. Определить параметр a решетки и расстояние d между ближайшими соседними атомами. Плотность ρ ванадия считать известной.

658. Определить число z элементарных ячеек кристалла меди в единице объема (решетка гранецентрированная кубическая). Плотность ρ меди считать известной.

659. Расстояние d между ближайшими соседними атомами кристаллической решетки золота равно 0,288 нм. Определить параметр a решетки, если решетка гранецентрированная кубическая.

660. Никель имеет гранецентрированную кубическую решетку. Определить параметр a решетки и расстояние d между ближайшими соседними атомами. Плотность ρ никеля считать известной.

661. Удельная проводимость γ примесного полупроводника типа алмаза равна 110 Ом/м. Считая, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью, определить концентрацию n_p дырок и подвижность b_p дырок.

662. Собственный полупроводник (германиевый) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление ρ = 0,5 Ом·м. Определить концентрацию n носителей тока, если подвижность электронов b_n = 0,38 м^2/(В·с) и дырок b_p = = 0,18 м^2/(В·с).

663. Определить концентрацию свободных электронов в металле для температуры T = 0 К, при которой уровень Ферми ε_F = 6 эВ.

664. Тонкая пластинка из кремния шириной b = 2 см помещена перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля (B = 0,5 Тл). При плотности тока j = 2 мкА/мм^2, направленной вдоль пластины, холловская разность потенциалов оказалась U_H = 2,8 В. Определить концентрацию n носителей тока.

665. Определить максимальную скорость v_{max} электронов в металле при температуре T = 0 К, если уровень Ферми ε_F = = 5 эВ.

666. Полагая, что на каждый атом алюминия в кристалле приходится по три свободных электрона, определить максимальную энергию E_{max} электронов при температуре T = 0 К.

667. Найти среднее значение кинетической энергии $\langle \varepsilon_{кин} \rangle$ электронов в металле при температуре T = 0 К, если уровень Ферми E_F = 6 эВ.

√668. Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равна $b_n = 1{,}5 \cdot 10^3$ см^2/(В·с) и b_p $5 \cdot 10^2$ см^2/(В·с). Вычислить постоянную Холла R_H для кремния, если удельное сопротивление кремния $\rho = 6{,}2 \cdot 10^2$ Ом·м.

669. Удельное сопротивление кремния с примесями ρ = = 10^{-2} Ом·м. Определить концентрацию n_p дырок и их подвижность b_p, если принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью и постоянная Холла $R_H = 4 \cdot 10^{-4}$ м^3/Кл.

670. Концентрация n носителей в кремнии $5 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$, подвижность электронов b_n = 0,15 м^2/(В·с) и дырок b_p = = 0,05 м^2/(В·с). Определить сопротивление кремниевого стержня длиной l = 5 см и площадью сечения S = 2 мм^2.

Приложение

Таблица I

Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Нормальное ускорение свободного падения	g	$9,81$ м/с^2
Гравитационная постоянная	G	$6,67\cdot10^{-11}$ м^3/(кг·с^2)
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$
Молярная газовая постоянная	R	$8,31$ Дж/(моль·К)
Стандартный объем[x]	V_{pm}	$22,4\cdot10^{-3}$ м^3/моль
Постоянная Больцмана	k	$1,38\cdot10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	e	$1,60\cdot10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3,00\cdot10^{8}$ м/с
Постоянная Стефана - Больцмана	σ	$5,67\cdot10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4)
Постоянная закона смещения Вина	b	$2,90\cdot10^{-3}$ м·К
Постоянная Планка	h $\hbar$	$6,63\cdot10^{-34}$ Дж·с $1,05\cdot10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	R	$1,10\cdot10^{7}$ м$^{-1}$
Радиус Бора	a_0	$0,529\cdot10^{-10}$ м
Комптоновская длина волны электрона	Λ	$2,43\cdot10^{-12}$ м
Магнетон Бора	μ_B	$0,927\cdot10^{-23}$ А·м^2
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,18\cdot10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)
Атомная единица массы	а.е.м	$1,660\cdot10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ε_0	$8,85\cdot10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м

[x] Молярный объем идеального газа при нормальных условиях.

Таблица 2

Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение	Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37\cdot10^{6}$ м	Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49\cdot10^{11}$ м
Масса Земли	$5,98\cdot10^{24}$ кг		
Радиус Солнца	$6,95\cdot10^{8}$ м		
Масса Солнца	$1,98\cdot10^{30}$ кг	Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84\cdot10^{8}$ м
Радиус Луны	$1,74\cdot10^{6}$ м		
Масса Луны	$7,33\cdot10^{22}$ кг		

Таблица 3

Плотность твердых тел

Твердое тело	Плотность, кг/м³	Твердое тело	Плотность, кг/м³	Твердое тело	Плотность, кг/м³
Алюминий	$2,70\cdot10^{3}$	Железо	$7,88\cdot10^{3}$	Свинец	$11,3\cdot10^{3}$
Барий	$3,50\cdot10^{3}$	Литий	$0,53\cdot10^{3}$	Серебро	$10,5\cdot10^{3}$
Ванадий	$6,02\cdot10^{3}$	Медь	$8,93\cdot10^{3}$	Цезий	$1,90\cdot10^{3}$
Висмут	$9,80\cdot10^{3}$	Никель	$8,90\cdot10^{3}$	Цинк	$7,15\cdot10^{3}$

Таблица 4

Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м³
Вода (при 4° С)	$1,00\cdot10^{3}$
Глицерин	$1,26\cdot10^{3}$
Ртуть	$13,6\cdot10^{3}$
Сероуглерод	$1,26\cdot10^{3}$
Спирт	$0,80\cdot10^{3}$

Таблица 5

Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность, кг/м³
Водород	0,09
Воздух	1,29
Гелий	0,18
Кислород	1,43

Таблица 6

Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей

Жидкость	Коэффициент, мН/м
Вода	72
Мыльная вода	40
Ртуть	500
Спирт	22

Таблица 7

Эффективный диаметр молекулы газа

Газ	Диаметр, м
Азот	$3{,}0\cdot 10^{-10}$
Водород	$2{,}3\cdot 10^{-10}$
Гелий	$1{,}9\cdot 10^{-10}$
Кислород	$2{,}7\cdot 10^{-10}$

Таблица 8

Диэлектрическая проницаемость

Вещество	Проницаемость
Вода	81
Масло трансформаторное	2,2
Парафин	2,0
Стекло	7,0

Таблица 9

Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление, Ом·м
Железо	$9{,}8\cdot 10^{-8}$
Медь	$1{,}7\cdot 10^{-8}$
Нихром	$1{,}1\cdot 10^{-6}$
Серебро	$1{,}6\cdot 10^{-8}$

Таблица 10

Энергия ионизации

Вещество	E_i, Дж	E_i, эВ
Водород	$2{,}18\cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3{,}94\cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1{,}21\cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1{,}66\cdot 10^{-18}$	10,4

Таблица 11

Подвижность ионов в газах, $м^2/(В\cdot с)$

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	$1{,}27\cdot 10^{-4}$	$1{,}81\cdot 10^{-4}$
Водород	$5{,}4\cdot 10^{-4}$	$7{,}4\cdot 10^{-4}$
Воздух	$1{,}4\cdot 10^{-4}$	$1{,}9\cdot 10^{-4}$

Таблица 12

Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50

Таблица 13

Работа выхода электронов

Металл	A, Дж	A, эВ
Калий	$3{,}5\cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3{,}7\cdot 10^{-19}$	2,3
Платина	$10\cdot 10^{-19}$	6,3
Рубидий	$3{,}4\cdot 10^{-19}$	2,1
Серебро	$7{,}5\cdot 10^{-19}$	4,7
Цезий	$3{,}2\cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6{,}4\cdot 10^{-19}$	4,0

Таблица I4

Относительные атомные массы (округленные значения) и порядковые номера Z некоторых элементов

Элемент	Символ	A	Z	Элемент	Символ	A	Z
Азот	N	I4	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	I3	Медь	Cu	64	29
Аргон	Ar	40	I8	Молибден	Mo	96	42
Барий	Ba	I37	56	Натрий	Na	23	II
Ванадий	V	60	23	Неон	Ne	20	I0
Водород	H	I	I	Никель	Ni	59	28
Вольфрам	W	I84	74	Олово	Sn	II9	50
Гелий	He	4	2	Платина	Pt	I95	78
Железо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	20I	80
Золото	Au	I97	79	Сера	S	32	I6
Калий	K	39	I9	Серебро	Ag	I08	47
Кальций	Ca	40	20	Уран	U	238	92
Кислород	O	I6	8	Углерод	C	I2	6
Магний	Mg	24	I2	Хлор	Cl	35	I7

Таблица I5

Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.
Нейтрон	$^{1}_{0}n$	I,00867	Бор	$^{10}_{5}B$	I0,0I294
Водород	$^{1}_{1}H$	I,00783		$^{11}_{5}B$	II,00930
	$^{2}_{1}H$	2,0I4I0	Углерод	$^{12}_{6}C$	I2,00000
	$^{3}_{1}H$	3,0I605		$^{13}_{6}C$	I3,00335
Гелий	$^{3}_{2}He$	3,0I603		$^{14}_{6}C$	I4,00324
	$^{4}_{2}He$	4,00260	Азот	$^{14}_{7}N$	I4,00307
Литий	$^{6}_{3}Li$	6,0I5I3	Кислород	$^{16}_{8}O$	I5,9949I
	$^{7}_{3}Li$	7,0I60I		$^{17}_{8}O$	I6,999I3
Бериллий	$^{7}_{4}Be$	7,0I693			
	$^{9}_{4}Be$	9,0I2I9			

Таблица I6

Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада	Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	$^{225}_{89}Ac$	I0 сут	Йод	$^{131}_{53}I$	8 сут
Кобальт	$^{60}_{27}Co$	5,3 года	Стронций	$^{90}_{38}Sr$	27 лет
Магний	$^{27}_{12}Mg$	I0 мин	Фосфор	$^{32}_{15}P$	I4,3 сут
Радий	$^{226}_{88}Ra$	I620 лет	Церий	$^{144}_{58}Ce$	285 сут
Радон	$^{222}_{86}Rn$	3,8 сут			

Таблица I7

Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	m_0, кг	m_0, а.е.м.	E_0, Дж	E_0, МэВ
Электрон	$9{,}II \cdot I0^{-3I}$	0,00055	$8{,}I6 \cdot I0^{-I4}$	0,5II
Протон	$I{,}672 \cdot I0^{-27}$	I,00728	$I{,}50 \cdot I0^{-I0}$	938
Нейтрон	$I{,}675 \cdot I0^{-27}$	I,00867	$I{,}5I \cdot I0^{-I0}$	939
Дейтрон	$3{,}35 \cdot I0^{-27}$	2,0I355	$3{,}00 \cdot I0^{-I0}$	I876
α-частица	$6{,}64 \cdot I0^{-27}$	4,00I49	$5{,}96 \cdot I0^{-I0}$	3733
Нейтральный π-мезон	$2{,}4I \cdot I0^{-28}$	0,I4498	$2{,}I6 \cdot I0^{-II}$	I35

Таблица I8

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение	
Экса	Э	10^{18}
Пэта	П	10^{15}
Тера	Т	10^{12}
Гига	Г	10^{9}
Мега	М	10^{6}
Кило	к	10^{3}
Гекто	г	10^{2}
Дека	да	10^{1}
Деци	д	10^{-1}
Санти	с	10^{-2}
Милли	м	10^{-3}
Микро	мк	10^{-6}
Нано	н	10^{-9}
Пико	п	10^{-12}
Фемто	ф	10^{-15}
Атто	а	10^{-18}

Таблица I9

Внесистемные единицы, допущенные к применению в учебном процессе по физике (в соответствии с СТ СЭВ I052-78)

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицами Международной системы единиц (СИ)
Время[x]	Минута,	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Плоский угол	Градус	...°	$(\pi/180)$ рад = $= 1{,}74\cdot10^{-2}$ рад
	минута	...′	$(\pi/10800)$ рад = $= 2{,}91\cdot10^{-4}$ рад
	секунда	...″	$(\pi/648000)$ рад = $= 4{,}85\cdot10^{-6}$ рад
Объем, вместимость	Литр	л	10^{-3} м^3
Энергия	Электронвольт	эВ	$1{,}60\cdot10^{-19}$ Дж
Масса	Тонна	т	1000 кг
	Атомная единица массы	а.е.м.	$1{,}66\cdot10^{-27}$ кг
Оптическая сила	Диоптрия	дптр	1 м$^{-1}$
Относительная величина	Процент	%	10^{-2}
	Промиле	‰	10^{-3}
	Миллионная доля	млн$^{-1}$	10^{-6}
Логарифмическая величина	Бел	Б	-
	Децибел	дБ	-

[x]Допускается применение других единиц времени, получивших широкое распространение, например, неделя, месяц, год и пр.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Оптика 3

I.I. Основные формулы 3

I.2. Примеры решения задач 7

I.3. Контрольная работа № 5 .... I7

2. Физика атомов и атомного ядра. Элементарные частицы. Основы квантовой механики. Физика твердого тела 24

2.I. Основные формулы 24

2.2. Примеры решения задач 32

2.3. Контрольная работа № 6 45

Приложение 52