

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ ПО ФИЗИКЕ

Часть 3

**Общая физика. Экспериментальная
и теоретическая физика**

Харьков «ХАИ» 2004

Утверждена методической комиссией университета
18 декабря 2003 года (протокол № 3)

Составители: И.А. Клименко, В.П. Мигаль, О.И. Петрова, О.Н. Чугай

Введение

Научиться решать задачи по физике не просто. Можно хорошо знать теорию и не уметь решать даже простые графические и качественные задачи. Оказывается, для того чтобы успешно решать задачи, конкретное знание необходимо, но не достаточно. Все цели и задачи обучения в курсе физики – сообщение знаний и развитие умений применять их для решения задач, вести экспериментальную работу и анализировать результаты наблюдений и экспериментов – взаимосвязаны. Теоретические знания сообщают студентам в основном в процессе лекций, умение решать задачи отрабатывается во время практических занятий, а развитие навыков эксперимента и анализа его результатов происходит в процессе занятий в физических лабораториях. Все эти формы предполагают значительную самостоятельную внеаудиторную работу студента, направленную на выработку умений обработки учебной информации, деление ее на части с последующей структуризацией и созданием логических образов, моделей и т.п. Только на такой основе можно формировать умения и навыки решения сложных задач. Однако в настоящее время практически нет пособий по физике, которые помогли бы студенту организовать его самостоятельную работу по развитию умений прорабатывать учебную и научную литературу, ставить мысленные эксперименты, решать творческие задачи и т.п. Существующие сборники задач ориентированы в основном на выработку навыков решения типовых задач и не способствуют развитию навыков и умений решения качественных и творческих задач.

Настоящее пособие составлено с таким расчетом, чтобы им можно было пользоваться для самостоятельных занятий как «путеводителем» с эффектом присутствия виртуального преподавателя. Это, с одной стороны, активизирует самостоятельную работу студентов посредством индивидуализации заданий, указаний, направленных на выработку системности в обучении, применения графических задач. С другой стороны, применение в рабочей тетради целевых установок, элементов программируемого обучения, подсказок, составление системных тестов, позволяющих контролируя обучать, наличие вопросов для дискуссии, творческих и проблемных задач и другие факторы создают эффект присутствия «виртуального» преподавателя.

В целях повышения мотивации к обучению каждый раздел начинается с краткой информации о применении физических законов в авиационно-космической технике.

Создание и применение активной оболочки учебного пособия, которая в каждом разделе содержит необходимый теоретический материал и порядок его изучения, самоконтроль теоретического материала, рубрики «Обратите внимание» и «Запомните», тесты для определения уровня сложности заданий, основные типы задач и методы их решения, классификацию задач, способствуют выработке умений и навыков решения качественных, графических и творческих задач.

Подсчет баллов, набранных при тестировании, позволит определить уровень задач, соответствующий Вашей подготовке. Если количество набранных Вами

баллов превышает 50, рекомендуем приступать к решению задач высокого уровня сложности. Если же количество баллов от 40 до 50, следует решать задачи достаточного уровня сложности. В случае набора баллов от 30 до 40 рекомендуем решать задачи начального уровня. При наборе менее 30 баллов необходимо повторить теоретический материал раздела.

1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Разделы: 1. Интерференция. 2. Дифракция. 3. Поляризация.

Повторите основные понятия волнового движения. Нарисуйте электромагнитную волну и покажите длину волны, амплитуду, фазу, направление вектора Пойнтинга. Вспомните, какие параметры характеризуют волну и как они связаны между собой. Чему равна энергия волны и ее интенсивность?

Бегло прочитайте волновую оптику, не останавливаясь на выводах формул, и создайте целостное представление обо всех разделах.

Контрольные вопросы:

1. Какой параметр среды определяет все оптические явления?
2. Какова роль разности фаз, амплитуды, монохроматичности волн в оптических явлениях?
3. Почему только для когерентных волн характерны явления интерференции и дифракции?
4. Чем определяется интенсивность интерференционных и дифракционных картин?

1.1. Интерференция

Применение явления интерференции в приборах и технологии авиационно-космической техники:

1. Просветляющие покрытия элементов оптики (объективов, окон и др.).
2. Измерительная техника и метрология (интерференционная дилатометрия и концевые меры, интерференционные компараторы, сравнивающие длину концевой меры с длиной волны света).
3. Интерферометры в технологии (определение качества обработки деталей, толщины покрытий и т.п.).
4. Испытание моделей летательных аппаратов в аэродинамической трубе. Определение деформации летательных аппаратов в процессе эксплуатации.
5. Лазерная техника, оптоволоконная связь.
6. Антенны и радары. Сотовая связь.

Необходимый теоретический материал

Интерференция монохроматических волн. Когерентность. Время когерентности. Длина когерентности. Пространственная когерентность. Оптическая длина пути и оптическая разность хода. Условия максимума и минимума. Ширина интерференционной полосы. Получение когерентных источников света: методы деления фронта волны и ее амплитуды. Изменение фазы и оптической длины пути световой волны при отражении от оптически более плотной среды. Интерференция в тонкой пленке. Просветление в оптике. Высокоотражающие слои. Применение интерференции.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Вначале создайте целостное представление об интерференции. Для этого прочитайте бегло весь раздел, опуская выводы формул и детали. Вспомните, встречались ли Вы с интерференцией (мыльные пузыри, пленки бензина на воде и т.п.)?

Детально проработайте теоретический материал: дополните конспект лекций и выделите в нем наиболее важные законы, принципы и выявите взаимосвязи между ними. Выпишите формулы.

Обратите внимание на следующее:

- 1) интерферируют только когерентные волны;
- 2) характеристики когерентности (время и длина когерентности, а также радиус пространственной когерентности) определяют условия наблюдения интерференции (предельную разность хода и др.);
- 3) оптическая разность хода (или разность фаз) когерентных лучей определяет характер перераспределения интенсивности при интерференции (ширину полос и степень контрастности интерференционной картины).

Запомните, что при интерференции перераспределение энергии когерентных волн обуславливает возникновение максимумов и минимумов интенсивности.

Самоконтроль теоретического материала

- Почему нельзя наблюдать интерференцию от двух независимых источников света?
- Почему критерием определения разных видов когерентности являются случайные изменения фазы не больше π ?
- Какие измеряемые параметры волн определяют их когерентность?
- Как найти степень когерентности, если известен спектральный состав излучения?
- Как в тонких пленках возникают когерентные лучи? Почему интерференция в белом свете наблюдается на очень тонких пленках, но исчезает при оптической толщине пленки менее четверти длины волны?
- Что можно сказать об интерферирующих волнах, зная ширину интерференционной полосы и степень контрастности интерференционных полос?
- Почему интерференция на тонкой пленке в проходящем свете едва заметна?
- В каких случаях наложения двух пучков света одинаковой частоты и интенсивности происходит: а) сложение их интенсивностей; б) вычитание интенсивностей; в) увеличение суммарной интенсивности в 2 раза?
- Почему, используя явление интерференции, можно измерять длину волны света, показатель преломления и расстояние с очень большой точностью?

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Напишите формулы: а) оптической разности хода лучей; б) связи разности фаз с оптической разностью хода лучей; в) ширины интерференционной полосы; г) оптической разности хода в тонкой пленке; д) условия максимума и минимума при интерференции. (2 балла за каждый правильный ответ)
2. Сколько волн монохроматического света с длиной 5000 \AA уложится на пути 2 мм в вакууме? (5 баллов)
3. Разность хода двух интерферирующих лучей света равна $0,3\lambda$. Определить разность фаз. (7 баллов)

4. Почему при толщине пленки мыльного пузыря меньше четверти длины волны она кажется черной? (9 баллов)
5. Три когерентных источника расположены в вершинах равностороннего треугольника. С какой разностью фаз должны происходить колебания, чтобы в центре треугольника (точка пересечения биссектрис) амплитуда результирующего колебания равнялась нулю? (9 баллов)
6. В одной фотографической пластинке расстояние между полосами равной толщины в два раза больше, чем в другой. В какой пластинке клиновидность больше и во сколько раз? (10 баллов)
7. Две когерентные световые волны в результате интерференции взаимно погашаются в некоторой области. Куда девается их энергия? (10 баллов)

Основные типы задач и методы их решения

Основная задача при изучении интерференции заключается в расчете интерференционной картины, т.е. в нахождении распределения интенсивности электромагнитных волн в пространстве. Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды напряженности E_0 электрического поля электромагнитной волны, то основная задача интерференции сводится к нахождению амплитуды E_0 результирующего колебания в произвольной точке среды.

Классификация задач

1. Оптическая разность хода.
2. Интерференция волн от двух когерентных источников.
3. Интерференция в тонких пленках.
4. Интерференция в клиновидных пластинах и зазорах.
5. Применение интерференции.

Метод решения большинства задач по интерференции сводится к двум основным этапам: нахождение оптической разности хода и применение условия максимума или минимума.

Задачи начального уровня

1. Сколько длин волн монохроматического света с частотой $5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ уложится на пути 1,2 мм: в стекле, в вакууме?
2. Две одинаковые радиоантенны, удаленные на расстояние L , работают синфазно на частоте 10 МГц. При каком минимальном расстоянии между антеннами в направлении соединяющей их линии наблюдается минимум излучения?
3. На тонкую пленку с показателем преломления падает пучок белого света под углом α к нормали. При какой минимальной толщине пленки и в какой цвет будет окрашена пленка в отраженном свете?
4. На стеклянный клин нормально к его грани падает монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Число интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 10. Определить преломляющий угол клина ($n_{\text{ст}} = 1,5$).
5. В опыте с интерферометром Майкельсона для смещения интерференционной картины на 500 полос потребовалось переместить зеркало M на расстояние 0,15 мм. Найти длину волны падающего света.

Решения

Ответы

1. 2000; 3000.

2. 15 м.

3. Фиолетовый,

$$b_{\min} = \lambda_{\min} / 4(n^2 - \sin^2 \alpha).$$

4. $\alpha = 41,7''$.

5. $\lambda = 2L/k = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м.

Задачи достаточного уровня

1. Какой путь пройдет фронт волны монохроматического излучения в вакууме за то же время, за какое он проходит путь, равный 1 м, в воде?

2. Две антенны радиостанции излучают электромагнитные волны. Расстояние между антеннами равно $\lambda/2$, а колебания одной антенны отстают по фазе на половину периода. В каких направлениях будут наблюдаться максимумы и минимумы излучения?

3. Пленка толщиной порядка 0,01 мкм нанесена на подложку с показателем преломления меньшим, чем у пленки. Отражает ли пленка падающий свет?

4. На воздушном клине, образованном двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами и проволокой диаметром 0,01 мм, которая расположена на расстоянии 75 мм от линии соприкосновения пластин и параллельна ей, в отраженном свете наблюдаются интерференционные полосы равной толщины. Определить длину волны падающего света, если расстояние между полосами 1,5 мм.

5. Вычислить, каким показателем преломления n_1 должен обладать слой пленки, просветляющий поверхность стекла с показателем преломления $n_2 = 1,67$?

Решения

Ответы

1. 1,33 м.

2. Максимумы будут наблюдаться вдоль линии расположения излучателей, а минимумы – в перпендикулярном направлении.

3. Не отражает.

4. 0,4 мкм.

5. $n_{пл} = 1,3$.

Задачи высокого уровня

1. Предложите три способа компенсации оптической разности хода, которые можно использовать в интерферометрах.

2. При каком наименьшем расстоянии между двумя радиоантеннами и каком фазовом сдвиге излучаемых ими колебаний распространение результирующей радиоволны происходит в пределах угла π ? Нарисуйте диаграмму направленности излучения.

3. Темной или светлой будет видна в отраженном свете мыльная пленка толщиной $0,1\lambda$? Пленка находится в воздухе.

4. Для измерения толщины тонкой проволоочки ее положили между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами на расстоянии 75 мм от линии соприкосновения пластинок параллельно ей. При освещении системы пластинок монохроматическим светом ($\lambda = 0,5$ мкм) в отраженных лучах видны интерференционные полосы. Определить толщину проволоочки, если на расстоянии 30 мм насчитывается 16 светлых полос.

5. Необходимо просветлить поверхность стекла для зеленых лучей (0,55 мкм). Вычислить показатель преломления и наименьшую толщину просветляющей пленки, если показатель преломления стекла для зеленых лучей равен 1,52.

Решения

Ответы

1. Клиновидный, поворот плоскопараллельной пластины, кювета с газом, давление которого изменяют.

2. Минимальное расстояние между антеннами равно четверти длины волны, а фазовый сдвиг – $\pi/2$.

3. Темной.

4. 10 мкм.

5. $1,12 \cdot 10^{-5}$ см.

Ответы на вопросы теста и решение некоторых задач

Задачи начального уровня

2. 4000.

3. 0,6 п.

4. При толщине пленки мыльного пузыря меньше четверти длины волны пленка свет не отражает.

5. 120° .

6. Клиновидность больше в той пластинке, в которой расстояние между полосами равной толщины в два раза меньше.

7. Энергия перераспределяется в соседнюю область, в которой возникает максимум.

Задачи достаточного уровня:

5. Коэффициент отражения естественного света от границы раздела диэлектриков при нормальном падении света определяется формулой Френеля:

$$R = \Phi / \Phi_o = (n - n_o)^2 / (n + n_o)^2,$$

где Φ – отраженный световой поток; Φ_o – падающий световой поток; n и n_o – показатели преломления среды, в которой распространяются падающий и отраженный потоки.

Световой поток, отраженный от поверхности пленки, определим по формуле

$$\Phi_1 = \Phi_o (n_1 - n_o)^2 / (n_1 + n_o)^2,$$

а световой поток, отраженный от границы раздела “пленка – стекло”, – по формуле

$$\Phi_2 = \Phi_{o1} (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2,$$

где Φ_{o1} – световой поток, падающий на границу раздела.

Если считать, что отражение удалось устранить за счет интерференции, а поглощением можно пренебречь, то $\Phi_{o1} = \Phi_o$, тогда принимая для воздуха $n_o = 1$, получим

$$\Phi_o (n - 1)^2 / (n + 1)^2 = \Phi_o (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2,$$

т.е. $(n - 1) / (n + 1) = (n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)$, что приводит к уравнению

$$2n_1^2 = 2n_2, \quad n_1 = \sqrt{n_2}.$$

Подставляя численные значения n_2 , имеем $n_1 = 1,3$.

1.2. Дифракция света

Применение явления дифракции в приборах и технологии авиационно-космической техники:

1. Диспергирующие элементы (дифракционная решетка) приборов для спектрального анализа.
2. Рентгенографический анализ структуры вещества.
3. Фазоконтрастные системы получения увеличенного изображения.
4. Акустооптические модуляторы света.
5. Акустооптические системы обработки информации в реальном времени.
6. Френелева (плоская) оптика.

Необходимый теоретический материал

Дифракция света как изменение амплитудной и фазовой структур волны в области резких изменений оптических параметров среды. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция на отверстиях и диске. Дифракция плоских волн. Дифракция Фраунгофера на щели и дифракционной решетке.

Дифракционный предел разрешения оптических приборов. Дифракция рентгеновских лучей. Формула Вульфа – Брэгга.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Обратите внимание на то, что при описании дифракционных явлений используются такие волновые понятия: амплитуда, длина волны, фаза и разность фаз. Важно помнить, что при рассмотрении дифракции центральное место занимает принцип Гюйгенса – Френеля, которым постулируется генерация множеством точек волновой поверхности вторичных когерентных волн. Вследствие этого между дифракцией и интерференцией нет принципиальных различий. Основные формулы дифракции получены именно с помощью этого принципа. Метод зон Френеля позволяет установить условия максимумов и минимумов дифракции в случае, когда участки волновой поверхности симметричны (плоскость, сфера). Соответствие элементов симметрии волновой поверхности и преграды имеет существенное значение при описании дифракции. Так, условия максимума при дифракции на дифракционной решетке применимы только в случае дифракции плоской волны. С точки зрения применения волновых процессов в технике важно знать, что дифракция в принципе неустранима. Поэтому дифракционные явления определяют предельные параметры приборов, например, предел разрешения микроскопов (ультразвуковых, оптических или электронных).

Обратите внимание на различие смысла величин, входящих в формулы для дифракции Фраунгофера на щели и дифракционной решетке, а также роль монохроматичности света при возникновении дифракционных явлений.

Запомните, что дифракция – это результат интерференции вторичных волн. Дифракционная картина Френеля – это дифракционное изображение препятствия. Дифракционная картина Фраунгофера – это дифракционное изображение источника и препятствия.

Самоконтроль теоретического материала

- Чем определяются амплитуды, частоты и фазы вторичных волн?
- Какое дополнение к принципу Гюйгенса принадлежит Френелю?
- Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.
- В чем состоит метод зон Френеля?
- Почему расстояние от точки наблюдения до краев соседних зон Френеля должны отличаться на $\lambda/2$?
- Почему при наблюдении дифракции Френеля на круглом отверстии интенсивность света в центре дифракционной картины может достигать минимума, а при дифракции на диске – нет?
- В каком случае пятно Пуассона будет более ярким: при перекрытии диском первых трех или первых пяти зон Френеля?
- Как изменятся радиусы зон Френеля при увеличении длины волны света?
- Как изменятся радиусы зон Френеля при выполнении опыта в среде с большим показателем преломления?
- Опишите качественно изменения интенсивности света при дифракции Френеля на круглом отверстии, обусловленные удалением экрана от центра отверстия?
- Опишите изменения картины дифракции Фраунгофера при уменьшении ширины щели до λ .

- Как изменится картина дифракции Фраунгофера при наблюдении в среде с большим показателем преломления, например, в воде.
- Какой будет дифракционная картина при нормальном падении монохроматического света на две одинаковые скрещенные под прямым углом дифракционные решетки?
- Зависит ли картина дифракции рентгеновских лучей, полученная методом Дебая – Шерера, от угла падения излучения на образец?

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Изобразите вид дифракционной картины при нормальном падении монохроматического света на две одинаковые скрещенные под прямым углом дифракционные решетки? (9 баллов)

2. Почему при дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке с шириной щели b и постоянной d недопустимо, чтобы одновременно выполнялись условия $d \sin \alpha = n \lambda$; $b \sin \alpha = m \lambda$? (7 баллов)

3. Почему при фотографировании удаленных объектов (например, при космической съемке) используются объективы с как можно большим диаметром? (3 балла)

4. Зависит ли картина дифракции рентгеновских лучей, полученная методом Дебая – Шерера, от угла падения излучения на образец? (7 баллов)

5. На круглое отверстие диаметром $d = 4$ мм падает нормально параллельный пучок лучей ($\lambda = 0,5$ мкм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии $L = 1$ м от него. Сколько зон Френеля уложится в отверстии? (10 баллов)

6. На щель шириной b падает нормально параллельный пучок света с длиной волны λ . Каков наибольший порядок дифракционного минимума, который будет наблюдаться в данном случае? (5 баллов)

7. Что произойдет с дифракционной картиной, если щели дифракционной решетки перекрыть через одну? (8 баллов)

8. Почему при получении рентгенограммы по методу Лауэ используется “белое” излучение, а при получении рентгенограммы по методу Дебая – Шерера – монохроматическое? (7 баллов)

9. Каким образом можно ослабить влияние дифракционных явлений на характеристики оптических приборов? (4 балла)

Основные типы задач и методы их решения

При решении задач из раздела «Дифракция света» требуется определить угловые условия наблюдения максимумов или минимумов интенсивности света или геометрические параметры, соответствующие этим условиям. В основе решения лежит определение оптической разности хода вторичных лучей при заданной схеме дифракционного опыта.

Классификация задач

1. Дифракция сферической волны на круглом отверстии или диске.
2. Дифракция плоской волны на щели.
3. Дифракция плоской волны на дифракционной решетке.
4. Дифракция рентгеновских лучей.
5. Дифракционный предел разрешения оптических приборов.

Задачи начального уровня

1. На непрозрачную преграду с отверстием радиусом $R = 1$ мм падает монохроматическая плоская волна. Когда расстояние b_1 от преграды до установленного за ней экрана станет равно $0,575$ м, в центре дифракционной картины будет наблюдаться максимум интенсивности. При увеличении расстояния до значения $b_2 = 0,862$ м максимум интенсивности сменяется минимумом. Определить длину волны света.

2. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения лучей φ , который соответствует второй светлой полосе, равен 1° . Скольким длинам волн падающего света равняется ширина щели?

3. При нормальном падении белого света на дифракционную решетку спектры второго и третьего порядков частично перекрываются. На какую длину волны в спектре второго порядка налагается фиолетовая граница ($\lambda = 0,4$ мкм) спектра третьего порядка?

4. Какова длина волны монохроматического рентгеновского излучения, падающего на кристалл кальцита, если дифракционный максимум первого порядка наблюдается, когда угол скольжения φ между направлением падающих лучей и гранью кристалла равен 3° ? Принять, что расстояние между атомными плоскостями кристалла $d = 3 \text{ \AA}$.

5. Можно ли на расстоянии 2 км различить невооруженным глазом два находящихся столба, отстоящих друг от друга на 1 м? Диаметр зрачка принять равным 4 мм.

Решения

Ответы

1. $0,058$ мкм.

2. 14λ .

3. $0,6$ мкм.

4. $0,1048 \cdot 10^{-10}$ м.

5. Можно.

Задачи достаточного уровня

1. Фазовая зонная пластинка изготовлена из материала с показателем преломления $n = 1,5$. Какой минимальной высоты h должны быть выступы над четными (или нечетными) зонами пластинки для длины волны света $\lambda = 580$ мкм?

2. На дифракционную решетку падает нормально пучок света от разрядной трубки. Чему должна быть равна постоянная решетки, чтобы в направлении $\varphi = 41^\circ$ совпали максимумы двух линий: $\lambda_1 = 656,3$ нм и $\lambda_2 = 410,2$ нм?

3. Свет с длиной волны λ падает нормально на дифракционную решетку. Найти ее угловую дисперсию $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ в зависимости от угла дифракции α .

4. При прохождении пучка рентгеновских лучей с $\lambda = 17,8$ пм через поликристаллический образец на экране, расположенном на расстоянии $\ell = 15$ см от образца, образуется система дифракционных колец. Определить радиус светлого кольца, соответствующего второму порядку отражения от системы плоскостей с межплоскостным расстоянием $d = 155$ пм.

5. Квадратное отверстие освещается параллельным пучком солнечных лучей. Найти размер $L \times L$ изображения отверстия на экране, удаленном на 50 м от него. Сторона отверстия $L_0 = 0,2$ см. Границей освещенности на экране считать положение первого дифракционного минимума наиболее сильно отклоняемых лучей (видимый спектр 400...700 нм).

Решения

Ответы

1. $h_{\min} = 580$ нм.

2. 8 мкм.

3. $d\alpha/d\lambda = (tg\alpha)/\lambda$.

4. 0,0324 м.

5. $0,35 \cdot 0,35$ м².

Задачи высокого уровня

1. При дифракции плоской электромагнитной волны СВЧ-диапазона на круглом отверстии радиуса r_0 начальная длина волны была равна λ_0 . Затем радиус начали уменьшать по закону $r = r_0/(1 + \alpha t)$ (где $\alpha - \text{const}$, $t - \text{время}$). При каком законе изменения длины волны λ ее амплитуда будет оставаться максимальной?

2. На щель шириной b падает под углом α параллельный пучок света с длиной волны $\lambda = 0,56$ мкм. Под каким углом будет наблюдаться дифракционный минимум второго порядка?

3. Свет с длиной волны 535 нм падает нормально на дифракционную решетку. Найти ее период, если одному из фраунгоферовых максимумов соответствует угол дифракции 35° и наибольший порядок спектра равен пяти.

4. Узкий пучок рентгеновских лучей падает под углом скольжения $\alpha = 60^\circ$ на естественную грань монокристалла NaCl, плотность которого $\rho = 2,16$ г/см³. При отражении от этой грани образуется максимум второго порядка. Определить длину волны рентгеновского излучения.

5. В растровом рисунке изображение образовано точками различной насыщенности (т.е. разной "жирности"). С какого расстояния ℓ глаз перестанет различать отдельные точки и рисунок начинает выглядеть как непрерывный переход от более светлых мест к более темным, если число точек на 1 см² равно 2500? Диаметр зрачка принять равным 4 мм, а длину световой волны – 600 нм.

Решения

Ответы

1. $\lambda = \lambda_0/(1 + \alpha t)^2$.

2. $\beta = \arcsin(\sin \alpha - 2\lambda/b)$.

3. $d = 2,8 \cdot 10^{-6}$ м.

4. $1,49 \cdot 10^{-10}$ м.

5. $l \leq 10,9$ м.

Ответы на вопросы теста

2. При одновременном выполнении условий $d \sin \alpha = n \lambda$ и $b \sin \alpha = m \lambda$ лучи, испытывающие дифракцию на отдельной щели, будут взаимно погашаться. Поэтому соответствующие углу α главные максимумы дифракционной картины от всей решетки будут отсутствовать.

3. Применение для съемки удаленных объектов объективов большого диаметра обеспечивает достижение их большего разрешения, которое ограничивается дифракцией света.

4. Не зависит, так как при реализации метода Дебая – Шерера образец представляет собой поликристалл, в котором независимо от угла падения излучения всегда имеется множество кристаллитов с любыми ориентациями кристаллографических плоскостей относительно направления излучения.

5. 8.

6. b / λ .

7. Перекрытие щелей дифракционной решетки через одну эквивалентно увеличению постоянной решетки d вдвое. В соответствии с формулой $d \sin \alpha = n \lambda$ увеличение d вдвое вызовет уменьшение в то же число раз $\sin \alpha$ для каждого из максимумов. Их интенсивность также уменьшится вдвое. В такое же число раз уменьшится разрешающая способность дифракционной решетки.

8. Для выполнения условия Вульфа – Брэгга.

9. Радикальным способом ослабления влияния дифракции на характеристики оптических приборов является увеличение диаметра их входных элементов, например линз.

1.3. Поляризация электромагнитных волн

Использование поляризационных явлений в авиационно-космической технике:

1. Радиолокация и телеметрия.
2. Модуляция-демодуляция световых пучков, в том числе в оптоволоконных линиях связи.
3. Измерительная техника (поляриметрия, эллипсометрия и др.);
4. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и узлов авиационной и космической техники.
5. Формирование «стереоизображений» (объемных изображений).
6. Космическое зондирование земной поверхности (поиск полезных ископаемых, определение толщины льда и др.).

Необходимый теоретический материал

Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса. Поляризация при отражении. Двойное лучепреломление. Прохождение плоскополяризованного света через кристаллическую пластинку. Фазовые пластинки. Вращение

плоскости поляризации. Искусственное двойное лучепреломление и применение поляризации.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Повторите следующие понятия: амплитуда колебаний; световой вектор; интенсивность света и связь её с амплитудой; оптическая разность хода лучей; показатель преломления среды; анизотропия среды.

Проработку теоретического материала по данной теме начните с создания целостного представления о явлении поляризации электромагнитных волн, эффектах, которые непосредственно связаны с явлением поляризации, а также его практическим использованием.

Обратите внимание на следующее:

- 1) поляризация – это свойство пространственного упорядочения колебательного процесса;
- 2) угол Брюстера – это такой угол падения, при котором луч, отраженный от границы раздела двух диэлектриков, полностью поляризован;
- 3) закон Брюстера неприменим в случае отражения от поверхности проводников (металлов);
- 4) двойное лучепреломление – это проявление оптической анизотропии среды;
- 5) оптическая ось кристалла – это такое направление в кристалле, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь и с одинаковой скоростью;
- 6) задерживающие пластинки в четверть волны применяются для изменения состояния поляризации света в разнообразных приборах;
- 7) оптически-активные вещества – это вещества, вращающие плоскость поляризации проходящего через них света.

Самоконтроль теоретического материала

- В чем состоит различие эллиптически поляризованного света и света, поляризованного по кругу?
- Чему равен угол между отраженным и преломленным лучами при падении естественного света на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера?
- В каком случае при падении поляризованного света на границу раздела двух диэлектриков не будет отраженного луча?
- Почему при освещении совершенного поляризатора естественным светом интенсивность выходящего света на 50 % меньше интенсивности входящего?
- В каком случае при прохождении света через прозрачную анизотропную среду не наблюдается двулучепреломление?
- Как из плоскополяризованного света получить свет, поляризованный по эллипсу; по кругу?
- Как из эллиптически поляризованного света получить плоскополяризованный?
- При каком условии при прохождении плоскополяризованного света через кристалл наблюдается наиболее сильное вращение плоскости поляризации?
- В каком случае при помещении между параллельными николями оптически активного вещества монохроматический свет не проходит через систему?

Тесты для определения уровня сложности задания

1. Напишите: а) закон Малюса; б) закон Брюстера; в) связь разности показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей при искусственной оптической анизотропии с механическим напряжением; г) связь разности показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей при искусственной оптической анизотропии жидкостей и аморфных тел, вызванной электрическим полем с напряженностью \vec{E} . (2 балла за каждый ответ)

2. Электрическая составляющая электромагнитной волны, В/м, задана уравнением $\vec{E} = 5 \cos(10^9 t - 10^6 z) \vec{i}$. Укажите амплитуду, частоту и состояние поляризации волны, а также направление её распространения. (5 баллов)

3. Укажите степень поляризации отраженного луча, если угол падения равен углу Брюстера. (7 баллов)

4. На совершенный поляризатор падает поляризованный по кругу свет, интенсивность которого равна I_0 . Какова будет интенсивность света I на выходе поляризатора? Будет ли меняться интенсивность I при вращении поляризатора? (10 баллов)

5. Ветровое стекло и фары автомобилей снабжаются пластинками из поляроида. Как должны быть расположены эти пластинки, чтобы шофер мог видеть дорогу, освещенную светом его фар, и не страдал бы от света фар встречных машин? (10 баллов)

6. Почему пластинка льда, помещенная между двумя скрещенными николями, при наблюдении в белом свете может иметь цветовую окраску, изменяющуюся в процессе таяния льда? (15 баллов)

Основные типы задач и методы их решения

Решение задач по теме «Поляризация электромагнитных волн» в зависимости от условия сводится к определению состояния поляризации волны или степени поляризации либо к расчету амплитуды волны после взаимодействия её со средой, т.е. нахождению интенсивности света, отраженного или прошедшего через анизотропную среду.

Классификация задач

1. Состояние поляризации волны.
2. Поляризация света при отражении.
3. Закон Малюса.
4. Двойное лучепреломление.
5. Искусственное двойное лучепреломление.

Задачи начального уровня

1. Колебания светового вектора описываются уравнением $\vec{E} = A \cos(10^8 t - kz) \vec{i} + B \sin(10^8 t - kz) \vec{j}$. Укажите направление распространения волны и состояние поляризации, если: 1) $A = B = 10$ В/м; 2) $A = 10$ В/м, $B = 15$ В/м.

2. Найти показатель преломления n стекла, если отраженный от него луч света полностью поляризован при угле преломления $\beta = 30^\circ$.

3. Анализатор в два раза уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора. Пренебрегая потерями в анализаторе, определить угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

4. Пучок плоскополяризованного монохроматического света ($\lambda = 589$ нм) падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно к его оптической оси. Найти длины волн обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле, если показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно равны $n_o = 1,66$ и $n_e = 1,49$.

5. Стеклянная пластинка толщиной 5 мм, помещенная между скрещенными николями, подвергается механическому сжатию, вследствие чего возникает оптическая разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей $\Delta = 1500$ нм. Определить напряжение в пластинке, если коэффициент фотоупругости стекла $k = 10^{-6}$ м²/Н.

Решения

Ответы

1. Направление распространения вдоль оси z; 1) круговая поляризация; 2) эллиптическая поляризация.
2. 1,73.
3. 45°.
4. $\lambda_o = 355$ нм; $\lambda_e = 395$ нм.
5. 300 Н/м².

Задачи достаточного уровня

1. Колебания светового вектора, В/м, описываются уравнением $\vec{E} = 15 \cos(10^6 t - kz) \vec{i} + 20 \cos(10^6 t - kz) \vec{j}$. Укажите состояние поляризации, направление распространения волны и определите её амплитуду и угол между плоскостью колебаний и осью x.

2. Луч света отражается от грани алмаза, погруженного в воду. При каком угле падения отраженный луч максимально поляризован?

3. Луч естественного света интенсивностью I_0 проходит расположенные последовательно три совершенных поляризатора. Угол между главными плоскостями первого и второго поляризаторов составляет φ_1 , а между такими же плоскостями первого и третьего поляризаторов – φ_2 . Определите интенсивность света луча после прохождения им каждого из поляризаторов.

4. В каких случаях тонкая кристаллическая пластинка, помещенная между скрещенными николями, кажется темной в монохроматическом свете?

5. Рассчитайте длину пластин конденсатора в модуляторе лазерного луча на основе эффекта Керра, если расстояние между ними $d = 2,5$ мм, модулирующее напряжение $U = 7,5$ кВ, ячейка Керра заполнена нитробензолом (принять постоянную Керра $B = 2,2 \cdot 10^{-12}$ м/В²).

Решения

Ответы

1. Плоскополяризованная волна; направление распространения вдоль оси z; амплитуда – 25 В/м; угол между плоскостью колебаний и осью x – 53,13°.
2. 61°12'.
3. $I_1 = 0,5I_0$, $I_2 = 0,5I_0 \cos^2 \varphi_1$,

- $I_3 = 0.5I_0 \cos^2 \varphi_1 \cos^2(\varphi_2 - \varphi_1)$.
4. а) когда пластинка вырезана перпендикулярно оптической оси; б) когда пластинка создает разность хода, равную четному числу полуволн.
5. 0,012 м.

Задачи высокого уровня

1. Свет, электрическая составляющая которого описывается уравнением $\vec{E} = A \cos(\omega t - kz) \vec{i} + B \sin(\omega t - kz) \vec{j}$ ($A \neq B$), после прохождения через поляризатор образует пятно на экране. Что будет наблюдаться на экране при вращении поляризатора вокруг направления луча?

2. Узкий пучок естественного света падает под углом Брюстера на стопу Столетова. Определите степень поляризации P преломленного луча в зависимости от количества пластинок N , из которых состоит стопа Столетова.

3. Частично плоскополяризованный свет рассматривается через николю. При повороте николя на 60° от положения, соответствующего максимальной яркости, яркость пучка уменьшается в два раза. Найти степень поляризации пучка.

4. С помощью каких устройств и каким образом можно отличить друг от друга: 1) эллиптически поляризованный свет; 2) смесь света естественного с линейно-поляризованным светом; 3) смесь естественного света с эллиптически поляризованным светом?

5. Какую разность потенциалов надо приложить к пластинам конденсатора при наблюдении эффекта Керра в нитробензоле, чтобы конденсатор действовал как пластинка в четверть длины волны? Постоянная Керра B для нитробензола при длине волны монохроматического света 589 нм и температуре 20°C равна $2,2 \cdot 10^{-12}$ м/В². Какова при этом разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей? Длина пластин конденсатора $l = 3$ см и расстояние между ними $d = 1$ мм.

Решения

Ответы

$$2. P = (1 - \tau \alpha^{4N}) = (1 + \alpha^{4N}),$$

где N – количество

$$\text{пластин, } \alpha = \frac{2n}{(1+n^2)},$$

n – показатель преломления.

$$3. P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{1}{3}.$$

$$5. 1860 \text{ В; } 4,9 \cdot 10^{-6}.$$

Ответы на вопросы теста

1. а) $I = I_0 \cos^2 \varphi$;

б) $\text{tg } \theta_{\text{Бр}} = n_{12}$;

в) $n_o - n_e = k\sigma$;

г) $n_o - n_e = kE^2$.

2. Амплитуда $E_0 = 5 \text{ В/м}$; частота $\omega = 10^9 \text{ рад/с}$; волна плоскополяризованная; направление распространения – вдоль оси z .
3. Отраженный луч полностью поляризован (степень поляризации $P = 1$).
4. Интенсивность света, поляризованного по кругу, при прохождении через поляризатор уменьшится на 56 % с учетом потерь на отражение (4 %). Вращение поляризатора не сопровождается изменением интенсивности света.
5. В ветровом стекле и фарах автомобиля главные плоскости поляризаторов должны быть параллельными и составлять угол с горизонтом 45° . При этом у всех автомобилей они должны быть повернуты в одну и ту же сторону (смотря по ходу автомобиля).
6. При образовании льда возникают локальные механические напряжения, определяющие оптическую анизотропию и, как следствие, искусственное двойное лучепреломление. Проходя через лед, обладающий оптической анизотропией, плоскополяризованный свет распадается на две волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях, которые распространяются с разными скоростями. Если свет монохроматичен, то между этими волнами после прохождения через пластинку возникает разность фаз, и при сложении они образуют, в общем случае, эллиптически поляризованную волну. Ориентировка и форма эллипса будут зависеть от разности фаз. При одной и той же толщине пластинки они будут изменяться с изменением длины волны. Доля света, проходящего через анализатор, зависит от формы эллипса и его ориентации относительно главной плоскости анализатора. Поэтому если падающий свет белый, то различные монохроматические компоненты его будут в разной степени пропущены системой. Этим и обусловлена цветовая окраска.

Решение некоторых задач

Задачи достаточного уровня:

5. Модулятор на основе эффекта Керра представляет собой ячейку Керра, помещенную между скрещенными поляризаторами. При приложении напряжения к пластинам конденсатора в нитробензоле возникает двойное лучепреломление. При длине пластины l между обыкновенным и необыкновенным лучами возникает оптическая разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e)l = klE^2$$

и разность фаз

$$\delta = \frac{\Delta}{\lambda} 2\pi = 2\pi \frac{k}{\lambda} lE^2 = 2\pi B l E^2,$$

где n_o , n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно; E – напряженность поля.

Так как напряженность поля $E = \frac{U}{d}$, то длина пластин

$$l = \frac{\delta}{2\pi B} \frac{d^2}{U^2}.$$

Для наибольшей глубины модуляции нужно чтобы разность фаз составляла

$$\delta = \frac{\pi}{2}.$$

Тогда

$$l = \frac{\pi(2,5 \cdot 10^{-3})^2}{4\pi \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} (7,5 \cdot 10^3)^2} = 0,012 \text{ м.}$$

Задачи высокого уровня:

1. Свет поляризован по эллипсу, поэтому при повороте поляризатора будет наблюдаться плавное изменение интенсивности от некоторого минимального значения до максимального (за один полный поворот будет два раза достигаться максимальное и два раза минимальное значение интенсивности).

2. $P = (1 - \alpha^{4N}) / (1 + \alpha^{4N})$, где N – количество пластин, $\alpha = \frac{2n}{(1+n^2)}$, n – показатель

преломления.

3. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного и плоскополяризованного. Пусть I_n – интенсивность поляризованного света, а I_e – интенсивность естественного света. При первом положении николя интенсивность прошедшего света равна

$$I_n + \frac{1}{2} I_e,$$

а при втором

$$I_n \cos^2 60^\circ + \frac{1}{2} I_e = \frac{1}{4} I_n + \frac{1}{2} I_e.$$

Согласно условию

$$I_n + \frac{1}{2} I_e = 2 \left(\frac{1}{4} I_n + \frac{1}{2} I_e \right),$$

откуда $I_n = I_e$.

Таким образом, максимальная интенсивность составляет $I_{\max} = I_n$, а минимальная – $I_{\min} = \frac{1}{2} I_n$.

Степень поляризации пучка $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{1}{3}$.

4. Надо поместить на пути распространения света пластинку в четверть длины волны, а за ней – николю. Если вращением пластинки вокруг направления луча можно найти такое положение, при котором свет, прошедший через нее, можно погасить последующим вращением николя, то падающий свет эллиптически поляризован. Если это сделать не удастся, то мы имеем дело либо со смесью естественного света с линейно поляризованным, либо со смесью естественного света с эллиптически поляризованным. Для того чтобы отличить друг от друга два последних случая, на пути света ставят сначала только один николю и устанавливают его на минимум интенсивности проходящего света. Затем перед николем помещают пластинку в четверть длины волны. Вращением пластинки и николя снова добиваются минимума интенсивности. Если этот минимум интенсивности получается при прежнем положении николя (или при повороте его на 180°), то мы имеем смесь естественного света с линейно поляризованным. Если же для получения минимума требуется повернуть николю на некоторый угол, то это смесь естественного света с эллиптически поляризованным.

2. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Разделы: 1. Тепловое излучение. 2. Фотоны. 3. Атом водорода.

Повторите: первый и второй законы термодинамики. Нарисуйте электромагнитные волны разных интенсивностей. Чему равна плотность энергии волны; интенсивность? Какие параметры характеризуют импульс волны? Как объясняют давление света с волновой точки зрения?

Бегло прочитайте разделы квантовой оптики, не останавливаясь на выводах формул, и создайте целостное представление о всех проявлениях корпускулярных свойств света.

Контрольные вопросы:

1. Какой параметр фотона определяет его импульс, энергию и давление света?
2. Какова роль частоты волны в квантовой оптике?
3. Какие факты и противоречия привели Планка к созданию квантовой теории излучения?

2.1. Тепловое излучение

Квантовая оптика в авиационно-космической технике:

1. Системы ИК-зондирования поверхности Земли.
2. Системы лазерного зондирования атмосферы.
3. Оптическая пирометрия – дистанционное определение температуры.
4. Системы детектирования радиоактивного заражения земли.
5. Системы дистанционного контроля при получении и обработке материалов и др.
6. Космическая медицина – контроль функционального состояния космонавтов, летчиков с использованием тепловизоров.

Необходимый теоретический материал

Тепловое излучение. Абсолютно черное тело (АЧТ). Закон Кирхгофа. Закон Стефана – Больцмана. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Квантовая гипотеза и формула Планка. Физические основы оптической пирометрии.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Вначале создайте целостное представление о тепловом излучении. Для этого прочитайте бегло весь раздел, опуская выводы формул и детали. Вспомните, встречались ли Вы с тепловым излучением (радиационный нагрев, лампы накаливания, тепловизоры и др.)?

Детально проработайте теоретический материал: дополните конспект лекций и выделите в нем наиболее важные законы, принципы. Выявите взаимосвязи между законами. Выпишите формулы.

Обратите внимание на следующее:

- а) с теорией теплового излучения АЧТ связан переход от классической физики к квантовой;
- б) все законы теплового излучения АЧТ выводятся из формулы Планка, а формулы Вина и Рэлея – Джинса являются предельными случаями этой формулы;
- в) АЧТ является идеальным тепловым излучателем.

Запомните:

- а) тепловое излучение – это равновесное излучение, к которому применимы законы термодинамики;
- б) при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом монохроматическое электромагнитное излучение с частотой ν и волновым

вектором k ведет себя как поток одинаковых частиц, называемых фотонами, с энергией $h\nu$, импульсом $h\nu/c$, массой $h\nu/c^2$;

в) в оптической пирометрии коэффициент теплового излучения тела определяется отношением его энергетической светимости к энергетической светимости АЧТ при той же температуре.

Самоконтроль теоретического материала

- Какую роль в квантовой оптике играет постоянная Планка?
- Почему спектр излучения тела, моделирующего АЧТ, не зависит от типа материала, из которого тело изготовлено?
 - Какие параметры излучения АЧТ позволяют определить его температуру?
 - Как найти энергетическую светимость, если известен спектральный состав излучения?
 - Почему излучение из маленького отверстия нагретого тела ближе к равновесному, чем излучение из отверстия большего диаметра той же глубины?
 - В каких случаях и почему окна домов кажутся с улицы черными?
 - Какую полезную информацию можно получить, определив длину волны максимума в спектре излучения АЧТ?
 - Почему тепловое излучение кварцевого стекла при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$ визуально не заметно, тогда как железо при данной температуре ярко-белое?
 - Как с помощью теплового излучения можно дистанционно измерить температуру нагретых тел с наибольшей точностью?

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Напишите: а) закон Стефана – Больцмана; б) закон смещения Вина; в) закон Кирхгофа; г) Формулу Планка; д) как связана энергетическая светимость со спектральной плотностью светимости тела. (2 балла за каждый правильный ответ)

2. Определите интервал частот, соответствующих видимому диапазону электромагнитных волн (от 0,4 до 0,7 мкм). (5 баллов)

3. Определите интервал энергии в электрон-вольтах, соответствующий видимому диапазону электромагнитных волн (от 0,4 до 0,7 мкм). (7 баллов)

4. Почему металлический шар остывает быстрее, чем стеклянный того же диаметра (температура шаров одинакова)? (8 баллов)

5. Если температуру тела уменьшить в два раза, то во сколько раз уменьшится энергетическая светимость тела? (5 баллов)

6. Чему равна поглощательная способность тела на определенной длине волны света и температуре, если для этих условий известна его спектральная плотность светимости? (10 баллов)

7. Графически представить зависимости $r_{\nu,T}^*$ от частоты при температурах $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$. (10 баллов)

Основные типы задач и методы их решения

Основная задача при изучении теплового излучения заключается в расчете радиационного нагрева или охлаждения тел с известным коэффициентом излучения.

Решение большинства задач по тепловому излучению сводится к двум основным этапам: нахождение энергетической светимости, спектральной

плотности светимости и применение законов излучения АЧТ с учетом коэффициента излучения.

Классификация задач

1. АЧТ. Закон Кирхгофа.
2. Закон Стефана – Больцмана.
3. Законы Вина.
4. Формула Планка.
5. Применение теплового излучения.

Задачи начального уровня

1. Нарисуйте спектр излучения АЧТ. Покажите графически испускательную способность $r_{\nu,T}^*$ и энергетическую светимость R , а также запишите связь между ними.

2. При какой температуре энергетическая светимость АЧТ равна 10 кВт/м^2 ?

3. На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности светимости АЧТ при температуре 0°C ?

4. Вывести закон Стефана – Больцмана на основании формулы Планка.

5. Яркостной температурой тела называется такая температура, при которой АЧТ имеет при определенной длине волны ту же монохроматическую яркость излучения, что и данное тело. Найти связь между истинной температурой $T_{\text{и}}$ и яркостной температурой $T_{\text{я}}$ для серого тела с коэффициентом теплового излучения $\varepsilon_{\lambda,T}$.

Указание. Воспользуйтесь формулой Вина.

Решения

Ответы

$$1. R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu,T}^* d\nu.$$

2. 648 К .

3. $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$.

$$5. T = C_2 / (\lambda \ln \varepsilon_{\lambda,T} + C_2 / \lambda T_1).$$

Задачи достаточного уровня

1. Испускательная способность некоторого тела описывается законом $r_{\omega} = r_0 \exp(-\alpha\omega)$, где r_0 и α – постоянные. Определить энергетическую светимость тела.

2. Поток энергии Φ , излучаемой из смотрового окошка плавильной печи, равен 34 Вт . Определить температуру печи, если площадь окошка $S = 6 \text{ см}^2$.

3. Температура АЧТ увеличилась в два раза, в результате чего λ_{max} уменьшается на 600 нм . Определить начальную и конечную температуру тела.

4. Для формулы Планка сформулировать критерии высокой и низкой температур и установить для них предельные выражения.

5. Оптическим пирометром, снабженным светофильтром ($\lambda = 0,665 \text{ мкм}$), измерена яркостная температура тела. Определить истинную температуру, если

яркостная температура тела оказалась 2600 К. Коэффициент теплового излучения поверхности тела равен 0,8.

Решения

Ответы

1. $R = r_0 / \alpha$.
2. $T = 138 \text{ К}$.
3. $T_1 = 2420 \text{ К}$,
 $T_2 = 4840 \text{ К}$.
4. Критерий высокой температуры $h\nu / kT \ll 1$, критерий низкой температуры $h\nu / kT \gg 1$.
5. $T = 2680 \text{ К}$.

Задачи высокого уровня

1. Два шара одинаковых размеров из стекла и графита нагреты до температуры T . Эти тела изолированы друг от друга и помещены в вакуум. Представьте на графике качественно зависимости температуры каждого шара от времени. Объясните, чем определяется скорость изменения температуры.

2. Какую температуру должно иметь тело, чтобы при температуре окружающей среды 17°С оно излучало в 100 раз больше энергии, чем поглощало?

3. На одном рисунке представить и сравнить спектры излучения АЧТ для двух температур: T_1 и $T_2 = 2 T_1$.

4. В формуле Планка для испускательной способности АЧТ и формулах законов Вина перейти от длины волны λ к частоте.

Указание. Учесть равенство энергий, приходящихся на интервал длин волн от λ до $\lambda + \Delta \lambda$, и соответствующий интервал частот от ν до $\nu + \Delta \nu$.

5. Истинная температура вольфрамовой пластинки равна 2400 К. Яркостная температура той же пластинки, измеренная оптическим пирометром, снабженным фильтром (0,665 мкм), равна 2190 К. Вычислить коэффициент теплового излучения поверхности пластинки для указанных длины волны и температуры.

Решения

Ответы

1. Скорость изменения температуры пропорциональна энергетической светимости тела.
2. $T = 916 \text{ К}$.
- 3.

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1};$$

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1};$$

$$\lambda_m = \frac{b}{T}; \nu_m = \frac{c}{b} T$$

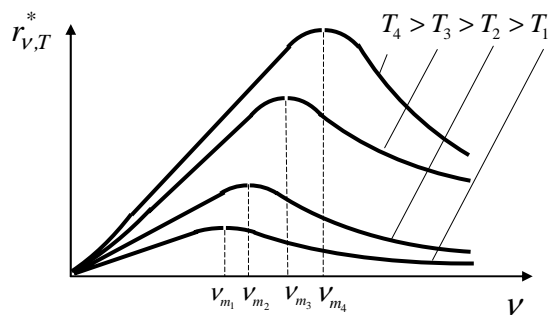
(c – скорость света).

4. 0,43.

Ответы на вопросы теста

1. $R_T^* = \sigma T^4$; $\lambda_m = \frac{b}{T}$; $\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = r_{\nu,T}^*$; $r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$.
2. От $7,5 \cdot 10^{14}$ до $3,95 \cdot 10^{14}$ Гц.
3. От 3,1 до 1,77 эВ.
4. Исходя из закона Кирхгофа тело, которое больше поглощает, обладает большей спектральной плотностью светимости.
5. Энергетическая светимость нагретого тела уменьшится в 16 раз в соответствии с законом Стефана – Больцмана.
6. Взаимосвязь поглощательной и испускательной способности тела определяется законом Кирхгофа, т.е. $\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = r_{\nu,T}^*$.

7.



Решение некоторых задач

Задачи начального уровня:

4. Используя формулу Планка для энергетической светимости абсолютно черного тела, получим

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu,T}^* d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu.$$

Чтобы выполнить интегрирование, следует ввести безразмерную переменную интегрирования

$$x = \frac{h\nu}{kT}$$

и учесть, что

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15},$$

тогда

$$dx = \frac{h}{kT} d\nu, \quad d\nu = \frac{kT}{h} dx.$$

Отсюда

$$R_T = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \sigma T^4,$$

$$\text{где } \sigma = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}.$$

Тогда, подставив значения постоянных, получим

$$\sigma = (5,67032 \pm 0,00071) \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 к^4}.$$

Таким образом, формула Планка позволила не только получить закон Стефана – Больцмана, но и найти величину постоянной σ .

5. Если применима формула Вина, то спектральная плотность яркости АЧТ вычисляется по формуле

$$V_{\lambda, T}^* = (C_1 / \pi) \exp(-C_2 / \lambda T_{я}).$$

Спектральная плотность яркости излучения серого тела равна

$$V_{\lambda, T} = (\varepsilon_{\lambda, T} C_1 / \pi) \exp(-C_2 / \lambda T).$$

По определению яркостной температуры $V_{я \lambda, T} = V_{\lambda, T}^*$. Следовательно,

$$(C_1 / \pi) \cdot \exp(-C_2 / \lambda T_{я}) = (\varepsilon_{\lambda, T} C_1 / \pi) \exp(-C_2 / \lambda T).$$

После логарифмирования получаем

$$-C_2 / \lambda T_{я} = -C_2 / \lambda T + \ln \varepsilon_{\lambda, T}.$$

Отсюда

$$T = C_2 / (\lambda \ln \varepsilon_{\lambda, T} + C_2 / \lambda T_1).$$

2.2. ФОТОНЫ

ФОТОНЫ в авиационно-космической технике:

1. Лазерная техника.
2. Фотонная техника – счетчики фотонов (регистрация сверхслабых световых потоков, космическое зондирование и т.п.).
3. Атомная энергетика.
4. Спектрометрические методы определения состава веществ.

Необходимый теоретический материал

Масса, импульс и энергия фотона. Внешний фотоэффект. Рентгеновское тормозное излучение. Давление света. Эффект Комптона.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Для получения целостного представления о явлениях, в которых электромагнитное излучение ведет себя как поток фотонов, бегло прочитайте весь раздел, опуская при этом выводы формул и детали. Тщательно проработайте теоретический материал: дополните конспект лекций, выделите наиболее важное, выпишите формулы.

Обратите внимание на то, чем обусловлен внешний фотоэффект; эффект Комптона; что давление света можно объяснить как с волновой, так и корпускулярной точек зрения.

Запомните, что при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом монохроматическое излучение с большой частотой ведет себя как совокупность фотонов с энергией $E = h\nu$, импульсом $k = \frac{h}{\lambda}$ и массой $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

Самоконтроль теоретического материала

- Что такое внешний фотоэффект и каковы его основные закономерности?
- Что называется “красной” границей фотоэффекта?
- Что такое задерживающая разность потенциалов?
- В чем заключается эффект Комптона? Почему этот эффект сильно выражен на более легких материалах?
 - Как можно объяснить давление света?
 - Как объяснить наличие предельной длины волны (частоты) в распределении энергии в сплошном рентгеновском спектре?

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Напишите: 1) уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта; 2) выражение для изменения длины волны электромагнитного излучения в эффекте Комптона; 3) выражение для давления света при коэффициенте отражения ρ . (2 балла за каждый ответ)

2. Дайте определение “красной” границы фотоэффекта. Почему ее существование нельзя объяснить с помощью волновой теории? (8 баллов)

3. Как определить граничную длину волны в распределении энергии сплошного рентгеновского спектра и от чего она зависит? (5 баллов)

4. Почему величина $\Delta\lambda$ в эффекте Комптона не зависит от природы рассеивающего вещества? (7 баллов)

5. Если интенсивность света, падающего на поверхность фотокатода, увеличить в два раза, то во сколько раз изменится ток насыщения фотоэлемента? (8 баллов)

6. Определить давление света на зеркальную поверхность, если интенсивность падающего света I , а угол падения α . (10 баллов)

7. Нарисовать зависимость задерживающего напряжения от частоты падающего света для металлов с разной работой выхода. Какие фундаментальные физические постоянные могут быть получены с помощью этих зависимостей? (10 баллов)

Классификация задач:

1. Световые кванты.
2. Фотоэффект.
3. Эффект Комптона
4. Давление света.

Основные типы задач и методы их решения

При решении задач по теме “Световые кванты” следует иметь в виду, что в основе описания взаимодействия фотонов с веществом лежат законы сохранения энергии и импульса.

В этих задачах, как правило, требуется определить основные характеристики (энергию и импульс) и число фотонов.

Основным уравнением при решении задач по теме “Фотоэффект” является уравнение Эйнштейна. В ряде задач используется понятие задерживающей разности потенциалов.

При решении задач по теме “Эффект Комптона” для расчета искомых величин чаще всего используется выражение для изменения длины волны фотона при рассеивании на электроны и закон сохранения энергии. В задачах, в которых необходимо определить световое давление, используется формула для давления света.

Задачи начального уровня

1. Найти энергию, массу и импульс фотона, если соответствующая ему длина волны $\lambda = 1,6$ нм.

2. Нарисовать зависимость фототока от напряжения между электродами. Чему равен фототок насыщения?

3. Для калия “красная” граница фотоэффекта $\lambda_{\max} = 0,62$ мкм. Какую максимальную скорость могут иметь фотоэлектроны, вылетающие при облучении калия фиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 0,42$ мкм?

4. Определить максимальную энергию фотона, если напряжение между электродами в рентгеновской трубке $U = 50$ кВ.

5. Определить давление, оказываемое светом на некоторую поверхность, если свет падает нормально к поверхности, интенсивность света $I = 2 \cdot 10^3$ Вт/см² и коэффициент отражения $\rho = 0,8$.

6. Вычислить кинетическую энергию электрона отдачи, если длина волны падающего фотона $\lambda = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м, рассеянного – $\lambda' = 4,86 \cdot 10^{-12}$ м.

Решения

Ответы

- $E = 0,72$ эВ, $m = 1,38 \cdot 10^{-30}$ кг, $P = 4,1 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с.
- В предположении единичного квантового выхода фотоэффекта фототок насыщения равен потоку фотонов, умноженному на заряд электрона.
- $V = 5,8 \cdot 10^5$ м/с.
- $E = 8 \cdot 10^{-15}$ Дж.
- $P = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Па.
- $W = 4,09 \cdot 10^{-14}$ Дж.

Задачи достаточного уровня

1. Точечный источник монохроматического света ($\lambda = 550$ нм) излучает световой поток мощностью $P = 10$ Вт. На каком расстоянии можно заметить этот источник, если пороговая чувствительность глаза к указанной длине волны соответствует потоку из $n = 60$ фотонов за секунду. Диаметр зрачка $d = 0,5$ см, поглощением света в воздухе можно пренебречь.

2. Найти длину волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра, если известно, что скорость электронов V , подлетающих к антикатоде трубки, равна $0,85c$.

3. Квант света с длиной волны $\lambda = 232$ нм освобождает с поверхности платинового электрода фотоэлектрон. Чему равен импульс, сообщаемый при этом электроду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему фотону ($A_{\text{вых}} = 5,3$ эВ).

4. Рубиновый лазер излучает в импульсе длительностью 0,1 мс энергию 10 Дж в виде узкого, почти параллельного пучка монохроматического света. Найти среднее за время импульса давление пучка света, если его сфокусировать в пятнышко диаметром 10 мкм на поверхность перпендикулярно пучку с коэффициентом отражения, равным 0,5.

5. При комптоновском рассеянии энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния $\theta = \pi/2$. Найти энергию и импульс рассеянного фотона.

Решения

Ответы

$$1. r = \sqrt{\frac{P\lambda d^2}{16hcn}} = 0,85 \cdot 10^6 \text{ м.}$$

$$2. \lambda = 0,028 \text{ \AA.}$$

$$3. 1,33 \cdot 10^{-25} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$$

$$4. P = 6,4 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$5. E = 256 \text{ кэВ,}$$

$$P = 1,36 \cdot 10^{-22} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$$

Задачи высокого уровня

1. Как изменится вид вольт-амперной характеристики фотоэлемента, если:
а) при неизменной длине волны света в два раза увеличится световой поток; б) при неизменном световом потоке вдвое увеличится частота используемого монохроматического света. Во всех случаях квантовый выход электронов одинаков.

2. Находящийся в вакууме легкий цилиндр может с очень малым трением вращаться вокруг своей оси. Половина поверхности цилиндра окрашена в черный цвет, другая половина – зеркальная. Каким будет положение устойчивого равновесия цилиндра под действием света, если световые лучи перпендикулярны оси цилиндра?

3. Возможен ли процесс, при котором кинетическая энергия электрона отдачи равнялась бы энергии налетающего фотона?

4. Имеется два источника монохроматического излучения одинаковой мощности. Длина волны излучения первого источника равна 2000 Å, а второго – 8400 Å. При облучении никелевой пластинки излучением от первого источника она заряжается положительно. Второй источник такого эффекта не производит. Почему?

5. Как с помощью явления внешнего фотоэффекта отличить пластины, изготовленные из разных металлов?

Решения

Ответы

3. Нет.

4. Длина волны излучения от второго источника больше предельной длины “красной” границы

фотоэффекта для
никеля.
5. Да.

Ответы на вопросы теста

2. $\nu_{кр} = \frac{A}{h}$. Электромагнитная волна, воздействуя на тело, должна вызывать вынужденные колебания электронов с амплитудой, пропорциональной амплитуде и соответственно интенсивности световых волн. В результате электроны должны покидать тело со скоростью, зависящей от амплитуды волны, чего в действительности не наблюдается. Скорость электронов зависит только от частоты света.

3. Положение границы спектра зависит от скорости ударяющихся об антикатод электронов и не зависит от материала антикатада. Чем больше скорость электронов, тем меньше граничная длина волны. Так как порция энергии, излучаемая электроном при торможении, не может превышать его начальную энергию, то $h\frac{c}{\lambda} = eU$, следовательно,

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}.$$

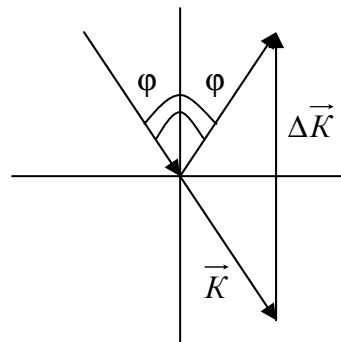
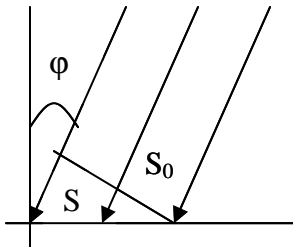
4. Явление Комптона происходит с участием столь слабо связанных с ядром атома электронов, что этой связью можно пренебречь, поэтому величина смещения линии не связана с индивидуальными свойствами атомов.

5. Ток насыщения пропорционален интенсивности падающего света, поэтому при увеличении интенсивности в два раза ток насыщения также увеличится вдвое.

6. Исходя из определения давления и применяя второй закон Ньютона, можно записать:

$$P = \frac{F_n}{S} = \frac{F_n t}{St} = \frac{(\Delta K)_n}{St},$$

где $(\Delta K)_n$ – проекция импульса $\vec{\Delta K}$, переданного фотонами за время t поверхности, на направление нормали к ней; S – площадь освещенной поверхности. Величины $(\Delta K)_n$ и S зависят от угла падения φ .



$$S = \frac{S_0}{\cos \varphi},$$

где S_0 – площадь поперечного сечения светового потока;

$$(\Delta K)_n = 2K \cos^2 \varphi,$$

тогда

$$P = \frac{2K \cos^2 \varphi}{S_0 t}.$$

Так как при $\varphi = 0$ $P_0 = \frac{2K}{S_0 t} = \frac{I}{c}(1 + \beta),$

то
$$P = \frac{I}{c}(1 + \beta) \cos^2 \varphi.$$

7. Тангенс угла наклона прямых равен отношению h/e .

Решение некоторых задач

Задачи достаточного уровня:

3. Импульс K , сообщаемый электроду, равен $K_f + K_э$, где $K_f = \frac{h}{\lambda}$ – импульс фотона, $K_э = mv$ – импульс фотоэлектрона.

Скорость фотоэлектрона v можно определить из уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}; \quad \frac{mv^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A; \quad v = \sqrt{\frac{2(hc - A\lambda)}{\lambda m}}.$$

Тогда

$$K = \frac{h}{\lambda} + \sqrt{\frac{2m(hc - \lambda A)}{\lambda}} = 1,33 \cdot 10^{-25} \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

5. Согласно закону сохранения энергии при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне запишем: $h\nu = h\nu' + W_{ке}$.

Так как энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи, то мы приходим к выражению

$$h\nu = 2h\nu'.$$

Смещение длин волн фотонов при комптоновском рассеянии:

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

Так как угол рассеяния $\theta = \pi/2$, то выражение приобретает вид

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}, \quad \text{или} \quad \frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_0 c}.$$

Таким образом, приходим к системе уравнений

$$\begin{cases} h\nu = 2h\nu'; \\ (\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu})c = \frac{h}{m_0 c}. \end{cases}$$

Решив эту систему, найдем ν и ν' , а затем энергию

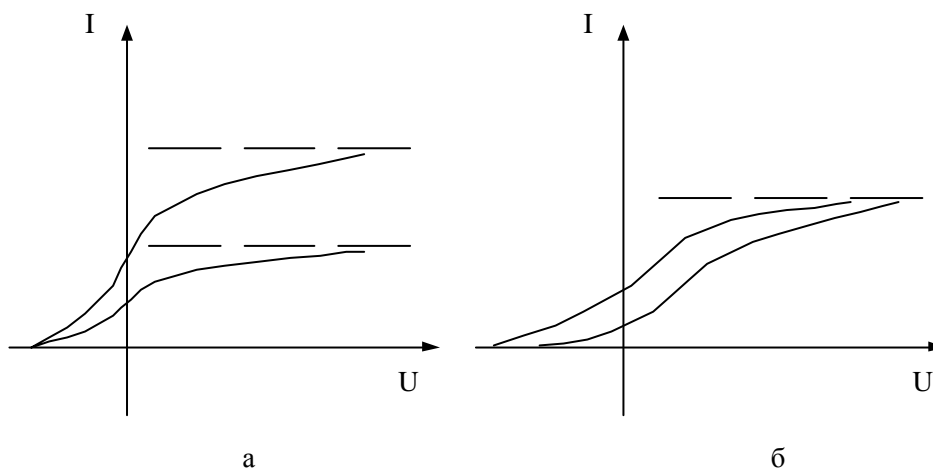
$$E = h\nu' = 0,256 \text{ МэВ}$$

и импульс

$$P = \frac{h\nu'}{c} = 1,36 \cdot 10^{-22} \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

Задачи высокого уровня:

1.



3. Нет. Допустим, что такой процесс возможен. Это означает, что электрон поглотил фотон. Тогда законы сохранения энергии и импульса будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} h\nu = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right); \\ \frac{h\nu}{c} = \frac{m_0 V}{\sqrt{1-\beta^2}}, \end{array} \right.$$

где

$$\beta = \frac{V'}{c}.$$

Решив эти уравнения относительно β , получим, что $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 1$. Оба эти значения не имеют физического смысла, так как электрон не может приобрести скорость, равную скорости света, а также обладать импульсом, не имея скорости. Поэтому допущение неправомерно.

5. Поскольку металлы различаются работой выхода электронов, у них соответственно различна "красная" граница фотоэффекта. Определение этой границы может быть положено в основу установления различия металлов.

2.3. Атом водорода

Необходимый теоретический материал

Спектр атома водорода. Сериальная формула. Модель атома Резерфорда. Постулаты Бора. Объяснение спектра атома водорода. Современная квантовая теория атома водорода.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Для получения целостного представления о строении атома и спектре атома водорода прочитайте бегло весь раздел, опуская детали. Затем детально проработайте теоретический материал, выделите наиболее важное, выпишите формулы.

Обратите внимание что по существу теория Бора является внутренне противоречивой. Поэтому эта теория объяснила только спектры излучения атома водорода и водородоподобных ионов. Однако эта теория дала толчок к созданию современной квантовой теории.

Запомните, что согласно теории Бора момент импульса электрона и его энергия при движении являются квантованными величинами.

Самоконтроль теоретического материала

- Какова модель атома по Резерфорду?
- Почему, основываясь на модели атома Резерфорда, нельзя объяснить с точки зрения классической физики устойчивость атома?
- На чем базируется теория атома Бора?
- Какую роль сыграла теория Бора в объяснении спектра атома водорода?
- Как объясняется наличие серий в спектре водорода?
- Что такое потенциалы ионизации и возбуждения?
- Какова роль закона сохранения момента импульса в теории Бора?

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Какие экспериментальные факты стали предпосылкой создания Бором квантовой теории строения атома? (5 баллов)
2. Сформулируйте постулаты Бора и запишите соответствующие формулы. (5 баллов)
3. Запишите сериальную формулу, позволяющую найти длины волн линий спектра водорода. Как объяснить наличие серий в спектре атома? (9 баллов)
4. Энергия электрона в атоме водорода отрицательная. Почему? (10 баллов)
5. Может ли атом водорода поглотить фотон с энергией, большей, чем энергия связи электрона в атоме? Ответ обосновать. (9 баллов)
6. Поток монохроматических фотонов с энергией 9 эВ падает на газообразный водород. Будет ли происходить поглощение фотонов газом? (10 баллов)
7. Серия Лаймана может наблюдаться в спектре поглощения, тогда как серия Бальмера – нет. Почему? (10 баллов)

Основные типы задач и методы их решения

Задачи рассматриваемой темы можно условно разделить на две группы:

1. Задачи, в которых используются постулаты Бора.
2. Задачи, в которых используются закономерности в спектрах атома водорода и водородоподобных ионов.

В задачах первой группы требуется определить одну из характеристик электрона (радиус орбиты, скорость движения, импульс, энергию), используя выражения для энергии и момента импульса на орбите.

В задачах второй группы необходимо определить длину волны или частоту излучаемых линий, используя сериальную формулу.

Задачи начального уровня

1. Как изменяется момент импульса электрона в атоме водорода при переходе электрона из возбужденного состояния ($m = 4$) в основное ($n = 1$)?
2. Вычислить для атома водорода радиус первой боровской орбиты, скорость электрона на ней и кинетическую энергию.

3. Найти наибольшую и наименьшую длины волн спектральных линий водорода в видимой области спектра.
4. Найти потенциал ионизации атома водорода.
5. Определить первый потенциал возбуждения атома водорода.

Решения

Ответы

1. Уменьшится в 4 раза.
3. $\lambda_{\max} = 656 \text{ нм}$;
 $\lambda_{\min} = 365 \text{ нм}$.
4. $U = 13,5 \text{ В}$.
5. $U = 10,2 \text{ В}$.

Задачи достаточного уровня

1. Во сколько раз изменяется орбитальный момент импульса электрона в атоме водорода при переходе электрона из возбужденного состояния в основное с испусканием фотона, длина волны которого $\lambda = 97,25 \text{ нм}$?
2. Какую наименьшую энергию в электрон-вольтах должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов спектр водорода имел три спектральные линии? Найти длины волн этих линий.
3. Атом водорода поглощает фотон, вследствие чего электрон, находившийся на второй боровской орбите, вылетает из атома со скоростью $v = 6 \cdot 10^5 \text{ м/с}$. Чему равна частота фотона?
4. Найти наибольшую длину волны λ_{\max} в ультрафиолетовой области спектра водорода. Какую наименьшую скорость v_{\min} должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами электронов появилась эта линия?
5. Первый потенциал возбуждения атома водорода $\varphi_1 = 10,2 \text{ В}$. При какой температуре средняя кинетическая энергия атома равна энергии его возбуждения?

Решения

Ответы

1. $L_1 / L_4 = 1/4$.
2. $W = Rhc\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 12,1 \text{ эВ}$;
 $\lambda_1 = 121 \text{ нм}$; $\lambda_2 = 103 \text{ нм}$;
 $\lambda_3 = 666 \text{ нм}$.
3. $v = 1,07 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.
4. $\lambda_{\min} = 121 \text{ нм}$;
 $v_{\min} = 1,90 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.
5. $T = 1,62 \cdot 10^4 \text{ К}$.

Задачи высокого уровня

1. Атом водорода имеет простейшее строение, однако спектр излучения этого атома содержит много линий. Почему?
2. Изобразить в масштабе схему уровней атома водорода. Указать на ней переходы, соответствующие сериям Лаймана и Бальмера. Показать переходы, отвечающие головной линии и коротковолновой границе указанных серий.

3. Во сколько раз ускорение электрона на первой боровской орбите больше, чем на второй?

4. Вычислить квантовое число n , соответствующее возбужденному состоянию иона He^+ , если известно, что при переходе в основное состояние этот ион испустил два фотона с длинами волн 1038 и 304 Å.

5. Первоначально находившийся в состоянии покоя ион He^+ испустил фотон, соответствующий головной линии Лаймана. Этот фотон вырвал электрон из атома водорода, находившегося в основном состоянии. Определить скорость фотоэлектрона.

Решения

Ответы

3. На первой орбите электрон обладает ускорением в 16 раз большим, чем на второй.
4. $n = 5$.
5. $v = 3,1 \cdot 10^6$ м/с.

Ответы на вопросы теста

1. Спектр атома водорода. Модель атома Резерфорда.

3. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$, где n – номер орбиты, на которую (с которой) совершают переходы электроны с других (на другие) орбиты; $n = const$, $m = n + 1, n + 2, \dots, \infty$. Поэтому для данного n наблюдается группа линий, которая ограничивается $\lambda_{\min} = \frac{n^2}{R}$ и называется серией.

4. Электрон в атоме обладает потенциальной и кинетической энергиями. Полная энергия электрона равна их сумме. Поскольку кинетическая энергия положительная, а потенциальная – отрицательная и так как атом является устойчивой системой, то потенциальная энергия по абсолютной величине больше кинетической. Следовательно, полная энергия отрицательная.

5. Может. После этого электрон станет свободным и атом станет ионом.

6. Не будет, так как энергия падающих фотонов меньше энергии первого возбужденного состояния.

7. Серия Лаймана:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Серия Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Атомы в газе находятся в основном состоянии в обычных условиях, т.е. $n = 1$, и серия Лаймана в спектре поглощения будет наблюдаться, а серия Бальмера – нет, т.к. $n = 2$.

Решение некоторых задач

Задачи начального уровня:

2. Согласно второму закону Ньютона движение электрона по орбите описывается уравнением

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}.$$

Согласно первому постулату Бора для момента импульса имеем $mv_n r_n = n\hbar$.
 Решив систему из этих двух уравнений, получим:

$$r_n = \frac{h^2 \varepsilon_0 n^2}{\pi m e^2}; \quad r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м};$$

$$V_n = \frac{e^2}{2 \varepsilon_0 h n}; \quad V_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Задачи достаточного уровня:

1. Согласно определению момента импульса электрона на орбите получаем

$$\frac{L_1}{L_m} = \frac{1 \cdot \hbar}{m \hbar} = \frac{1}{m}.$$

Согласно серийной формуле

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right);$$

откуда

$$m = \sqrt{\frac{\lambda R}{\lambda R - 1}} = 4.$$

Тогда $L_1 / L_4 = 1/4$.

2. Спектр атома водорода будет иметь три спектральные линии: ($n = 1, m = 2$), ($n = 1, m = 3$) и ($n = 2, m = 3$), если наименьшая энергия электронов будет соответствовать энергии перехода атома во второе возбужденное состояние ($n = 1, m = 3$).

3. На основании закона сохранения энергии можно записать:

$$h\nu = \Delta E + \frac{mv^2}{2},$$

где ΔE – минимальная энергия, при сообщении которой электрону последний покинет атом. Эта энергия численно равна энергии излучения при обратном переходе:

$$\Delta E = h\nu_\infty = Rhc \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = \frac{Rhc}{4}.$$

Тогда

$$h\nu = \frac{Rhc}{4} + \frac{mv^2}{2},$$

откуда

$$v = \frac{Rc}{4} + \frac{mv^2}{2h} = 1,07 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Задачи высокого уровня:

1. Линия в спектре излучения соответствует переходу электрона с высшей орбиты на низшую. Разрешенных орбит в атоме множество. И хотя электрон в атоме один, газ имеет много атомов и, значит, существует много различных переходов, что даёт много различных линий спектра.

3. Ускорение электрона, находящегося на n -й боровской орбите, $I_n \sim a_n^2 \sim r_n^{-4}$. Поэтому на первой орбите электрон обладает ускорением в 16 раз большим, чем на второй.

3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Применение волновых свойств микрочастиц и квантовомеханических закономерностей в приборах и технологии авиационно-космической техники:

1. Электроно- и нейтронография, ионный проектор.
2. Туннельная микроскопия.
3. Туннельный диод.
4. Приборы криоэлектроники.

Необходимый теоретический материал

Гипотеза де Бройля. Волновые свойства микрочастиц. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Волновая функция и ее статистический смысл. Условие нормировки волновой функции. Уравнение Шредингера. Уравнение Шредингера для стационарных состояний. Частица в прямоугольной бесконечно глубокой потенциальной яме. Квантование энергии частицы. Принцип соответствия Бора. Туннельный эффект. Коэффициент прозрачности потенциального барьера. Линейный гармонический осциллятор. Нулевые колебания осциллятора.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Изучая опытные обоснования квантовой механики, важно помнить, что волновые свойства являются универсальной чертой поведения всех частиц, не зависящей от их заряда, массы, спина и других характеристик. Так как импульс частицы определяется выбором системы отсчёта, то и длина волны де Бройля частицы имеет конкретное значение лишь в выбранной системе координат. Соотношения неопределённости Гейзенберга выражают ограничения применимости понятия импульса и координат при описании движения микрочастицы. Движение микрочастицы описывается волновой функцией, однако физическим смыслом обладают лишь функции, удовлетворяющие целому ряду условий, включая условия нормировки. Уравнение Шредингера является основополагающим уравнением квантовой механики, выражающим причинно-следственную связь в явлениях микромира. Решая это уравнение, находят как саму волновую функцию, так и допустимые значения энергии микрочастицы. Движение частицы в одномерной, бесконечно глубокой потенциальной яме есть простейшая модель движения микрочастицы, позволяющая, тем не менее, вскрыть особенности её поведения при пространственной локализации. Важнейшими особенностями такого движения являются различие вероятности нахождения микрочастицы в разных областях пространства и квантование её энергии. Туннельный эффект – чисто квантовое явление, не имеющее своих аналогов в классической механике. В соответствии с соотношением неопределённости Гейзенберга для энергии и времени данный эффект не противоречит закону сохранения энергии.

Самоконтроль теоретического материала

- Сформулируйте гипотезу де Бройля.
- Опишите опыты, доказывающие наличие волновых свойств у электронов.
- Что такое электронография и нейтронография?

- С какой точностью возможно определение энергии микрочастицы, если время взаимодействия с ней Δt ?
- Что такое нулевые колебания?
- Имеет ли волновая функция физический смысл?
- Перечислите свойства волновой функции.
- Какой вид имеет волновая функция свободной частицы, движущейся вдоль оси x ?
- Запишите уравнение Шредингера и объясните смысл входящих в него величин.
- В каком случае движение микрочастиц описывается уравнением Шредингера для стационарного состояния?
- Запишите уравнение Шредингера для свободной частицы, движущейся вдоль оси Y .
- В каких опытах проявляется туннельный эффект?
- Что называется коэффициентом прозрачности потенциального барьера?
- Сформулируйте принцип соответствия Бора.
- Запишите закон квантования энергии гармонического осциллятора.

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Запишите формулу длины волны де Бройля через массу микрочастицы. (5 баллов)
2. Зависит ли неопределённость координаты частицы относительно оси X от неопределённости проекции импульса частицы на ось Y ? (5 баллов)
3. Может ли $\int |\psi|^2 dV$ превышать единицу? (3 балла)
4. Запишите условие нормировки волновой функции при движении частицы в плоскости XOY . (7 баллов)
5. По какому закону изменяется относительное различие энергий ближайших состояний частицы в одномерной бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме с увеличением энергии состояния? (10 баллов)
6. Каковы отличия движения в прямоугольной бесконечно глубокой потенциальной яме микрочастицы в классической и квантовой механике? (7 баллов)
7. Какие параметры линейного гармонического осциллятора определяют частоту нулевых колебаний? (7 баллов)
8. Как изменится картина дифракции электронов на узкой щели при повороте её на некоторый угол α ? (10 баллов)
9. Зависит ли коэффициент прозрачности потенциального барьера от его формы? (4 балла)

Классификация задач

1. Нахождение параметров волнового движения элементарных частиц.
2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
3. Нахождение параметров движения микрочастицы из решения уравнения Шредингера.
4. Частица в прямоугольном потенциальном ящике.
5. Туннельный эффект.

Основные типы задач и методы их решения

При решении задач из раздела «Волновые свойства микрочастиц. Элементы квантовой механики» важно помнить, что импульс и энергия микрочастицы являются параметрами, определяющими ее движение как волны. Точность описания движения микрочастицы с помощью этих параметров, а также ее координаты устанавливаются соотношениями неопределенностей Гейзенберга. Физическим смыслом обладают лишь те решения уравнения Шредингера, которые удовлетворяют начальным и граничным условиям, условию нормировки волновой функции.

Задачи начального уровня

1. Найти длину волны де Бройля для электронов, ускоренных разностью потенциалов 100 В.

2. Ширина следа электрона Δx на фотографии, полученной с помощью камеры Вильсона, составляет 10^{-3} м. Найти неопределенность скорости электрона.

3. Задана пси-функция частицы $\psi(x, y, z)$. Написать выражение для вероятности P , что частица будет обнаружена в объеме V .

4. Изобразить на графике вид первых трех собственных функций $\psi_n(x)$, описывающих состояние электрона в потенциальном ящике шириной L .

5. Электрон с энергией $E = 10$ эВ движется в направлении прямоугольного потенциального барьера шириной $a = 10^{-10}$ м. Определить высоту V барьера, при которой коэффициент его прозрачности равен 0,5.

Решения

Ответы

1. $1,23 \cdot 10^{-10}$ м.

2. 5,8 см/с.

3. $P = \int |\psi(x, y, z)|^2 dV$.

5. 9,4 В.

Задачи достаточного уровня

1. Поток летящих параллельно друг другу электронов, имеющих скорости $v = 10^6$ м/с, проходит через щель шириной $b = 0,1$ мм. Найти ширину Δx центрального дифракционного максимума на экране, отстоящем от щели на расстоянии $h = 10$ см.

2. Оценить неопределённость координаты и импульса электрона, движущегося в электронно–лучевой трубке длиной $L = 10$ см. Считать, что радиус светящегося пятна на экране трубки $r = 10^{-3}$ см, напряжение ускоряющего электрического поля $\Delta\phi = 10^4$ В.

3. Временная часть уравнения Шредингера имеет вид $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = E\psi$. Найти решение уравнения.

4. Какова ширина L одномерной потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками, если при переходе электрона со второго квантового уровня на первый излучается энергия 1 эВ?

5. Коэффициент прозрачности прямоугольного потенциального барьера высотой U_0 и шириной L для частицы массой m равен D . Найти длину волны де Бройля частицы.

Решения

Ответы

1. 1,45 мкм.

2. $\Delta x \sim 10^{-7}$ м,
 $\Delta P_x \sim 10^{-26}$ кг·м/с.

3. $\psi = C \exp\left(-\frac{2\pi i}{h} Et\right)$.

4. $10,8 \cdot 10^{-10}$ м.

5. $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2Um - \left(\frac{\hbar \ln D}{2l}\right)^2}}$.

Задачи высокого уровня

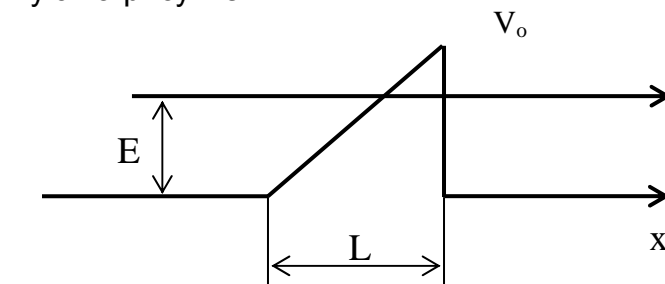
1. Узкий пучок летящих параллельно друг другу электронов, имеющих скорость $v = 10^7$ м/с, проходит через поликристаллическую фольгу, попадая на расположенный за ней на расстоянии $l = 10$ см экран. Найти радиусы первых двух дифракционных колец, получающихся на экране за счет отражения электронов от кристаллических плоскостей, отстоящих друг от друга на расстоянии $d = 0,215$ нм.

2. Используя соотношение неопределенности Гейзенберга, оценить минимальную энергию E_0 , которой может обладать частица массой $m = 10^{-27}$ кг, находящаяся в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной $l = 10^{-15}$ м.

3. Волновая функция частицы массой m для основного состояния в одномерном потенциальном поле $U(x) = kx^2/2$ имеет вид $\psi(x) = Ae^{-\alpha x}$, где A – нормировочный коэффициент, α – положительная постоянная. Найти с помощью уравнения Шредингера постоянную α и энергию E частицы в этом состоянии.

4. Частицы в потенциальном ящике находятся в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы в средней трети ящика?

5. Найти для электрона с энергией E вероятность D прохождения потенциального барьера, ширина которого L и высота V_0 , если барьер имеет форму, показанную на рисунке:



Решения

Ответы

1. $r_1 = 35$ мм, $r_2 = 83$ мм.

2. $6,6 \cdot 10^7$ эВ.

3. $\alpha = 4$; $m\omega / 2\hbar$;
 $E = \hbar\omega / 2$,

где $\bar{\omega} = \sqrt{k/m}$.

4. 0,195.

$$5. D \approx \exp \left[-\frac{8\ell\sqrt{2m}}{3\hbar U} (U - E)^{\frac{3}{2}} \right].$$

Ответы на вопросы теста

2. Не зависит.

3. Нет.

$$4. \int |\psi(x, y)|^2 dx dy = 1.$$

5. $\Delta E/E \sim 1/n$.

6. В отличие от движения классической микрочастицы движение квантовой микрочастицы квантуется по энергии. При этом вероятность нахождения микрочастицы в некотором объеме пространства определяется квадратом модуля ее волновой функции.

7. Масса и коэффициент пропорциональности между смещением и квазиупругой силой.

8. Вся картина сместится в направлении, являющемся продолжением направления распространения электрона за щелью.

9. Да.

4. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Ядерная физика в технике:

1. Энергетика и вооружение.

2. Материаловедение (ядерное легирование, изотопические методы контроля, полимеризация молекул мономеров).

3. Медицина (использование пучков элементарных частиц для угнетения развития и уничтожения злокачественных образований).

4. Археология (определение возраста археологических находок).

Необходимый теоретический материал

Заряд, размер и масса атомного ядра. Состав атомного ядра. Классификация ядер. Понятие о свойствах и природе ядерных сил. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Радиоактивные превращения атомных ядер. Активность радиоактивного препарата. Энергия связи и дефект масс. Ядерные реакции и законы сохранения. Реакции деления и синтеза. Цепная ядерная реакция. Методы наблюдения элементарных частиц.

Указания и рекомендации к изучению теоретического материала

Повторите следующие понятия: 1) нуклоны и их характеристики; 2) массовое число и зарядовое число; 3) изотопы, изотоны, изомеры; 4) энергия связи ядра; 5) ядерные силы и их свойства; 6) естественная и искусственная радиоактивность; 7) постоянная распада и период полураспада; 8) α -распад и β -распад; 9) реакции деления и синтеза ядер; 10) методы регистрации и исследования элементарных частиц.

Обратите внимание на следующее:

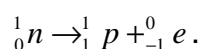
- 1) заряд ядра определяется только количеством входящих в его состав протонов, а масса ядра – количеством протонов и нейтронов;
- 2) в ядерной физике массу принято выражать в электрон-вольтах (масса, умноженная на квадрат скорости света), либо в атомных единицах массы (1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг, энергетический эквивалент а.е.м. равен 931 Мэв);
- 3) масса ядра меньше суммы масс входящих в его состав частиц; эта разность называется дефектом масс;
- 4) постоянная распада радиоактивного вещества определяет вероятность превращения атома вещества в единицу времени.

Самоконтроль теоретического материала

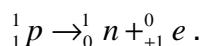
- Что такое изотопы, изобары, изотоны и изомеры?
- Почему в формуле энергии связи нуклонов в ядре $E_{св} = c^2 \{ [zm_p + (A - z)m_n] - m_{я} \}$ массу протона можно заменить массой атома водорода m_H , а массу ядра – массой атома m_a ?
- Как энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон, зависит от массового числа? Проанализируйте эту зависимость, указав энергетически выгодные процессы.
- Перечислите основные свойства ядерных сил. Чем с точки зрения современных представлений обусловлено взаимодействие нуклонов?
- Запишите схемы α - и β -распада?
- В чем проявляется туннельный характер α -распада?
- Что такое активность радиоактивного препарата?
- Чем отличаются условия осуществления реакций деления нейтронами изотопов урана ^{238}U и ^{235}U ?

Тесты для определения уровня сложности заданий

1. Напишите формулы: а) энергии связи нуклонов в ядре; б) периода полураспада; в) закона радиоактивного распада. Изобразите качественно вид зависимости энергии связи, приходящейся на один нуклон, от их общего количества в ядре. (3 балла за каждый ответ)
2. Почему природный уран является технологически непригодным для использования его в качестве заряда в ядерном оружии? (8 баллов)
3. Почему для получения цепной ядерной реакции (ядерного взрыва) необходима критическая масса (минимальное количество вещества)? (9 баллов)
4. Известно, что скорости α -частиц, которые покидают материнские ядра при α -распаде, достигают значений $\approx 10^9$ см/с. Почему при этом пробег α -частиц в плотном веществе очень мал? (12 баллов)
5. Как изменятся масса и зарядовое число ядра, если из него вылетит: а) протон; б) нейтрон? (8 баллов)
6. Нейтрон, как известно, неустойчив и со временем распадается на протон и электрон:



Обнаружены также процессы, при которых протон превращается в нейтрон и позитрон:



Таким образом, в результате этих двух реакций нейтрон «возродился» и, кроме того, возникли две новые частицы – электрон и позитрон. Как это можно согласовать с законом сохранения массы? (17 баллов)

Классификация задач

1. Состав ядра.
2. Превращение ядер при радиоактивном распаде.
3. Дефект массы и энергия связи ядра.
4. Ядерные реакции.
5. Методы регистрации элементарных частиц.

Основные типы задач и методы их решения

При описании ядерных превращений и ядерных реакций непременно выполняются законы сохранения заряда и энергии. Выполнение последнего связано с дефектом масс. Вследствие короткодействия ядерных сил распад ядер происходит независимо друг от друга.

Задачи начального уровня

1. Определить атомные номера, массовые числа и химические символы ядер, которые получатся, если в ядрах ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{15}_8\text{O}$ протоны заменить нейтронами, а нейтроны протонами.
2. Ядро изотопа кобальта ${}^{60}_{27}\text{Co}$ выбросило отрицательно заряженную бета-частицу. В какое ядро превратилось ядро кобальта?
3. Постоянная распада рубидия равна $0,00077 \text{ с}^{-1}$. Определить период его полураспада.
4. Определить дефект массы и энергию связи ядра атома тяжелого водорода.
5. Определить порядковый номер и массовое число частицы, обозначенной буквой x , в символической записи ядерной реакции ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + x$.
6. Определить энергию электрона E , если радиус кривизны R его следа в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле $H = 10^4 \text{ А/м}$, составляет 2 м.

Решения

Ответы

1. ${}^3_1\text{H}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{15}_7\text{N}$.

2. Ядро изотопа никеля ${}^{60}_{28}\text{Ni}$.

3. 15 мин.

4. 2,23 МэВ.

5. Нейтрон 1_0n .

Задачи достаточного уровня

1. Сколько процентов от массы нейтрального атома плутония ${}_{94}^{240}\text{Pu}$ составляет масса его электронной оболочки? Относительную атомную массу плутония принять равной его массовому числу.

2. Ядро ${}_{4}^{7}\text{Be}$ захватило электрон с К-оболочки атома. Какое ядро образовалось в результате К-захвата?

3. Какова вероятность того, что данный атом в образце радиоактивного йода ${}^{131}\text{I}$ распадется в течение ближайшей секунды (период полураспада йода составляет $6,9 \cdot 10^5$ с)?

4. Определить массу нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов, а энергия связи ядра равна 26,3 МэВ.

5. Какое количество энергии освободится, если разделятся все ядра, содержащиеся в 1 г урана-235?

6. На уровне моря плотность потока мезонов космических лучей составляет $\rho = 1$ мезон·см⁻²·мин⁻¹, причем каждый мезон на пути $s = 1$ см в воздухе при нормальном атмосферном давлении создает $n = 85$ пар ионов. Вычислить ток, создаваемый мезонами в цилиндрической ионизационной камере с радиусом $R = 20$ см и высотой $h = 30$ см, наполненной воздухом при давлении $p = 5$ атм. Камера расположена вертикально. Считать, что ионизация создается только мезонами, падающими на камеру вертикально.

Решения

Ответы

1. 0,02 %.

2. Ядро изотопа лития ${}_{3}^{7}\text{Li}$.

3. 10^{-6} .

4. 5,01258 а.е.м.

5. 82 ГДж.

6. $I = 4,2 \cdot 10^{-14}$ А.

Задачи высокого уровня

1. Используя законы сохранения энергии и импульса, докажите, что поток нейтронов легко проходит через свинцовое препятствие толщиной в несколько сантиметров и не проходит через препятствие такой же толщины, сделанное из парафина.

2. Определить порядковый номер и массовое число нуклида, который получится из тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ после трех α - и двух β -превращений.

3. В результате распада за время $t = 1$ год массы радия $m_0 = 1$ г, период полураспада которого составляет 1590 лет, образовалась некоторая масса гелия, занимающего при нормальных условиях объем $V = 43$ мм³. Найти по этим данным постоянную Авогадро N_A .

4. Энергия связи ядра кислорода ${}_{8}^{18}\text{O}$ равна 139,8 МэВ, ядра фтора ${}_{9}^{19}\text{F}$ – 147,8 МэВ. Определить по этим данным, какую минимальную энергию нужно затратить, чтобы оторвать один протон от ядра фтора.

5. Определить суточный расход ядерного горючего ^{235}U в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность электростанции 10^4 кВт. Принять энергию, выделяющуюся при одном акте деления, равной 200 МэВ и к.п.д. электростанции 20 %.

6. Определить число космических частиц, прошедших через ионизационную камеру диаметром 8 см, если изменение потенциала собирающего электрода составило 0,2 В. Камера наполнена воздухом давлением 1 атм. Емкость системы собирающего электрода равна 10 пФ. В среднем на 1 см пути в воздухе одна космическая частица создает 60 пар ионов при атмосферном давлении. Частицы падают перпендикулярно к оси камеры.

Решения

Ответы

2. Массовое и зарядовое числа дочернего ядра, образовавшегося в результате превращений, равны 220 и 86 соответственно.

4. 8,0 МэВ.

$$5. m = \frac{\mu Pt}{N_a E \eta} = 0,0526 \text{ кг.}$$

6. $4,1 \cdot 10^4$.

Ответы на вопросы теста

2. Природный уран представляет собой смесь трех изотопов: ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U . При этом содержание в природном уране изотопа ^{235}U , который хорошо делится медленными нейтронами, составляет менее 1 %. Поэтому подавляющее большинство медленных нейтронов захватывается изотопом ^{238}U без деления, и в природном уране цепная реакция деления не возникает.

3. В связи с большой проникающей способностью нейтронов они при малых размерах делящегося тела покидают зону реакции прежде, чем будут захвачены каким-либо ядром и вызовут его деление. Доля нейтронов, покидающих зону реакции, пропорциональна поверхности делящегося тела, а доля нейтронов, порождаемых в процессе реакции, пропорциональна его объему. Поэтому относительная доля нейтронов, покидающих зону реакции, не вызвав актов деления, уменьшается с ростом массы делящегося вещества.

4. При прохождении через вещество α -частица, имеющая, как известно, положительный заряд, постепенно теряет свою энергию, затрачивая ее на ионизацию вещества.

5. а) массовое и зарядовое число уменьшатся на 1; б) массовое число уменьшится на 1, зарядовое число не изменится.

6. Реакция распада нейтрона на протон и электрон является экзотермической. Превращение же протона в нейтрон и позитрон является эндотермической реакцией. Увеличение энергии протона сопровождается увеличением его массы. Протон, способный породить пару «нейтрон – позитрон», должен иметь массу, превышающую массу покоя протона на величину, равную удвоенной массе электрона (или позитрона). Поэтому закон сохранения массы в ядерных реакциях остается справедливым.

Решение некоторых задач

Задачи достаточного уровня:

6. Как известно, сила тока в проводнике численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

За время $\Delta t = 1$ мин = 60 с заряд Δq , образующийся в ионизационной камере вследствие ионизации воздуха мезонами, равен

$$\Delta q = eN,$$

где e – заряд электрона, N – количество образовавшихся пар ионов.

Количество образовавшихся за время Δt в ионизационной камере пар ионов

$$N = \rho \frac{P}{p_n} \pi R^2 h,$$

где p_n – нормальное атмосферное давление.

Таким образом, ток, создаваемый мезонами в ионизационной камере, будет

$$I = \frac{e \rho \pi R^2 h p}{\Delta q p_n} = 4,2 \cdot 10^{-14} \text{ А}.$$

Задачи высокого уровня:

1. Пусть нейтрон массой m , имеющий скорость \vec{v} , испытывает лобовое столкновение с покоящимся ядром массой m' . Законы сохранения энергии и импульса для данного столкновения имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{mv^2}{2} &= \frac{mv_1^2}{2} + \frac{m'v_2^2}{2}; \\ m\vec{v} &= m\vec{v}_1 + m'\vec{v}_2, \end{aligned}$$

где \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – скорости нейтрона и ядра после столкновения. Заметим, что векторы \vec{v} , \vec{v}_1 и \vec{v}_2 направлены вдоль одной прямой. Отношение энергии E_1 нейтрона, которую он имеет после столкновения, к энергии E до столкновения (для случая лобового столкновения) будет таким:

$$\frac{E_1}{E} = \frac{v_1^2}{v^2} = \left(\frac{m' - m}{m' + m} \right)^2.$$

Отсюда видно, что если $m' \gg m$ (случай свинцовой заслонки), то энергия нейтрона уменьшается в каждом столкновении очень мало. Наоборот, если значение m' близко к значению m , то потери энергии нейтрона в каждом столкновении относительно велики. Поэтому нейтроны относительно легко проходят через свинец, но застревают в парафине.

2. Схема α -распада, как известно, имеет вид ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{A-4}_{Z-2} Y$, где X – материнское ядро, Y – дочернее ядро. Массовое число дочернего ядра, образовавшегося вследствие трех α -распадов ${}^{232}_{90} \text{Th}$, $A = 232 - 3 \cdot 4 = 220$. Зарядовое число дочернего ядра $Z = 90 - 3 \cdot 2 = 84$.

Схема β -распада, как известно, имеет вид ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$.

В результате двух β -превращений образуется ядро, зарядовое число которого $Z = 84 + 2 \cdot 1 = 86$, а массовое число которого A останется равным 220.

4. 8,0 МэВ.

5. Суточный расход ядерного горючего равен произведению массы атома ^{235}U и количества актов деления за сутки:

$$m = \frac{\mu}{N_a} N,$$

где μ – молярная масса ^{235}U , N_a – число Авогадро, N – количество актов деления за сутки.

Количество актов деления определяется как отношение полной выделившейся за сутки энергии Q к энергии, выделяющейся при одном акте деления E : $N = \frac{Q}{E}$.

Полная энергия, выделившаяся в результате реакции за сутки, определяется формулой

$$Q = \frac{Pt}{\eta},$$

где P – тепловая мощность электростанции, t – время реакции (в данном случае 1 сутки), η – к.п.д. электростанции.

Таким образом, суточный расход горючего ^{235}U в реакторе

$$m = \frac{\mu Pt}{N_a E \eta} = \frac{235 \cdot 10^{-3} \cdot 10^7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2} = 0,0526 \text{ кг.}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики. – М.: Наука, 1983. – Т. 3: Квантовая физика. – 239 с.
2. Рымкевич П.А. Курс физики: Учебник для физ.-мат. фак. пед. ин-тов. – М.: Высш. шк., 1975. – 463 с.
3. Савельев И.В. Курс физики: Учебник для втузов. – М.: Наука, 1988. – Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 432 с.
4. Савельев И.В. Курс физики Учебник для втузов. – М.: Наука, 1989. – Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 304 с.
5. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1974. – Т. 2: Колебания и волны. Основы квантовой физики атомов, молекул и твердых тел. Физика ядра и элементарных частиц. – 464 с.
6. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Наука, 1990. – 398 с.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Наука, 1998. – 332 с.
9. Гладкова Р.А., Кутыловская Н.И. Сборник задач и вопросов по физике: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1986. – 320 с.
10. Гомонова А.И. Пособие по физике. – М.: МГУ, 1991. – 336 с.
11. Иродов И.Е. Задачи по общей физике: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1988. – 416 с.
12. Меледин Г.В. Физика в задачах. Экзаменационные задачи с решениями. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
13. Поройков И.В. Краткий курс лекций по физике. – М.: Высш. шк., 1965. – 495 с.
14. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: Наука, 1983. – Т. 3: Электричество. – 688 с.

Оглавление

Введение.....	3
1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.....	4
1.1. Интерференция.....	4
1.2. Дифракция света.....	9
1.3. Поляризация электромагнитных волн.....	14
2. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.....	20
2.1. Тепловое излучение.....	21
2.2. Фотоны.....	26
2.3. Атом водорода.....	32
3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.....	36
4. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.....	41
Библиографический список.....	47

Клименко Игорь Андреевич
Мигаль Валерий Павлович
Петрова Ольга Ивановна
Чугай Олег Николаевич

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ ПО ФИЗИКЕ

Часть 3

Общая физика. Экспериментальная и теоретическая физика

Редактор Е.Ф. Серезкина

Св. план, 2004

Подписано в печать 09.08.2004

Формат 60×84 1/8. Бум. офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 2,72. Уч.-изд. л. 3,06. Т. 1000 экз. Заказ 349. Цена свободная

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Х а р ь к о в с к и й а в и а ц и о н н ы й и н с т и т у т»

61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Издательский центр «ХАИ»

61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu