

# **ФИЗИКА**

**ОПТИКА. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА.  
АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

*Методические указания и контрольные задания  
для самостоятельной работы студентов  
бакалавриата направления 15.03.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

# ФИЗИКА

ОПТИКА. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА.  
АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

*Методические указания и контрольные задания  
для самостоятельной работы студентов  
бакалавриата направления 15.03.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020

УДК 537.311.33 (073)

**ФИЗИКА. Оптика. Элементы физики твёрдого тела. Атомная и ядерная физика.** Методические указания и контрольные задания для самостоятельной работы / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Т.В. Стоянова, В.В. Томаев*, СПб, 2020. 45 с.

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования к их содержанию.

В методических указаниях к практическим занятиям представлены: краткое теоретическое содержание разделов волновой оптики, атомной физики, квантовой механики, квантовой статистики, физики твёрдого тела общего курса физики, рекомендации к решению и оформлению задач, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения и справочные материалы.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», а также могут быть использованы для практических занятий студентов, изучающих данные разделы в рамках учебной дисциплины «Физика», в соответствии с программами подготовки специалистов и бакалавров инженерно-технических направлений всех форм обучения.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*

Рецензент канд. физ.-мат. наук *А.В. Черняев* (ФТИ имени А.Ф.Иоффе)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2020 г.

## **1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ**

Основой обучения студента является самостоятельная работа с учебниками и учебными пособиями.

Для успешного освоения курса физики необходимо выполнять следующие рекомендации:

1. Занятия по курсу общей физики проводить по рабочей программе последовательно, а главное – систематически.

2. Изучив один раздел курса, выполнить самостоятельную работу по этому разделу.

3. Составлять краткий конспект разделов курса, в котором записывать основные законы, определения физических величин и единицы их измерения.

## **2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

1. Студент должен представить преподавателю выполненную самостоятельную работу в установленный календарным планом срок.

2. Самостоятельные работы выполняются на скреплённых листах формата А4.

3. Условие задачи переписывается полностью без сокращений.

4. В конце самостоятельной работы необходимо привести список учебников и учебных пособий, которыми пользовался студент при решении задач.

5. Если самостоятельная работа не зачтена, то студент должен заново решить те задачи, по которым были получены ошибочные результаты, и представить самостоятельную работу на повторное рецензирование.

## **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ**

Для выполнения самостоятельной работы студент должен:

1. Усвоить соответствующий раздел курса, пользуясь учебниками и учебными пособиями. Главное внимание обратить на основные физические законы и соотношения.

2. Выполнить решение задач в общем виде, т.е. в буквенных обозначениях.

3. При необходимости выполнить чертеж.

4. Решение задачи сопровождать краткими пояснениями и ссылками на основные физические законы.

5. Перед проведением численного расчета выполнить проверку размерности результата. Убедиться в том, что размерности левой и правой частей окончательной формулы одинаковы. Если такого соответствия нет, то это означает, что формула выведена неверно.

6. Числовые значения величин при подстановке их в расчетную формулу, а также ответ, следует выражать в единицах СИ. Окончательный ответ, где это требуется, представляется в единицах, которые являются общеупотребительными в соответствующем разделе физики.

7. Провести вычисление искомой величины. При необходимости – использовать справочные данные.

8. Окончательный численный результат представить в нормализованном виде, т.е. в виде произведения десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти (например, вместо 5261 необходимо записать  $5,261 \cdot 10^3$ ). Ответ должен содержать наименование физической величины, ее численное значение и размерность.

## **4. УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **4.1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

Длина волны, скорость электромагнитной волны в вакууме  $c$  и частота  $\nu$ , связаны соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (1)$$

Если электромагнитная волна (в частном случае – световая) распространяется в некоторой среде с показателем преломления  $n$  то скорость волны:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (2)$$

Оптическая длина пути луча:

$$L = n\ell, \quad (3)$$

где  $\ell$  – геометрическая длина пути.

Оптическая разность хода двух световых лучей:

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1\ell_1 - n_2\ell_2. \quad (4)$$

При сложении колебаний двух лучей с оптической разностью хода кратной целой длине волны происходит их взаимное усиление. Условие взаимного усиления (условие максимума):

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (k=0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

При сложении колебаний двух лучей с оптической разностью хода кратной нечетному количеству половин длин волн происходит их взаимное ослабление. Условие взаимного ослабления (условие минимума):

$$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, \dots). \quad (6)$$

Наблюдаемая визуально интерференционная картина состоит из чередующихся светлых и темных полос, причем светлым полосам соответствуют условия взаимного усиления лучей, темным условия взаимного ослабления. Если в установке происходят какие-либо изменения, приводящие к плавному увеличению или уменьшению разности хода лучей, то наблюдаемая интерференционная картина плавно смещается. Смещению на  $m$  полос соответствует изменение разности хода на  $m$  длин волн.

При отражении луча от оптически более плотной среды (т.е. от среды с более высоким показателем преломления  $n$ ), происходит изменение фазы колебаний на  $\pi$ , что соответствует изменению в оптической длине пути этого луча на  $\pm \frac{\lambda}{2}$ . При отражении от менее плотной среды изменения фазы колебаний не происходит.

Оптическая разность хода лучей, полученных за счет отражения от тонкой прозрачной пластинки:

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

где  $b$ ,  $n$  – соответственно толщина пластинки и показатель преломления материала пластинки;  $i$  – угол падения луча на пластинку.

Радиусы светлых колец Ньютона при отражении или тёмных колец при прохождении света:

$$r = \sqrt{\frac{R\lambda}{2}}(m-1) \quad (m = 2, 3), \quad (8)$$

где  $R$  – радиус кривизны линзы. Радиусы тёмных колец Ньютона при отражении или светлых колец при прохождении света:

$$r = \sqrt{R\lambda m} \quad (m = 1, 2, 3), \quad (8)$$

Если между линзой и плоской пластинкой находится прозрачное вещество с показателем преломления  $n$ , то длина волны, по сравнению с длиной волны в вакууме уменьшается в  $n$  раз.

Основная формула дифракционной решетки:

$$d \cdot \sin \phi = k\lambda, \quad (k = 0; \pm 1; \pm 2 \dots), \quad (9)$$

где  $d$  – период решетки;  $\phi$  – угол дифракции;  $k$  – порядок дифракции;  $\lambda$  – длина волны.

Разрешающая способность дифракционной решетки определяется формулой:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN, \quad (10)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$  – длины волн разрешаемых (т.е. видимых отдельно) спектральных линий;  $k$  – порядок дифракции;  $N$  – общее число щелей в дифракционной решетке.

Разрешающая способность объектива (критерий Рэлея):

$$R = \frac{1}{\alpha} = \frac{D}{1,22\lambda}, \quad (11)$$

где  $D$  – диаметр объектива;  $\alpha$  – минимальный угол между пучками света;  $\lambda$  – длина световой волны.

Разрешающая способность микроскопа, определяется как минимальное расстояние  $d$ , различимое с помощью микроскопа:

$$d \approx \frac{0,61\lambda}{n \sin \phi}, \quad (12)$$

где  $\phi$  – половина угла между лучами, идущими от точки на поверхности рассматриваемого предмета к краям объектива;  $n$  – показатель преломления прозрачного вещества, заполняющего пространство между предметом и объективом.

Закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (13)$$

где  $I$  – световой поток, прошедший через поляризационный анализатор;  $I_0$  – падающий на анализатор, причем падающий поток света линейно поляризован;  $\alpha$  – угол между направлениями плоскости поляризации падающего светового пучка, и направлением главной плоскости анализатора.

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{12} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (13)$$

где  $i_B$  – угол Брюстера (минимальный угол падения светового луча, при котором отраженный луч полностью поляризован, т.е. имеет линейную поляризацию);  $n_{12}$  – относительный показатель преломления второй среды, относительно первой;  $n_1, n_2$  – показатели преломления первой и второй сред соответственно. Луч света падает из первой среды на границу со второй.

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



$$\varphi = \alpha \cdot d \text{ (в твердых телах)}, \quad (14)$$

где  $\alpha$  – постоянная вращения;  $d$  – длина пути света в оптически активном веществе.

$$\varphi = [\alpha] \rho \cdot d \text{ (в растворах)}, \quad (15)$$

где  $[\alpha]$  – удельное вращение оптически активного вещества,  $\rho$  – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Полное внутреннее отражение наблюдается при падении луча света из оптически плотной среды на границу с оптически менее плотной средой. При углах больших или равных предельному углу осуществляется полное отражение (без преломленного луча). Предельный угол определяется следующим образом:

$$\sin i_{\text{пред}} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (16)$$

где  $n_2$  – показатель преломления более плотной среды,  $n_1$  – менее плотной среды.

Закон поглощения света (закон Бугера):

$$I = I_0 e^{-\mu \ell}, \quad (17)$$

где  $I$  – интенсивность света, прошедшего слой поглощающего свет вещества толщиной  $\ell$ ;  $I_0$  – интенсивность света падающего на слой;  $\mu$  – линейный коэффициент поглощения.

## 4.2. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Энергия фотона (формула Планка):

$$E = \hbar \omega, \quad (18)$$

где  $\hbar$  – приведённая постоянная Планка;  $\omega$  – циклическая частота фотона. Частота  $\omega$ , выраженная в (рад/с) и частота  $\nu$ , выраженная в (Гц) связаны между собой соотношением:

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (19)$$

Формула Эйнштейна (закон пропорциональности массы и энергии):

$$E = mc^2. \quad (20)$$

Масса фотона:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2}. \quad (21)$$

Импульс фотона:

$$p = mc = \frac{\hbar\omega}{c}. \quad (22)$$

Формула де-Бройля:

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}, \quad (23)$$

где  $\vec{p}$  – импульс частицы (в частном случае это импульс фотона);  $\vec{k}$  – волновой вектор, направление которого совпадает с направлением движения частицы (или фотона), а модуль равен:

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (24)$$

где  $\lambda$  – длина волны (если анализируется движение частицы, то  $\lambda$  называют длиной волны де-Бройля, если изучаются световые явления, то  $\lambda$  – длина световой волны).

Длина волны де-Бройля для частицы массы  $m$  связана с её энергией  $E$  следующим образом:

$$\lambda = h \frac{1}{\sqrt{2mE}}. \quad (25)$$

Закон Стефана – Больцмана:

$$R = \sigma T^4, \quad (26)$$

где  $R$  – энергетическая светимость источника теплового излучения [ $\text{Вт}/\text{м}^2$ ];  $T$  – абсолютная температура теплового излучателя.

Постоянная закона Стефана – Больцмана:

$$\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \quad (27)$$

Закон смещения Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (28)$$

где  $\lambda_m$  – длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности мощности теплового излучения;  $T$  – абсолютная температура излучателя;  $b$  – постоянная ( $b = 2,89782 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ).

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\hbar\omega = A + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2}, \quad (29)$$

где  $A$  – работа выхода электрона;  $m$  – масса фотоэлектрона;  $v_{\text{max}}$  – максимальная скорость фотоэлектрона.

Эффект Комптона заключается в изменении длины волны и направления движения рентгеновского или  $\gamma$ -квантов при упругом столкновении со свободным неподвижным электроном. Изменение длины волны:

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc} (1 - \cos\theta), \quad (30)$$

где  $\theta$  – угол рассеяния кванта;  $m$  – масса частицы на которой происходит рассеяние рентгеновского (или  $\gamma$ -кванта);  $c$  – скорость света.

Энергия рентгеновского (или  $\gamma$ -кванта) после столкновения:

$$E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma_0}}{1 + \frac{E_{\gamma_0}}{mc^2}(1 - \cos\theta)}, \quad (31)$$

где  $E_{\gamma_0}$  – энергия кванта до столкновения.

Стационарное уравнение Шредингера

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U \right\} \psi = E\psi, \quad (32)$$

где  $m$  – масса частицы;  $U$  – потенциальная энергия этой частицы;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $E$  – энергия частицы;  $\psi(x, y, z, t)$  – волновая функция частицы.

В уравнении Шредингера физические условия определяются заданием потенциальной энергии. Решение уравнения ищется с учетом граничных параметров для волновой функции и ограничений, накладываемых на ее свойства. Решение уравнения Шредингера для одномерной, бесконечно глубокой, прямоугольной потенциальной ямы (соответствует движению частицы между упруго отражающими недеформируемыми параллельными стенками):

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{d}} \sin\left(\frac{\pi n}{d} x\right) \quad (33)$$

где  $d$  – расстояние между стенками;  $n$  – квантовое число ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );  $x$  – координата, отсчитанная от одной из стенок  $0 \leq x \leq d$ . Возможные значения энергии частицы будут:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2md^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (34)$$

где  $m$  – масса частицы.

Плотность вероятности обнаружения частицы внутри потенциального ящика будет:

$$|\psi|^2 = \frac{2}{d} \sin^2\left(\frac{\pi n}{d} x\right) \quad 0 \leq x \leq d \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (35)$$

Длины волн излучаемых атомом водорода определяются по формуле:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad (36)$$

где  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга;  $n_1$  и  $n_2$  – главные квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается электронный переход в атоме  $n_2 < n_1$ .

Длина волн излучаемых водородоподобными ионами с зарядовым числом ядра  $z$  (число  $z$  определяется по номеру химического элемента в таблице Менделеева), могут быть рассчитаны по формуле:

$$\frac{1}{\lambda} = Rz^2 \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right). \quad (37)$$

#### 4.3. КВАНТОВАЯ СТАТИСТИКА И ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Уровень Ферми в собственном (беспримесном) полупроводнике:

$$E_F = E_V + \frac{1}{2} \Delta E + \frac{3}{4} kT \ln \left( \frac{m_p}{m_e} \right), \quad (38)$$

где  $E_V$  – энергия потолка валентной зоны,  $m_p$  – эффективная масса дырок,  $m_e$  – эффективная масса электронов;  $\Delta E$  – ширина запрещённой зоны;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

Удельная проводимость полупроводников:

$$\gamma = en(\mu_n + \mu_p), \quad (39)$$

где  $e$  – величина элементарного заряда (электрона или дырки);  $n$  – концентрация носителей заряда (электронов или дырок);  $\mu_n$  – подвижность электронов,  $\mu_p$  – подвижность дырок.

Температурная зависимость удельной проводимости собственных (беспримесных) полупроводников:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-\Delta E / 2kT), \quad (40)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $\Delta E$  – ширина запрещённой зоны для собственных (беспримесных) полупроводников,  $T$  – температура;  $\gamma_0$  – удельная проводимость при  $\Delta E / 2kT \ll 1$ .

Напряжение Холла:

$$U_H = R_H \cdot I \cdot B \quad (41)$$

где  $R_H$  – константа Холла,  $I$  – сила тока,  $B$  – магнитная индукция.

Константа Холла для полупроводников типа кремния, германия и др., обладающих носителями одного вида ( $n$  или  $p$ ):

$$R_H = \frac{1}{en}, \quad (42)$$

где  $n$  – концентрация носителей заряда;  $e$  – заряд электрона (или дырки).

Уровень Ферми в металле при  $T = 0$  К:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3} \quad (43)$$

где  $n$  – концентрация электронов,  $m$  – масса электрона.

Распределение Ферми по энергиям для свободных электронов в металле при  $T = 0$  К:

$$dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E} dE \quad (\text{при } E < E_F) \quad (44)$$

где  $dn(E)$  – концентрация электронов, энергия которых заключена в интервале от  $E$  до  $E + dE$ . Соответственно,  $m$  и  $E$  – масса и энергия электрона.

#### 4.4. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Ядро химического элемента в общем случае обозначается:  ${}^A_Z X$ , где  $X$  – символ химического элемента (например, для гелия – He);  $Z$  – зарядовое число ядра, которое равно числу протонов в ядре атома или номеру химического элемента в таблице Менделеева;  $A$  – массовое число ядра, равное суммарному числу протонов и нейтронов в ядре атома;  $\alpha$ -частица является ядром атома гелия, но по традиции обозначается греческой буквой  $\alpha$ ; ее полное обозначение  ${}^4_2\alpha$ .  $\beta$ -частица является электроном, испущенным ядром атома при радиоактивном распаде, ее полное обозначение  ${}^0_{-1}\beta$ . Для электрона иного происхождения используется символ  ${}^0_{-1}e$ . Протон и нейтрон соответственно имеют обозначения  ${}^1_1p$  и  ${}^1_0n$ .

Радиус ядра может быть приближенно оценен по формуле:

$$R_{\text{я}} \cong 1,4 \cdot 10^{-15} A^{\frac{1}{3}} [\text{м}], \quad (45)$$

где  $A$  – массовое число ядра.

Дефект массы ядра определяется по формуле:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}, \quad (46)$$

где  $Z$  и  $A$  – зарядовое и массовое числа ядра;  $m_p$ ,  $m_n$  и  $M_{\text{я}}$  – соответственно массы протона, нейтрона и ядра атома.

Дефект массы ядра позволяет рассчитать энергию связи нуклонов в ядре (нуклон – термин, обозначающий как нейтрон, так и протон):

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2. \quad (47)$$

Удельная энергия связи ядра определяет энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре:

$$E_{\text{уд.св.}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}. \quad (48)$$

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (49)$$

где  $N$  – число не распавшихся ядер к моменту времени  $t$ ;  $N_0$  – число атомов радиоактивного элемента в начальный момент времени;  $\lambda$  – постоянная распада (вероятность распада одного атома в течение одной секунды).

Для небольших промежутков времени ( $\Delta t \ll \frac{1}{\lambda}$ ) число распавшихся атомов за время  $\Delta t$ , будет:

$$\Delta N = \lambda \cdot N \cdot \Delta t. \quad (50)$$

Распад ядер может характеризоваться, кроме постоянной распада, также периодом полураспада  $\tau_{1/2}$  (т.е. временем распада половины атомов радиоактивного препарата) и средним временем жизни  $\tau$  радиоактивного препарата:

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}; \quad \tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (51)$$

Активность радиоактивного препарата  $A^*$  определяется числом ядер, распавшихся в одну секунду:

$$A^* = \lambda N. \quad (52)$$

Величина  $A^*$  в системе СИ измеряется в беккерелях [Бк]. Беккерель соответствует одному распаду в секунду. Имеется внесистемная единица активности Кюри [Ки], которая соответствует  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов/сек. (т.е.  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк).

При радиоактивном равновесии выполняется соотношение:



$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2, \quad (53)$$

где индекс «1» относится к материнскому веществу, а индекс «2» – к дочернему.

При  $\alpha$ -распаде происходит радиоактивное превращение, которое записывается следующим образом:



При  $\beta^-$ -распаде:



где  ${}^0_0 \tilde{\nu}$  – электронное антинейтрино, выбрасываемое ядром одновременно с  $\beta$ -частицей.

При  $\beta^+$ -распаде:



где  ${}^0_0 \nu$  – электронное нейтрино, выбрасываемое ядром одновременно с  $\beta$ -частицей.

При электронном захвате радиоактивное превращение записывается в следующем виде:



При радиоактивном распаде выделяется энергия, которая может быть определена по балансу масс частиц, имеющих до и после радиоактивного распада.

При  $\alpha$ -распаде выделяется энергия :

$$\Delta E = c^2 (M_x - (M_y + m_\alpha)), \quad (58)$$

где массы ядер  $M_x$  до распада и  $M_y$  – образующихся после распада;  $m_\alpha$  – масса  $\alpha$ -частицы.

Замечание: в последнем соотношении можно вместо масс ядер использовать массы атомов: исходного, образующегося и атома гелия.

Выделившаяся при  $\alpha$ -распаде энергия распределяется между  $\alpha$ -частицей и ядром отдачи в соответствии с законом сохранения импульса и энергии.

При  $\beta$ -распаде выделяется энергия:

$$\Delta E = c^2(M_x - (M_y + m_\beta)) \quad (59)$$

где  $M_x$ ,  $M_y$  – массы исходного и образующегося при распаде ядер;  $m_\beta$  – масса  $\beta$ -частицы.

Для расчётов в последнем соотношении удобно использовать массы атомов, а не ядер. Выделившаяся энергия в этом случае определяется соотношением

$$\Delta E = c^2(M_x - M_y). \quad (60)$$

Заметим, что масса  $\beta$  – частицы (электрона) в этом случае автоматически учитывается в  $M_y$ , т.к. число электронов в этом атоме на один больше чем в исходном атоме.

Возраст горной породы может быть рассчитан по формуле:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{N_{\text{кон}}}{N_{\text{исх}}} + 1 \right), \quad (61)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада исходного радиоактивного элемента;  $N_{\text{исх}}$ ;  $N_{\text{кон}}$  – соответственно число ядер долгоживущего радиоактивного элемента в анализируемом образце горной породы и число ядер стабильного конечного элемента, накопившегося в этом образце горной породы к моменту определения возраста.

Длина пробега  $\alpha$ -частиц в веществе:

$$R_\alpha \cong 4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{\rho} E_\alpha^{3/2}. \quad (62)$$

где  $R_\alpha$  – длина пробега в сантиметрах;  $\rho$  – плотность вещества в г/см<sup>3</sup>;  $E_\alpha$  – начальная энергия  $\alpha$ -частиц в МэВ.

Любая радиоактивная заряженная частица при движении в веществе ионизирует атомы и молекулы, причем на создание одной пары элементарных зарядов ион-электрон в среднем приблизительно тратится 34 эВ энергии.

Уровень радиоактивности может быть определен либо по ионизационному эффекту, т.е. по величине электрического заряда, который создает радиоактивное излучение в определенной массе вещества, либо по поглощенной энергии в определенной массе вещества. В первом случае величина, характеризующая уровень радиоактивности, называется экспозиционной дозой, во втором – поглощенной дозой.

В системе СИ единицей экспозиционной дозы является Зиверт [Зв] (Кл/кг); единицей поглощенной дозы является Грей [Гр] (Дж/кг). Очень часто используется внесистемная единица экспозиционной дозы: Рентген (доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, соответствующая образованию в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха, находящегося при нормальных условиях,  $2,08 \cdot 10^9$  пар электрон-ион).

## 5. ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### Пример 1.

Скорость света в алмазе составляет  $1,25 \cdot 10^8$  м/с. Под каким углом должен падать луч света из алмаза на границу с воздухом, чтобы происходило полное внутреннее отражение луча? Какова величина показателя преломления алмаза?

Дано

$$V = 1,25 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

(скорость света в алмазе)

Найти

$$i_{\text{пред}} - ?$$

$$n - ?$$

Решение:

Показатель преломления алмаза получим, используя формулу для скорости света в прозрачном веществе:

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

где  $c$  – скорость света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с по справочным данным). Менее плотной средой в задаче является воздух. Показатель преломления воздуха  $n_1 = 1$ . Более плотной средой является алмаз. Показатель преломления для него  $n_2 = n$ . Величина предельного угла полного внутреннего отражения определяется следующим соотношением:

$$\sin i_{\text{пред}} = \frac{1}{n}$$

Подставляя значение показателя преломления в последнее соотношение, получим:

$$\sin i_{\text{пред}} = \frac{V}{c}$$

Проверка размерности: правая и левая части выражения безразмерны. Окончательные формулы для расчета предельного угла полного внутреннего отражения и показателя преломления:

$$i_{\text{пред}} = \arcsin \frac{V}{c} \quad n = \frac{c}{V}$$

Численный расчет предельного угла полного внутреннего отражения:

$$i_{\text{пред}} = \arcsin \frac{1,25 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^8} = \arcsin 0,41 = 24,5^0$$

Показатель преломления алмаза:

$$n = \frac{3 \cdot 10^8}{1,25 \cdot 10^8} = 2,4$$

Ответ:  $i_{\text{пред}} = 24,5^0$ ;  $n = 2,4$

### Пример 2.

Определить уровень Ферми при температуре ( $227^\circ\text{C}$ ), в собственном (беспримесном) полупроводнике, если энергия активации (ширина запрещённой энергетической зоны)  $\Delta E$  равна  $0,56$  эВ. За нулевой

уровень отсчёта энергии электронов принять уровень потолка валентной зоны. Эффективная масса дырок в 10 раз больше эффективной массы электронов.

Дано:

$$\begin{aligned} \Delta E &= 0,56 \text{ эВ} = \\ &= 0,56 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = \\ &= 0,89 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \end{aligned}$$

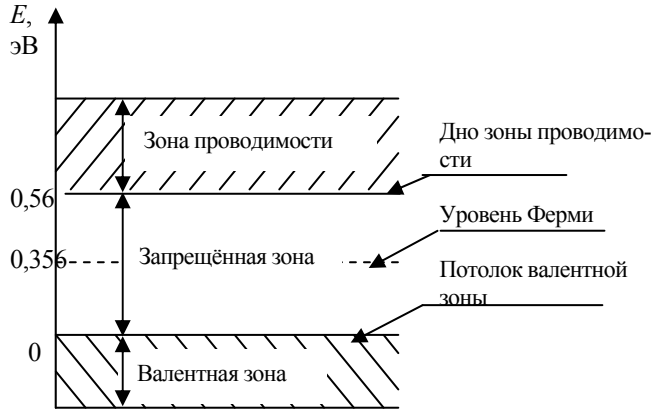
$$\frac{m_p}{m_e} = 10$$

$$\begin{aligned} T &= 273,15 + 227 = \\ &= 500,15 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$E_V = 0$$

Найти:

$$E_F = ?$$



### Решение:

Уровень Ферми в собственном полупроводнике:

$$E_F = E_V + \frac{1}{2} \Delta E + \frac{3}{4} kT \ln \left( \frac{m_p}{m_e} \right)$$

По условию  $E_V = 0$ , тогда:

$$E_F = \frac{1}{2} \Delta E + \frac{3}{4} kT \ln \left( \frac{m_p}{m_e} \right)$$

Проверка размерности:

$$[\text{Дж}] = \text{Дж} + \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \text{К} = \text{Дж} + \text{Дж} = \text{Дж}$$

Размерность правой и левой частей окончательной формулы совпадают.

Численный расчёт:

$$E_F = \frac{1}{2} 0,89 \cdot 10^{-19} + \frac{3}{4} 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 500,15 \cdot \ln(10) = 0,57 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,356 \text{ эВ}$$

Ответ: уровень Ферми 0,356 эВ.

Использованная литература:

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики.-М.: Наука, -2009.- Т. 2, 3.
2. *Епифанов Г. И., Мома Ю. А.* Твердотельная электроника. - М.: Высшая школа, 1986.

## 6. ЗАДАЧИ ВАРИАНТ № 1

1. Какова должна быть минимальная толщина мыльной пленки, если при наблюдении ее в отраженном свете при угле падения 30 градусов она представляется зеленой (длина волны 550 нм)? Показатель преломления мыльной пленки 1,33.

2. Найти радиус кривизны линзы, если при наблюдении колец Ньютона, расстояние между вторым и третьим светлыми кольцами в отраженном свете равно 0,5 мм, освещение производится светом с длиной волны 550 нм.

3. В интерферометре Жамена на пути интерферирующих лучей помещены две одинаковые трубки, закрытые прозрачными пластинками. Одна заполнена воздухом при нормальных условиях, а из другой он выкачан. Найдите показатель преломления воздуха, если длина трубок 5 см и при выкачивании воздуха интерференционная картина сместилась на 20 полос. Для наблюдения использован монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,73$  мкм.

4. Определить длину волны спектральной линии в спектре 3-го порядка дифракционной решетки, если она совпадает с линией с длиной волны 481 нм в спектре 4 порядка этой решетки.

5. Определить наименьшее расстояние между двумя точками образца горной породы, наблюдаемого в микроскоп. Угол, под которым лучи из рассматриваемого участка образца попадают на края объектива микроскопа, равен  $\pi/2$  (апертурный угол). Освещение среза производится зелёным светом ( $\lambda = 550$  нм). Как изменится величина наименьшего расстояния, если пространство между рассматриваемым предметом и

объективом заполнить иммерсионной жидкостью с показателем преломления 1,5.

6. Пучок света падает нормально на пластину кварца, вырезанную параллельно оптической оси. Определить разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей, прошедших через пластинку толщиной 0,4 мм, если их показатели преломления равны соответственно 1,54426 и 1,55337.

7. Определить в джоулях и электрон-вольтах работу выхода электрона из цезия и серебра, если при облучении электромагнитными волнами с длинами волн 660 нм и 260 нм соответственно, электроны покидают эти металлы практически с нулевой скоростью.

8. Поток энергии, излучаемый из смотрового окошка плавильной печи, равен 34 Вт. Определить температуру печи, если площадь отверстия равна 8 см<sup>2</sup>. Смотровое окошко печи излучает как чёрное тело.

9. Удельная проводимость беспримесного полупроводника равна 112 (Ом·м)<sup>-1</sup>. Определить подвижность дырок и их концентрацию, если постоянная Холла  $R_H = 3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

10. Определить концентрацию  $n$  свободных электронов в металле при температуре  $T = 0 \text{ К}$ . Энергию Ферми принять равной 4 эВ.

11. Сколько атомов радия распадётся за минуту в 1 г препарата радия? Период полураспада радия  $\tau_{1/2} = 1660 \text{ лет}$ , атомная масса 226.

12. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; масса  $\alpha$ -частицы 4,00149 а.е.м.

13. Вычислить энергию  $\alpha$ -частицы, испускаемой изотопом урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , если препарат урана активностью 0,02 Ки, помещенный в калориметр, вызывает повышение температуры на 0,46 °С в час. Теплоемкость калориметра 1 кал/град.

14. Определить постоянную распада, период полураспада и среднее время жизни некоторого вещества, если известно, что за сутки интенсивность испускаемого им  $\gamma$ -излучения уменьшилась на 30%. Продукт распада не радиоактивен.

15. В некоторых ториевых рудах  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  содержится примесь только одного изотопа свинца  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ . Предполагая, что весь свинец образовался в результате распада тория, определить возраст ториевой руды, если на каждый грамм тория, содержащегося в руде, приходится 0,022 г свинца. Период полураспада тория составляет  $1,99 \cdot 10^{10}$  лет.

16. На какую глубину в пластинку алюминия проникает  $\alpha$ -частица имеющая энергию 6,2 МэВ? Плотность алюминия  $2,7 \text{ г/см}^3$ .

## ВАРИАНТ № 2

1. Угол преломления луча жидкостью, при падении из воздуха на границу раздела, равен  $36^\circ$ . Определить показатель преломления этой жидкости, если отраженный от ее поверхности луч полностью поляризован.

2. На тонкий стеклянный клин падает по нормали монохроматический свет. Преломляющий угол клина равен  $2^\circ$ . Показатель преломления стекла равен 1,55. Определить длину волны, если расстояние между соседними светлыми интерференционными полосами, равно 0,3 мм.

3. При заполнении находящейся на пути одного из интерферирующих лучей в интерферометре Жамена пустой трубки длиной 5 см кислородом ( $n = 1,000272$ ) происходит смещение интерференционных полос. Какую толщину должен иметь компенсирующий стеклянный клин ( $n_{\text{ст}} = 1,5$ ) на пути второго луча, чтобы восстановилась первоначальная картина?

4. Постоянная дифракционной решетки в 5 раз больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол между двумя первыми дифракционными максимумами. Сколько максимумов наблюдается в спектре?

5. Две звезды рассматриваются в зрительную трубу. Угол между лучами, идущими от звезд к месту наблюдения –  $\alpha$ . Наблюдение ве-



дётся через светофильтр пропускающий свет с длиной волны  $\lambda = 550$  нм. Определить при каком минимальном угле  $\alpha$  звёзды можно будет наблюдать в зрительную трубу раздельно, если диаметр объектива зрительной трубы 70 мм.

6. Естественный свет падает на систему двух скрещенных николей, между которыми расположена кварцевая пластинка, вырезанная перпендикулярно оптической оси. Найти минимальную толщину пластинки, при которой система пропускает 0,3 светового потока, если постоянная вращения кварца 17 град/мм.

7. Муфельная печь потребляет мощность  $P = 1$  кВт. Температура  $T$  ее внутренней поверхности при открытом отверстии площадью  $25 \text{ см}^2$  равна 1,2 кК. Считая, что отверстие печи излучает как черное тело, определить, какая часть ее мощности рассеивается стенками.

8. Найти длину волны де Бройля протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов: 1) 1 кВ; 2) 1 МВ.

9. Определить ширину запрещённой зоны собственного (беспримесного) полупроводника, если при температуре  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  сопротивление 5000 Ом, а при  $T_2 = 80^\circ\text{C}$  его сопротивление всего 700 Ом.

10. Определить концентрацию  $n$  свободных электронов в металле при температуре  $T = 0$  К. Энергию Ферми принять равной 1 эВ.

11. Какое количество радиоактивного элемента останется не распавшимся по истечении 2, 5, 10 периодов полураспада?

12. Период полураспада радия  $^{226}\text{Ra}$  составляет 1660 лет. Вычислить среднюю продолжительность жизни атомов радия и вероятность для одного атома распасться в течение 1 года.

13. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа бора  $^{10}_5\text{B}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра бора определить по справочным данным.

14. Вычислить энергию  $\alpha$ -частицы, испускаемой изотопом радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$ , если препарат радия активностью 0,02 Ки, помещенный в калориметр, вызывает повышение температуры на  $0,49^\circ\text{C}$  в час. Теплоемкость калориметра  $1 \text{ кал}/^\circ\text{C}$ .

15. Анализ изотопного состава свинца некоторой горной породы показал, что на каждые 10,2 г изотопа урана  $^{238}_{92}\text{U}$ , содержащегося в породе, приходится 0,8 г радиогенного (т.е. образовавшегося за счёт

распада урана) изотопа свинца  $^{206}_{82}\text{Pb}$ . Определить возраст этой горной породы. Период полураспада  $^{238}_{92}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет.

16. На какую глубину в медную пластинку проникает  $\alpha$ -частица, имеющая энергию 4,2 МэВ? Плотность меди составляет  $8,9 \text{ г/см}^3$ .

### ВАРИАНТ № 3

1. Луч света, идущий в стеклянном сосуде, наполненном серной кислотой, отражается от поверхности стекла. При каком угле падения отраженный свет максимально поляризован? Показатель преломления кислоты 1,43; показатель преломления стекла 1,52.

2. Определите преломляющий угол стеклянного клина, если на него по нормали падает монохроматический свет с длиной волны 522 нм, и число светлых интерференционных полос, приходящееся на 1 см, равно двум. Показатель преломления стекла клина для данной длины волны равен 1,49.

3. На пути одного из лучей интерферометра Жамена поместили трубку длиной 12 см, из которой выкачан воздух. При заполнении трубки хлором интерференционная картина сместилась на 154 полосы. Длина волны монохроматического света в этом опыте 600 нм. Найти показатель преломления хлора. Какой толщины кварцевую пластинку с показателем преломления  $n_{\text{кв}} = 1,54$  необходимо ввести на пути второго луча, чтобы разность хода лучей снова стала равной нулю?

4. Дифракционная решетка, освещенная по нормали падающим монохроматическим светом, вызывает отклонение некоторой спектральной линии на угол  $30^\circ$  в третьем порядке дифракции. Под каким углом дифракции будет наблюдаться эта спектральная линия в четвертом порядке дифракции?

5. Найти линейный коэффициент поглощения света, если при прохождении кюветы длиной 3 см интенсивность света ослабляется в 4,8 раза.

6. Каков угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если световой поток, выходящий из анализатора, составляет 50% от светового потока, прошедшего через поляризатор?

7. Определить угол рассеяния  $\gamma$ -кванта при столкновении со свободным неподвижным электроном, если изменение длины волны при рассеянии составляет 2,1 пм.

8. Найдите длины волн, излучаемых двукратным ионом лития  ${}^7_3\text{Li}^{++}$  при переходах с энергетических уровней, для которых главные квантовые числа 4, 5, 6 на уровень, где главное квантовое число 3.

9. Удельная проводимость беспримесного полупроводника равна  $89,3 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Определить подвижность дырок и их концентрацию, если постоянная Холла  $R_H = 3,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

10. Вычислите, какая часть электронов проводимости в металле при  $T \approx 0 \text{ К}$  имеет кинетическую энергию, большую  $E_F/2$ .

11. Сколько атомов распадется за год в 1 г урана  ${}^{238}\text{U}$ ? (Период полураспада  ${}^{238}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет.)

12. Период полураспада радия  ${}^{226}\text{Ra}$  составляет 1660 лет. Вычислить среднюю продолжительность жизни атомов радия и вероятность для одного атома распасться в течение 1 года.

13. Вычислить энергию связи протонов и нейтронов для ядер изотопов кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{17}_8\text{O}$ . Вычислить также удельную энергию связи, т.е. энергию в расчете на один нуклон (протон или нейтрон) для этих же ядер. Массы ядер указанных изотопов соответственно равны 15,995 а.е.м.; 16,999 а.е.м..

14. Энергия  $\alpha$ -частицы при  $\alpha$ -распаде ядра  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  составляет 4,78 МэВ. Какую энергию и скорость приобретает в результате распада дочернее ядро? Написать реакцию распада.

15. Ядро изотопа рубидия  ${}^{88}_{37}\text{Rb}$  превращается в ядро стронция за счет  $\beta$ -распада. Анализ состава некоторой горной породы показал, что на каждые 114,2 г этого изотопа рубидия, содержащегося в породе, приходится 0,2 г радиогенного, т.е. образовавшегося за счёт распада рубидия, изотопа стронция. Определить возраст этой горной породы. Период полураспада рубидия составляет  $6 \cdot 10^{10}$  лет. Написать реакцию распада.

16. На какую глубину в золотую пластинку проникает  $\alpha$ -частица, имеющая энергию 4,2 МэВ? Плотность золота составляет 19,3 г/см<sup>3</sup>.

#### ВАРИАНТ № 4

1. Свет прошел 20 см в сероуглероде. Какой путь пройдет свет за то же время в воде? Показатель преломления сероуглерода равен 1,63; воды 1,33.

2. Между стеклянной пластиной и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус восьмого темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,7 мкм равен 2 мм. Радиус кривизны линзы 1 м.

3. На сколько изменится оптическая разность хода, если два точечных когерентных источника света, находящихся в воздухе на расстоянии 1,5 см друг от друга, поместить в сероуглерод (показатель преломления 1,63)? Задачу решить для точки, лежащей на расстоянии 30 см от одного из источников по направлению перпендикуляра к прямой, соединяющей источники.

4. Определить длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку с периодом 2,2 мкм, если угол между максимумами первого и второго порядка равен 15°.

5. Оценить, какие минимальные по размерам детали предмета можно различить в микроскопе, если для освещения используется зеленый свет ( $\lambda = 550$  нм)? Фокусное расстояние объектива микроскопа 2,5 мм, диаметр 3 мм. (Предмет расположен примерно на фокусном расстоянии от объектива).

6. Раствор глюкозы с концентрацией  $2,8 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>, налитый в стеклянную трубку, поворачивает плоскость поляризации света, проходящего через раствор, на угол 64°. Другой раствор, налитый в эту же трубку, поворачивает плоскость поляризации на угол 48°. Найти концентрацию второго раствора.

7. Какая мощность солнечного излучения попадает на квадратный метр земной поверхности вблизи экватора, когда Солнце находится в зените? Поверхность Солнца излучает как черное тело, имеющее тем-

температуру 5500 К. Радиус Солнца  $6,96 \cdot 10^8$  м. Расстояние от Земли до Солнца  $1,49 \cdot 10^8$  км.

**8.** В результате упругого столкновения  $\gamma$ -кванта со свободным неподвижным электроном  $\gamma$ -квант был рассеян на угол  $30^\circ$  к первоначальному направлению движения. Энергия рассеянного  $\gamma$ -кванта 1,5 МэВ. Найти начальную энергию  $\gamma$ -кванта.

**9.** Удельная проводимость полупроводника равна 212 (Ом·м)<sup>-1</sup>. Определить подвижность дырок и их концентрацию, если постоянная Холла  $R_H = 5,66 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Кл. Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

**10.** Концентрация свободных электронов в металле при температуре  $T = 0$  К равна  $n = 1,7 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Определить энергию уровня Ферми.

**11.** Определить энергию связи нуклонов в ядре тяжелого изотопа водорода  ${}^2_1\text{H}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра тяжелого изотопа водорода определить по справочным данным.

**12.** Сколько атомов распадется за год в 0,1 г урана  ${}^{238}\text{U}$ ? (Период полураспада  ${}^{238}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет)

**13.** Измерение показало, что некоторое количество радона  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  (радон один из инертных газов) дает  $10^6$   $\alpha$ -распадов в секунду. Период полураспада  ${}^{32}_{15}\text{Rn}$  составляет 3,8 суток. Найти объем, занимаемый радоном при нормальных условиях, и выяснить активность радона через месяц после первого измерения.

**14.** Определить постоянную распада, период полураспада и среднее время жизни некоторого вещества, если известно, что за пять суток интенсивность испускаемого им  $\gamma$ -излучения уменьшилась на 40%. Продукт распада не радиоактивен.

**15.** Анализ изотопного состава свинца, содержащегося в горной породе, показал, что на каждые 22,4 г изотопа урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  приходится 1,17 г радиогенного (т.е. образовавшегося за счёт распада урана) изотопа свинца  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . Определить возраст этой горной породы. Период полураспада  ${}^{238}_{92}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет.

16. На какую глубину в пластинку алюминия проникает  $\alpha$ -частица, имеющая энергию 4,2 МэВ? Плотность алюминия 2,7 г/см<sup>3</sup>.

### ВАРИАНТ № 5

1. На мыльный пузырь с толщиной стенок 0,15 мкм параллельным пучком падает свет от лампы накаливания. Определить, какая длина волны света будет эффективно отражаться от стенок пузыря, если наблюдение ведётся под углом 45° к его поверхности. Показатель преломления мыльной плёнки равен 1,33. Толщину стенок пузыря считать одинаковой.

2. Определить радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете, если между линзой и пластиной налита вода (показатель преломления 1,33). Длина волны равна 589 нм. Радиус кривизны линзы 2 метра.

3. В интерферометре Жамена на пути интерферирующих лучей помещены две одинаковые трубки с воздухом ( $n_1 = 1,000252$ ). При замене одной из них такой же трубкой с хлором ( $n_2 = 1,000773$ ), интерференционная картина сместилась на 190 полос. Длина трубки 20 см. Найдите длину волны монохроматического источника.

4. Сколько штрихов на 1 мм содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете (длина волны 600 нм) максимум пятого порядка наблюдается под углом 18°?

5. В зрительную трубу рассматривается лунная поверхность. Диаметр объектива трубы  $d = 4,0$  см. При каком минимальном расстоянии между двумя кратерами их можно увидеть раздельно? Длина световой волны  $\lambda = 600$  нм.

6. Во сколько раз ослабевает естественный (неполяризованный) свет, проходя сквозь два николя, плоскости поляризации которых составляют угол 45°? Потери в каждом николе составляют 5%.

7. Электрон движется по окружности радиусом  $r = 0,5$  см в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 8$  мТл. Определить длину волны де Бройля для этого электрона.

8. Частица, имеющая массу  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, движется между упруго отражающими ее параллельными стенками. Движение происходит только перпендикулярно стенкам, расстояние между которыми

$1,84 \cdot 10^{-9}$  м. Определить возможные значения энергии этой частицы для первых пяти энергетических уровней.

9. Найти минимальную энергию образования пары электрон-дырка (ширину запрещенной зоны) в беспримесном полупроводнике, проводимость которого возрастает в 5 раз при увеличении температуры от  $T_1 = 300$  К до  $T_2 = 400$  К.

10. Определить максимальную скорость и концентрацию электронов в металле при  $T = 0$  К, если уровень Ферми равен 3,5 эВ.

11. Определить энергию связи нуклонов в ядре сверхтяжелого изотопа водорода Н (третий). Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра сверхтяжелого изотопа водорода определить по справочным данным.

12. Период полураспада изотопа фосфора  $^{32}\text{P}$  составляет 14,3 дней. Найти активность препарата через 20 дней после его изготовления, если начальная активность 100 мКи.

13. Сколько радиоактивных частиц, испускает 1 г  $^{235}\text{U}$  за 1 год и чему равна его активность? ( $\tau_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$  лет).

14. Период полураспада плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  равен 24100 лет. Определить, какая доля (в процентах) атомов плутония распадается за 10 лет и на сколько уменьшится активность плутония за 1 год.

15. Чтобы определить возраст  $t$  древней ткани, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода  $^{14}\text{C}$ . Она оказалась соответствующей 9,2 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация  $^{14}\text{C}$  в живых растениях соответствует 14 распадам в минуту на один грамм углерода. Период полураспада  $^{14}\text{C}$  равен 5730 лет. Исходя из этих данных, оценить  $t$ .

16. Сколько слоев половинного ослабления требуется, чтобы уменьшить интенсивность  $I$  узкого пучка  $\gamma$ -излучения в 100 раз?

## ВАРИАНТ № 6

1. В состав минерала (лабрадорита) входит анортит с показателем преломления 1,59 и альбит с показателем преломления 1,53. Альбит и анортит в лабрадорите образуют тонкие чередующиеся слои, что приводит к интерференционному усилению отражения для некоторых цве-

товых оттенков света (явление называется иризацией). Оценить минимальную толщину слоев, которые могут вызвать иризацию, если она наблюдается под прямым углом к поверхности образца. Цвет иризации образца фиолетовый ( $\lambda = 450$  нм).

2. Найдите расстояние между 3-м и 16-м тёмными кольцами Ньютона, если расстояние между 2-м и 20-м кольцами равно 4,8 мм. Наблюдение проводится в отражённом свете.

3. Для измерения показателя преломления аммиака в одно плечо интерферометра Майкельсона поместили трубку длиной  $\ell = 14$  см, из которой выкачан воздух. Концы трубки закрыты плоскопараллельными стеклами. При заполнении трубки аммиаком интерференционная картина сместилась на 180 полос. Найдите показатель преломления аммиака, если  $\lambda = 0,59$  мкм.

4. На поверхность дифракционной решетки нормально падает монохроматический свет. Постоянная решетки в 3,5 раза больше длины волны. Какое общее число максимумов можно наблюдать в данном случае?

5. Во сколько раз можно повысить разрешающую способность микроскопа, если фотографировать в ультрафиолетовых ( $\lambda = 0,27$  мкм), а не в зеленых ( $\lambda = 0,55$  мкм) лучах?

6. Пучок естественного света последовательно проходит через три николя, углы между главными сечениями которых, равны  $60^\circ$  и  $45^\circ$ . Какая доля первоначального потока света выйдет из этой системы? Потери пренебречь.

7. Какая мощность солнечного излучения попадает на квадратный сантиметр земной поверхности вблизи экватора, когда Солнце находится в зените? Поверхность Солнца излучает как черное тело, имеющее температуру 5500 К. Радиус Солнца  $6,96 \cdot 10^8$  м. Расстояние от Земли до Солнца  $1,49 \cdot 10^8$  км.

8. Определить изменение длины волны гамма-кванта при комптоновском рассеянии: на свободном неподвижном электроны, если рассеяние произошло на угол  $60^\circ$ . Какова энергия рассеянного  $\gamma$ -кванта, если до рассеяния энергия составляла 3,2 МэВ.

9. Определить ширину запрещённой зоны собственного полупроводника, если при температуре  $T_1 = 70^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 100^\circ\text{C}$  его сопротивление соответственно равно  $R_1 = 3000$  Ом и  $R_2 = 600$  Ом.



10. Концентрация свободных электронов в металле при температуре  $T = 0$  К равна  $n = 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . Определить энергию уровня Ферми.

11. Период полураспада радона  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  равен 3,8 суток. На сколько уменьшится активность радона за 1 минуту и за 2 суток?

12. Периоды полураспада изотопов урана  ${}^{238}\text{U}$  и  ${}^{235}\text{U}$  равны соответственно  $\tau_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$  лет и  $\tau_{1/2} = 7,13 \cdot 10^8$  лет. Определить средние времена жизни и постоянные распада этих изотопов.

13. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа гелия  ${}^3_2\text{He}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра изотопа гелия определить по справочным данным.

14. Определить радиус ядра углерода  ${}^{14}_7\text{C}$ . Во сколько раз радиус ядра изотопа урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  больше радиуса ядра углерода  ${}^{14}_7\text{C}$ ?

15. Анализ изотопного состава свинца некоторой горной породы показал, что на каждые 14,2 г изотопа урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , содержащегося в породе, приходится 1,2 г радиогенного (т.е. образовавшегося за счёт распада урана) изотопа свинца  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . Определить возраст этой горной породы. Период полураспада  ${}^{238}_{92}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет.

16. Сколько электрон – ионных пар создает  $\alpha$ -частица за счет своей ионизирующей способности в воздухе, если ее начальная энергия 4,2 МэВ.

### ВАРИАНТ № 7

1. Под каким минимальным углом надо отразить луч от поверхности корунда, чтобы получить полную поляризацию отраженного луча? Скорость света в корунде  $1,7 \cdot 10^8$  м/с. Какой абсолютный показатель преломления имеет корунд?

2. Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном свете 0,4 мм. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, если система освещалась монохроматическим светом с длиной волны 640 нм.

3. В шахтном интерферометре длина камеры 110 мм. С помощью поворотного устройства каждый из интерферирующих лучей про-

ходит камеру шесть раз. При заполнении камеры шахтным воздухом интерференционная картина сдвинулась на 18 полос. Найдите показатель преломления шахтного воздуха. Если показатель преломления чистого воздуха  $n_{\text{в}} = 1,000292$ . Длина волны света 590 нм.

4. На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на миллиметр, падает по нормали белый свет. Спектр проектируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 3 метра. Граница видимого спектра от 400 нм до 780 нм.

5. Рассчитайте толщину слоя вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в 3 раза, если толщина слоя половинного ослабления составляет 2 м.

6. Определить толщину кварцевой пластинки, вырезанной перпендикулярно оптической оси, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны 509 нм равен  $180^\circ$ . Постоянная вращения в кварце для этой длины волны равна  $29,7 \text{ град}\cdot\text{мм}^{-1}$ .

7. Температура «голубой» звезды 30000 К. Определить: 1) энергетическую светимость звезды; 2) длину волны  $\lambda_{\text{м}}$ , соответствующую максимуму излучения.

8.  $\gamma$ -квант, имеющий энергию 3 МэВ, сталкивается со свободным неподвижным электроном. После столкновения  $\gamma$ -квант движется под углом  $60^\circ$  к направлению своего первоначального движения. Какую энергию приобретет электрон в результате столкновения и под каким углом по отношению к начальному движению  $\gamma$ -кванта он будет двигаться?

9. Удельная проводимость беспримесного полупроводникового образца при нагревании от температуры  $t_1 = 0^\circ \text{C}$  до температуры  $t_1 = 18^\circ \text{C}$  увеличилась в 4,25 раза. Определить ширину запрещенной зоны этого полупроводникового материала.

10. Определить максимальную скорость и концентрацию электронов в металле при  $T = 0 \text{ K}$ , если уровень Ферми равен 6,2 эВ.

11. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа лития  ${}^6_3\text{Li}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра изотопа лития определить по справочным данным.

12. Измерение показало, что препарат радиоактивного изотопа фосфора  $^{32}_{15}\text{P}$  дает  $10^4$   $\beta$ -распадов в секунду. Период полураспада  $^{32}_{15}\text{P}$  составляет 14,3 суток. Найти массу препарата и выяснить активность, которая будет через месяц после первого измерения.

13. Горная порода содержит 0,001% урана  $^{238}\text{U}$  по массе. Определить, в каком объеме породы будет содержаться 1 г радия  $^{226}\text{Ra}$ . Плотность породы  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Период полураспада урана 4,5 миллиарда лет, радия – 1660 лет.

14. При делении ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  образовалось два осколка с массовыми числами 140 и 95. Найти энергию и скорость осколков деления, если их суммарная энергия составляет 160 МэВ.

15. За счёт электронного захвата ядром тяжёлого изотопа калия  $^{40}_{19}\text{K}$  образуется аргон  $^{40}_{18}\text{Ar}$ . Таким образом, в горной породе содержащей калий происходит постепенное накопление аргона. Чем больше времени проходит с момента образования горной породы, тем больше содержание аргона будет в ней. При определении геологического возраста сильвинита (KCl) из 6,1 кг бездефектных кристаллов было извлечено  $5,5 \text{ см}^3$  аргона (при нормальных условиях). Определить геологический возраст сильвинита, если известно, что период полураспада  $^{40}_{19}\text{K}$  составляет  $1,26 \cdot 10^9$  лет и в естественной смеси изотопов калия содержится 0,012%  $^{40}_{19}\text{K}$ .

16. Сколько электрон – ионных пар создает  $\alpha$ -частица за счет своей ионизирующей способности в воздухе, если ее начальная энергия 5,8 МэВ.

### ВАРИАНТ № 8

1. Два когерентных источника, находящихся в воде на расстоянии 20 мм, испускают световые лучи в одинаковой фазе с частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц. Чему равняется оптическая разность хода лучей, приходящих в точку, удаленную на 50 см от одного из источников в направлении нормали к прямой, соединяющей источники? Показатель преломления воды 1,33.

2. Найти показатель преломления жидкости, заполняющей пространство между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой, если при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 600 нм радиус десятого темного кольца Ньютона оказался равным 2,1 мм. Радиус кривизны линзы 1 метр.

3. Интерферометр Рэлея используется для определения малых концентраций рудничного газа в воздухе шахтного забоя. В интерферометре используются два когерентных световых пучка, и две идентичные по длине кюветы, через которые проходят световые пучки. Одна из кювет заполняется чистым воздухом, через другую прокачивают воздух забоя. Так как показатель преломления воздуха и рудничного газа (в основном метана) различны, то между световыми лучами возникает оптическая разность хода, которая и приводит к смещению наблюдаемой интерференционной картины. Найти концентрацию рудничного газа в воздухе забоя, если длина кювет 20 см и при прокачивании одной из кювет воздухом взятом из забоя интерференционная картина сместилась на 5 полос (длина волны 580 нм). Показатель преломления воздуха при нормальных условиях 1,000292; метана – 1,000441.

4. Постоянная дифракционной решетки 5 мкм. На решетку падает нормально свет с длиной волны 560 нм. Дифракционный максимум какого наибольшего порядка можно наблюдать с помощью этой решетки?

5. В так называемом иммерсионном микроскопе, для увеличения разрешающей способности, пространство между предметом и объективом заполняется прозрачной жидкостью с показателем преломления  $n = 1,4$ . Фокусное расстояние объектива 2,0 мм, диаметр 2,0 мм. Предмет располагается примерно на фокусном расстоянии от объектива. Оценить минимальные по размерам детали предмета, которые еще можно различить в микроскоп, если используется освещение предмета светом с длиной волны  $\lambda = 450$  нм (фиолетовый свет).

6. Пучок естественного света падает на систему из четырех призм Николя, главное сечение каждой из которых повернуто на  $30^\circ$  относительно главного сечения предыдущей призмы. Какая часть светового потока проходит через всю систему?

7. В результате упругого столкновения  $\gamma$ -кванта со свободным неподвижным электроном  $\gamma$ -квант был рассеян на угол  $90^\circ$  к первоначальному направлению движения. Энергия рассеянного  $\gamma$ -кванта 0,5 МэВ. Найти начальную энергию  $\gamma$ -кванта.

8. На поверхность лития падает монохроматический свет с длиной волны 310 нм. Чтобы прекратить эмиссию электронов, нужно приложить задерживающую разность потенциалов не менее 1,7 В. Определить работу выхода электронов

9. Во сколько раз изменится при повышении температуры от 300 К до 380 К электропроводность полупроводника, ширина запрещенной зоны которого  $\Delta E = 0,2$  эВ?

10. Собственный (беспримесный) полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho = 0,48$  Ом·м. Определить концентрацию  $n$  носителей заряда, если подвижность электронов в германии  $0,28$  м<sup>2</sup>/(В·с), а подвижность дырок равна  $0,13$  м<sup>2</sup>/(В·с).

11. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра изотопа лития определить по справочным данным.

12. Во сколько раз энергия, выделяемая при полном делении 1 кг  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , больше энергии, получаемой при сгорании 1 т нефти? При делении одного ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$  выделяется 160 МэВ энергии, а удельная теплота сгорания нефти  $Q = 4,6 \cdot 10^7$  Дж/кг.

13. Найти период полураспада изотопа фосфора  ${}^{32}_{15}\text{P}$ , если активность его через 20 суток составляет 38% первоначальной активности.

14. В граните (рапакиви) содержится примерно 3 г урана  ${}^{238}\text{U}$  в расчете на 1 м<sup>3</sup>. Сколько радия  ${}^{226}\text{Ra}$  содержится в 1 м<sup>3</sup> этой горной породы. Период полураспада урана  ${}^{238}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет; радия – 1660 лет.

15. Вычислить толщину слоя половинного поглощения свинца для гамма-лучей, длина волны которых равна 0,775 нм.

16. Под действием космических лучей в воздухе объемом  $V = 1 \text{ см}^3$  на уровне моря образуется в среднем  $N = 120$  пар ионов за промежуток времени  $\Delta t = 1$  мин. Определить экспозиционную дозу излучения, полученную человеком за время  $t = 1$  сутки.

### ВАРИАНТ № 9

1. Зимой на стеклах трамваев образуются тонкие пленки наледи, которые в отражённых лучах окрашены в зеленый цвет (длина волны 550 нм). Оценить, какова должна быть минимальная толщина этих пленок. Показатель преломления наледи принять равным 1,33. Наблюдение ведётся практически по нормали к плёнке.

2. На тонкий стеклянный клин падает нормально пучок лучей с длиной волны 600 нм. Расстояние между соседними интерференционными полосами в отраженном свете равно 0,4 мм. Определить угол между поверхностями клина. Показатель преломления стекла 1,52.

3. В интерферометре Жамена используются два когерентных световых пучка и две идентичные по длине кюветы, через которые проходят световые пучки. Одна из кювет заполнена исследуемым газом при нормальных условиях, из другой газ откачивают. Так как показатель преломления газа отличается от показателя преломления вакуума, то между световыми пучками, проходящими через кюветы, возникает оптическая разность хода, которая приводит к смещению интерференционной картины по мере откачки. Найти показатель преломления газа, заполняющий одну из кювет (нормальные условия), если при полной откачке другой кюветы интерференционная картина сместилась на 75 полос (длина волны 589 нм) длина кювет 10 см.

4. На дифракционную решетку падает по нормали параллельный пучок лучей. Спектры второго и третьего порядков частично накладываются друг на друга. На какую длину волны спектра второго порядка накладывается фиолетовая граница (длина волны 400 нм) в спектре третьего порядка?

5. На каком максимальном расстоянии от места расположения теодолита можно раздельно увидеть деления шкалы, расстояния между которыми 1 см? Диаметр объектива теодолита 50 мм (глаз человека имеет максимальную чувствительность к зеленым лучам  $\lambda = 550$  нм).

6. Пластинку кварца, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между двумя параллельными николями. При какой минимальной толщине пластинки свет совсем не пройдет через систему (постоянная вращения кварца 17 град/мм)?

7. Температура черного тела увеличилась в два раза, в результате чего длина волны, на которую приходится максимум излучения уменьшилась на 600 нм. Определить начальную и конечную температуры тела.

8. Электрон движется между двумя параллельными идеально отражающими плоскостями. Движение электрона совершается по нормали к этим плоскостям (одномерное движение вдоль оси X). Расстояние между плоскостями  $d = 3 \cdot 10^{-9}$  м. Какие возможные значения энергий может иметь этот электрон? (Привести значения энергии для первых четырех квантовых чисел).

9. Определить уровень Ферми в собственном (беспримесном) полупроводнике, находящемся при комнатной температуре, если энергия активации  $\Delta E$  (ширина запрещенной энергетической зоны) равна 0,7 эВ. За нулевой уровень отсчета энергии электронов принять уровень потолка валентной зоны. Эффективная масса дырок в три раза больше эффективной массы электронов.

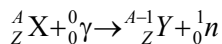
10. Собственный (беспримесный) полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho = 0,48$  Ом·м. Определить концентрацию  $n$  носителей заряда, если подвижность электронов в германии  $0,36$  м<sup>2</sup>/(В·с), а подвижность дырок равна  $0,16$  м<sup>2</sup>/(В·с).

11. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа азота  ${}^{14}_7\text{N}$ . Масса нейтрона 1,008665 а.е.м.; масса протона 1,007825 а.е.м.; массу ядра изотопа азота определить по справочным данным.

12. Период полураспада изотопа фосфора  ${}^{32}\text{P}$  составляет 14,3 дней. Найти активность препарата через 50 дней после его изготовления, если начальная активность 200 мКи.

13. Определить, во сколько раз активность 1 г  ${}^{238}\text{U}$  меньше активности 1 г  ${}^{226}\text{Ra}$ . Период полураспада урана 4,5 миллиардов лет, период полураспада радия 1660 лет.

14. При ядерном фотоэффекте происходит эмиссия (вырывание) нейтрона из ядра под действием  $\gamma$ -кванта. Реакция ядерного фотоэффекта записывается следующим образом:



Найти минимальную энергию гамма кванта, вызывающую эту реакцию, если ядром  ${}^A_Z X$  является ядро  ${}^{14}_7 C$ .

15. Определить возраст древних деревянных предметов, если удельная активность изотопа  ${}^{14}C$  у них составляет  $\eta = 3/5$  удельной активности этого же изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада  ${}^{14}C$  равен 5730 лет.

16. Интенсивность узкого пучка  $\gamma$ -лучей после прохождения через слой свинца толщиной 4 см уменьшилась в восемь раз. Определить энергию  $\gamma$ -квантов и толщину слоя половинного ослабления.

### ВАРИАНТ № 10

1. Пучок параллельных лучей с длиной волны 600 нм падает под углом  $30^\circ$  на мыльную пленку, показатель преломления которой 1,3. При какой наименьшей возможной толщине пленки отраженные лучи будут максимально ослаблены интерференцией?

2. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом (длина волны  $\lambda = 0,5$  мкм), падающим нормально. Найти расстояние между 5-м и 20-м светлыми кольцами Ньютона в проходящем свете, если радиус кривизны линзы 10 м.

3. Для измерения линейного коэффициента теплового расширения горных пород используют простейший интерференционный прибор – дилатометр. Дилатометр состоит из кварцевого стакана, в котором размещают срез горной породы. Верхняя часть среза полируется. Стакан закрывается плоскопараллельной кварцевой пластиной. Толщина среза горной породы выбирается такой, чтобы между полированной стороной образца породы и кварцевой пластиной, образовался тонкий зазор. Интерференционная картина, возникает за счет отражения от плоскостей тонкого зазора. Все устройство нагревают. Так как кварц, практически не расширяется при нагреве, а срез горной породы изменяет свою толщину, то величина зазора



изменяется и, как следствие, интерференционная картина смещается. Определить линейный коэффициент расширения горной породы, если толщина среза 11,2 см. Наблюдение ведется по нормали к полированной поверхности образца. Длина волны света  $\lambda = 550$  нм. При нагреве всего устройства на  $10^\circ\text{C}$  интерференционная картина сместилась на 24 полосы.

4. Ширина дифракционной решетки 15 мм, постоянная решетки 4 мкм. В спектре какого наименьшего порядка получают отдельные изображения двух спектральных линий  $\lambda = 710$  нм и  $\lambda = 710,2$  нм?

5. Две голубых по цвету звезды ( $\lambda = 430$  нм) наблюдаются в бинокль. При каком минимальном угловом расстоянии (угол между направлениями на звезды с места наблюдения) можно будет увидеть эти две звезды, если диаметр объектива бинокля 45 мм?

6. Естественный свет падает на систему из двух скрещенных николей, между которыми расположена кварцевая пластинка, вырезанная перпендикулярно оптической оси. Найти минимальную толщину пластинки, при которой система пропускает 0,3 светового потока, если постоянная вращения кварца составляет  $17$  град/мм.

7. Температура верхних слоев Солнца равна  $5,5$  кК. Считая Солнце черным телом, определить длину волны  $\lambda_m$ , которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости Солнца.

8. Определить, какую энергию будет иметь  $\gamma$ -квант после рассеяния под углом  $180^\circ$  (т.е. в направлении, обратном первоначальному), на свободном неподвижном электроны, если его энергия до столкновения  $1,5$  МэВ.

9. Определить ширину запрещенной зоны при комнатной температуре, в собственном (беспримесном) полупроводнике, если уровень Ферми расположен на  $0,12$  эВ выше потолка валентной зоны. Эффективная масса дырок в двенадцать раз больше эффективной массы электронов.

10. Определить максимальную скорость и концентрацию электронов в металле при  $T = 0$  К, если уровень Ферми равен  $5$  эВ.

11. Определить энергию связи нуклонов в ядре изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ . Масса нейтрона  $1,008665$  а.е.м.; масса протона  $1,007825$  а.е.м.; массу ядра изотопа углерода определить по справочным данным.

**12.** Определить, какой объем радона (при нормальной температуре и давлении) находится в радиоактивном равновесии с 1 г радия. (Радон или, по другой терминологии – эманация радия, это газообразный продукт распада радия). Период полураспада радия составляет 1660 лет, радона – 3,8 дня.

**13.** Вычислить энергию  $\alpha$ -частицы, испускаемой полонием, если препарат полония активностью 0,02 Ки, помещенный в калориметр, вызывает повышение температуры на 0,54 °С в час. Теплоемкость калориметра 1 кал/°С .

**14.** Найти энергию, выделившуюся при столкновении ядер  $^2\text{H}$  и  $^6\text{Li}$ , и образовании двух альфа-частиц, если известно, что удельные энергии связи на один нуклон в ядрах  $^2\text{H}$ ,  $^4\text{He}$  и  $^6\text{Li}$  равны соответственно 1,11 МэВ, 7,08 МэВ и 5,33 МэВ.

**15.** В некоторых ториевых рудах содержится примесь только одного изотопа свинца  $^{208}_{82}\text{Pb}$ . Предполагая, что весь свинец образовался в результате распада тория, определить возраст ториевой руды, если на каждый грамм тория  $^{232}_{90}\text{Th}$  приходится 0,062 г свинца. Период полураспада тория составляет  $1,99 \cdot 10^{10}$  лет.

**16.** Изотоп калия  $^{40}_{19}\text{K}$  радиоактивен и имеет период полураспада  $1,26 \cdot 10^9$  лет. На долю калия приходится 0,35% веса человека. Вычислить активность калия, находящегося в теле человека, если изотоп  $^{40}\text{K}$  составляет 0,012%. Вес человека считать 75 кг.

## 7. СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 1

### Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Постоянная (число) Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	$c$	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar = h/2\pi$	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Масса электрона	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона	$m_p$	$1,672 \cdot 10^{-27}$ кг

Таблица 2

### Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение	
Гига	Г	$10^9$
Мега	М	$10^6$
кило	К	$10^3$
деци	Д	$10^{-1}$
санти	С	$10^{-2}$
милли	М	$10^{-3}$
микро	мк	$10^{-6}$
нано	Н	$10^{-9}$
пико	П	$10^{-12}$

Таблица 3

### Массы атомов лёгких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.
Нейтрон	${}^1_0n$	1,00867	Бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,01294
	Водород	${}^1_1\text{H}$		1,00783	${}^{11}_5\text{B}$
		${}^2_1\text{H}$	2,01410	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$

Продолжение таблицы 3

Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.
Водород	${}^3_1\text{H}$	3,01605	Углерод	${}^{13}_6\text{C}$	13,00335
Гелий	${}^3_2\text{He}$	3,01603		${}^{14}_6\text{C}$	14,00324
	${}^4_2\text{He}$	4,00260	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,01513	Кислород	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491
	${}^7_3\text{Li}$	7,01601		${}^{17}_8\text{O}$	16,99913
Бериллий	${}^7_4\text{Be}$	7,01693			
	${}^9_4\text{Be}$	9,01219			

Таблица 4

**Масса и энергия покоя некоторых частиц**

Частица	$m_0$		$E_0$ (энергия, запасённая в массе покоя)	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733

**8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА  
ОСНОВНАЯ**

1. *Савельев И.В.* Курс физики. Т. 2,3. - СПб., М.: Издательство «Лань», 2008.
2. *Трофимова Т. И.* Курс физики. - М.: Высшая школа, 2009.
3. *Детлаф А. А., Яворский Б. М.* Курс физики. - М.: Высшая школа, 2009.
4. *Яворский Б. М., Пинский А.А.* Основы физики. – М.: Наука, 2009 –Т. 1,2
4. *Волькенштейн В. С.* Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1999.

5. Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике: Учеб. пособие для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. - 640 с.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

6. Трофимова Т.И. Краткий курс физики. М.: Высшая школа, 2010.  
Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. СПб., М.: Издательство «Лань», 2008.

7. Сивухин Д. В. Общий курс физики.-М.: Наука, 2009. - Т. 1, 2, 3, 4,5.

8. Парфенова И.И., Мустафаев А.С., Егоров С.В., Пецелко Н.С., Стоянова Т.В., Смирнова Н.Н., Сырков А.Г., Чернобай В.И. Квантовая механика, физика твёрдого тела и элементы атомной физики. // Сборник задач для студентов технических специальностей //.-СПб.: СПГИ (ТУ), 2010.

### 9. СОДЕРЖАНИЕ:

1. Рекомендации по работе с методическими указаниями.....	3
2. Требования к оформлению самостоятельных работ.....	3
3 Методические указания по решению задач.....	3
4. Учебные материалы по разделам курса физик.....	4
4.1. Волновая оптика.....	4
4.2. Элементы атомной физики и квантовой механики.....	9
4.3. Элементы квантовой статистики и физики твёрдого тела.....	12
4.4. Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц.....	14
5. Примеры оформления решения задачи.....	18
6. Задачи .....	21
7. Справочные таблицы.....	42
8. Рекомендуемая учебная литература.....	44

**ФИЗИКА**  
**ОПТИКА. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА.**  
**АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

*Методические указания и контрольные задания  
для самостоятельной работы студентов  
бакалавриата направления 15.03.04*

Сост.: *Т.В. Стоянова, В.В. Томаев*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *Т.В. Стоянова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 06.11.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,6. Усл.кр.-отг. 2,6. Уч.-изд.л. 2,3. Тираж 75 экз. Заказ 832.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2