

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Часть 3

Волновая оптика.
Квантовая, атомная и ядерная физика.
Физика твердого тела

Утверждено редакционно-издательским советом университета

Омск 2014

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
П69

Практикум по физике. Часть 3. Волновая оптика. Квантовая, атомная и ядерная физика. Физика твердого тела: Практикум к решению задач / И. И. Гончар, С. Н. Крохин, Л. А. Литневский, О. И. Сердюк, Ю. М. Сосновский, Г. Б. Тодер; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 44 с.

Содержатся методические рекомендации по изучению курса физики и решению задач по волновой оптике, квантовой, атомной и ядерной физике и физике твердого тела. Представлен набор задач различного уровня сложности для аудиторной и самостоятельной работы студентов. В приложении приведен необходимый справочный материал.

Предназначен для студентов второго курса всех факультетов университета.

Библиогр.: 9 назв. Рис. 14. Прил. 1.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. Е. Митрохин;
канд. физ.-мат. наук, доцент В. Н. Сергеев.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Волновая оптика	6
1.1. Интерференция света	6
1.1.1. Оптическая разность хода лучей. Опыт Юнга	6
1.1.2. Интерференция света в тонких пленках	8
1.2. Дифракция света	12
1.3. Поляризация света	16
2. Квантовая, атомная и ядерная физика	19
2.1. Квантово-оптические явления	19
2.1.1. Внешний фотоэффект. Эффект Комптона	19
2.1.2. Тепловое излучение. Давление света	21
2.2. Квантовая механика	24
2.3. Атомная физика	26
2.4. Ядерная физика	29
3. Физика твердого тела	31
3.1. Зонная теория твердых тел	31
3.2. Тепловые свойства твердых тел	33
3.3. Электропроводность металлов и полупроводников	36
Библиографический список	39
Приложение. Справочные данные	41

ВВЕДЕНИЕ

В третьей, заключительной части курса общей физики изучаются законы природы, управляющие микромиром. Эти законы весьма специфичны и существенно отличаются от законов макромира.

В течение многих столетий развивалось представление о двух видах материи – о веществе и излучении, и к середине XIX в. возникла достаточно полная их картина: вещество состоит из частиц, а излучение представляет собой волну. Однако в начале XX в. были высказаны гипотезы, в корне изменившие наше представление о свойствах материи.

В 1900 г. Максом Планком была высказана гипотеза, из которой следовало, что излучение представляет собой поток частиц (позже они были названы фотонами). При этом оказалось, что фотоны обладают свойствами волн – могут интерферировать. В 1924 г. Луи де Бройль предположил наличие волновых свойств у частиц вещества. Он писал: «В течение многих столетий пренебрегалось корпускулярными свойствами излучения. А не делалась ли в теории вещества обратная ошибка?!». Гипотезы Планка и де Бройля в этом смысле «уравняли» свойства вещества и излучения (одно принципиальное различие между ними все-таки осталось: излучение распространяется только со скоростью света, а частицы вещества никогда не могут двигаться с такой скоростью).

Успехи, достигнутые квантовой физикой в первой трети XX в., определили прорыв в атомной физике, позволили значительно продвинуться в изучении атомного ядра, привели к возникновению и развитию ряда новых направлений в науке. Среди них особое место занимает физика твердого тела (ФТТ) – отдельная область знаний, занимающаяся изучением структуры и свойств кристаллических и аморфных твердых тел. Благодаря этой научной дисциплине в нашем распоряжении оказались транзисторы и микросхемы, рубиновый и полупроводниковый лазеры, а в конечном счете и вся полупроводниковая техника и микроэлектроника, постоянно появляются новые конструкционные материалы с новыми свойствами. Только за последние несколько лет в наш быт прочно вошли жидкокристаллические мониторы и телевизоры, флэш-память, светодиодные источники света, цифровые фотоаппараты и многое другое. Появление этих чудес техники было бы невозможно без тех успехов, которых достигла физика твердого тела к концу XX в.

В данном практикуме кратко рассмотрены теоретические основы названных разделов физики и приведены задачи, необходимые для их понимания.

1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

1.1. Интерференция света

1.1.1. Оптическая разность хода лучей. Опыт Юнга

Явление наложения двух или нескольких когерентных волн друг на друга, при котором наблюдается устойчивая картина усиления или ослабления интенсивности результирующей волны, называется интерференцией. Результат интерференции когерентных волн существенно зависит от оптической разности хода лучей:

$$\Delta = s_2 - s_1, \quad (1)$$

где $s = n\ell$ – оптическая длина пути луча (ℓ – геометрическая длина пути луча, n – показатель преломления среды).

В точках, для которых выполняется условие

$$\Delta = \pm m\lambda, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

наблюдаются интерференционные максимумы. Следовательно, условие (2) является условием максимума интерференции.

В точках, для которых выполняется условие

$$\Delta = \pm \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad \text{где } m = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

наблюдаются интерференционные минимумы. Следовательно, условие (3) является условием минимума интерференции.

Целое неотрицательное число m в формулах (2), (3) называется соответственно порядком максимума или минимума интерференции.

В опыте Юнга (рис. 1) источник света с длиной волны λ освещает две узкие бесконечные горизонтальные щели, перпендикулярные плоскости

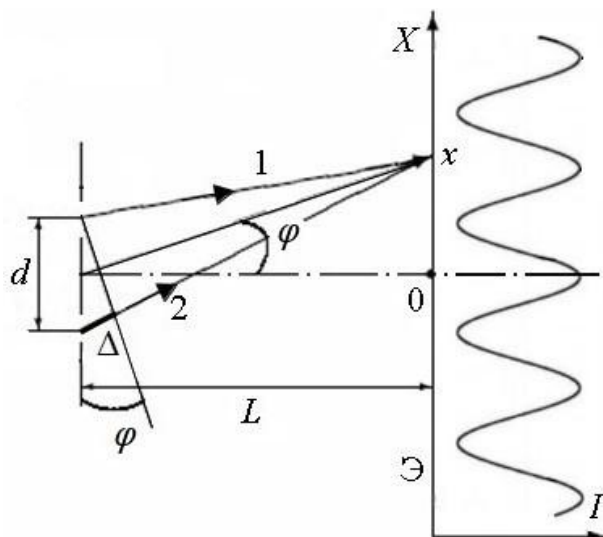


Рис. 1

рисунка. Проходя через щели, свет разделяется на два пучка – 1 и 2, интерференция которых наблюдается на экране Э в виде параллельных чередующихся светлых (максимум интенсивности) и темных (минимум интенсивности) горизонтальных полос.

Расстояние от щелей до экрана $L \gg d$. Начало координат 0 расположено на экране на равном расстоянии от щелей; ось X направлена вертикально вверх; x – координата точки, в которой определяется интенсивность света I . Справа от экрана показана зависимость интенсивности результирующей волны (освещенности экрана) от координаты x . Центральный максимум считается нулевым и соответствует $m = 0$. Положение максимумов и минимумов на экране можно найти по формулам:

$$\begin{cases} x_{\max} = \pm \frac{L}{d} m \lambda, & m = 0, 1, 2, \dots; \\ x_{\min} = \pm \frac{L}{d} \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda, & m = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (4)$$

Задачи

1. (1) Определить результат интерференции двух когерентных волн (будет наблюдаться максимум или минимум результирующей волны), если длина волн 700 нм, а разность их хода 1750 нм.

2. (1) Найти изменение оптической разности хода двух распространяющихся в вакууме лучей, если на пути одного из них поставить прозрачную пластинку толщиной 3,5 мкм с показателем преломления 1,4.

3. (2) На пути луча монохроматического света находилась откачанная трубка длиной 10 см. После заполнения трубки хлором оптическая длина пути луча увеличилась на 77 мкм. Найти показатель преломления хлора.

4. (2) В точке А наблюдается минимум интерференции двух когерентных лучей. Определить результат интерференции в точке В, в которой оптическая разность хода этих лучей в 2,0 раза больше, чем в точке А.

5. (1) Найти положение второй темной полосы на экране в опыте Юнга, если расстояние между щелями 0,50 мм, расстояние от щелей до экрана 5,0 м. Длина волны падающего света – 500 нм.

6. (1) Расстояние между щелями в опыте Юнга – 3,0 мм. Экран расположен на расстоянии 6,0 м от щелей. Щели освещаются красным светом с длиной волны 700 нм. Какая (темная или светлая) полоса наблюдается на экране на расстоянии 700 мкм от центрального максимума?

7. (2) Найти расстояние между пятой и третьей светлыми полосами интерференционной картины в опыте Юнга, если установка освещается зеленым светом с длиной волны 500 нм. Расстояние между щелями – 3,2 мм, расстояние от щелей до экрана – 3,0 м.

8. (2) Найти длину волны монохроматического излучения, которым освещается установка в опыте Юнга, если расстояние между седьмой темной и четвертой светлой полосами равно 4,2 мм, расстояние от щелей до экрана – 4,0 м, расстояние между щелями – 1,3 мм.

9. (3) В опыте Юнга расстояние между щелями 5,0 мм. Установка освещается красным светом с длиной волны 600 нм. Найти расстояние от щелей до экрана, если расстояние между двенадцатой темной и пятой светлой полосами равно 9,0 мм. На пути одного из интерферирующих лучей помещают стеклянную пластинку толщиной 18 мкм. Найти показатель преломления этой пластинки, если при этом интерференционная картина смещается на 15 полос.

10. (3) В опыте Юнга расстояние между щелями 1,0 мм, расстояние от щелей до экрана 10 м. Щели освещаются зеленым светом с длиной волны 500 нм. Найти положение первой темной интерференционной полосы на экране. На пути одного из интерферирующих лучей помещают стеклянную пластинку толщиной 15 мкм с показателем преломления 1,5. В какое положение при этом смещается центральная интерференционная полоса?

1.1.2. Интерференция света в тонких пленках

Пусть параллельный пучок света падает под углом α на тонкую пленку постоянной толщины d . Возникающая при этом оптическая разность хода отраженных (1 и 2) или проходящих (1' и 2') лучей (рис. 2) вычисляется по формуле:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_{\text{доп}}, \quad (5)$$

где $\Delta_0 = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}$ – разность хода лучей, вычисляемая без учета воз-

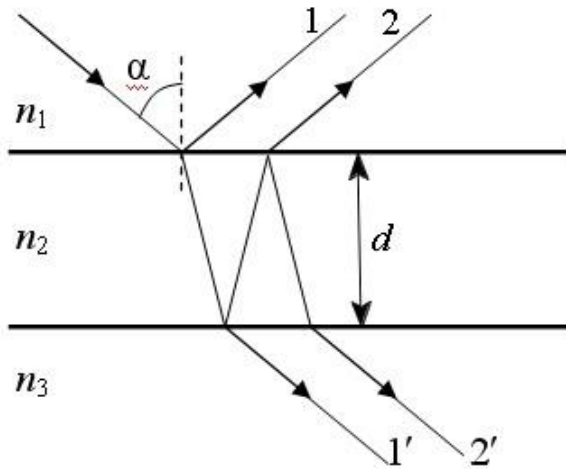


Рис. 2

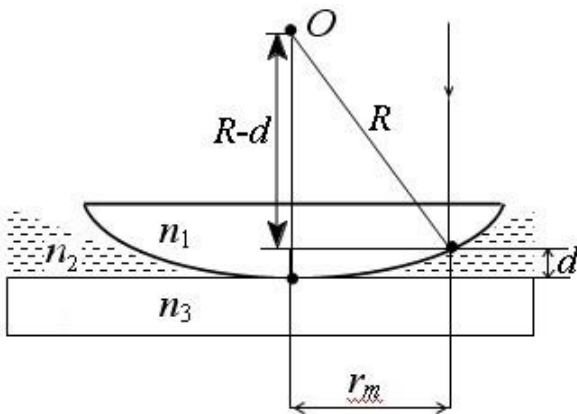


Рис. 3

можных потерь полуволны при отражении от оптически более плотной среды; $\Delta_{\text{доп}}$ – дополнительная разность хода, описывающая такие потери.

Правило: при отражении луча света от оптически более плотной среды фаза этого луча меняется на 180° и к оптической длине пути этого луча s нужно добавить или отнять $\lambda/2$.

При отражении от менее плотной среды и при преломлении потери фазы не происходит.

Расчет результатов интерференции проводят с учетом условий максимума (2) и минимума (3) интерференции.

Кольца Ньютона – интерференционные полосы в форме колец, расположенных концентрически вокруг точки касания плосковыпуклой стеклянной линзы и плоской стеклянной пластинки в тонком зазоре между линзой и пластинкой, который играет роль тонкой пленки переменной толщины (рис. 3).

При освещении монохроматическим светом кольца Ньютона представляют собой чередующиеся темные и светлые полосы. Номер темного или светлого кольца равен соответственно порядку минимума или максимума интерференции. При освещении белым светом кольца становятся цветными.

Если свет падает нормально на сферическую поверхность радиусом R , касающуюся плоской поверхности (см. рис. 3), то геометрическая разность хода лучей, интерферирующих в отраженном и в проходящем свете, при толщине зазора $d \ll R$ без учета возможных потерь при отражении и радиус кольца вычисляются по формулам:

$$\Delta_0 = 2dn_2, \quad (6)$$

$$r \approx \sqrt{2Rd}. \quad (7)$$

Объединяя формулы (6) и (7), получим:

$$\Delta_0 = r^2/R n_2. \quad (8)$$

Оптическая разность хода Δ отраженных или проходящих лучей, учитывающая потери полуволны при отражении лучей от оптически более плотных сред, вычисляется по формуле (5).

Задачи

11. (2) На мыльную пленку с показателем преломления 1,33 под углом 30° к ее поверхности падает параллельный пучок белого света. При какой минимальной толщине пленки отраженные от нее лучи оранжевого цвета с длиной волны 600 нм будут максимально ослаблены вследствие интерференции? В какой цвет будет окрашена пленка в отраженном свете?

12. (2) Мыльная пленка с показателем преломления 1,3, нанесенная на плоскую стеклянную поверхность с показателем преломления 1,5, освещается параллельным пучком белого света, падающим на нее под углом 45° . Толщина пленки – 320 нм. Какого цвета лучи имеют в отраженном свете минимальную интенсивность? В какой цвет будет окрашена пленка в отраженном свете?

13. (2) На мыльную пленку под углом 60° к ее поверхности падает параллельный пучок белого света. Минимальная толщина пленки, при которой в проходящем свете она окрашена в оранжевый цвет, равна 250 нм. Длину волны оранжевого цвета принять равной 610 нм. Найти показатель преломления пленки. Какого цвета лучи в проходящем свете имеют минимальную интенсивность?

14. (2) На плоскую стеклянную поверхность нанесена тонкая прозрачная пленка, показатель преломления которой больше показателя преломления стекла. Пленка освещается параллельным пучком белого света, падающим на нее под углом 60° . Найти показатель преломления пленки, если в проходящих лучах она представляется красной при минимальной толщине, равной 250 нм. Длина волны красного цвета 660 нм. Какого цвета лучи не проходят через пленку совсем?

15. (3) На поверхность стеклянного объектива нанесена тонкая прозрачная пленка, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла. Пленка освещается параллельным пучком белого света, падающим на ее поверхность нормально. При минимальной толщине пленки 270 нм в отраженном свете она представляется красной. Длина волны красного цвета – 660 нм. В какой цвет окрашена пленка в проходящем свете? Какого цвета лучи не проходят через пленку совсем?

16. (3) На поверхность стеклянного объектива с показателем преломления 1,5 нанесена тонкая прозрачная пленка с показателем преломления 1,6. Перпендикулярно поверхности пленки падает параллельный пучок белого света. Минимальная толщина пленки, при которой в проходящем свете она окрашена в желтый цвет, равна 184 нм. Найти длину волны этого цвета. В какой цвет окрашена пленка в отраженном свете? Какого цвета лучи в проходящем свете имеют минимальную интенсивность?

17. (2) В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено водой. Установка освещается монохроматическим светом с длиной волны 600 нм, падающим нормально поверхности линзы. Радиус кривизны линзы – 1,5 м. Определить показатель преломления воды, если радиус третьего светлого кольца в отраженном свете равен 1,3 мм.

18. (2) Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона равно 2,7 мм. Радиус кривизны линзы – 1,5 м. Наблюдение проводится в отраженном свете. Найти длину волны монохроматического света, падающего нормально на установку.

19. (2) Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны 550 нм, падающим нормально поверхности линзы. Найти радиус кривизны линзы, если расстояние между четвертым и девятым светлыми кольцами в проходящем свете равно 0,81 мм.

20. (2) В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено бензолом. Показатель преломления стекла – 1,5, показатель преломления бензола – 1,6. Установка освещается монохроматическим светом, падающим нормально к поверхности линзы. Найти расстояние между девятым и пятым светлыми кольцами в проходящем свете, если расстояние между четвертым и вторым темными кольцами в отраженном свете равно 0,40 мм.

1.2. Дифракция света

Дифракция света – это отклонение света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий. Различают дифракцию Френеля (в расходящихся лучах) и дифракцию Фраунгофера (в параллельных лучах). Дифракцию Френеля обычно наблюдают на круглом отверстии или диске.

Согласно принципу Гюйгенса – Френеля монохроматическое излучение точечного источника S

(рис. 4) можно заменить излучением воображаемых источников, расположенных на волновом фронте P радиусом a . Поверхность P разбивается на кольцевые зоны Френеля так, чтобы расстояния от краев соседних зон до точки наблюдения M отличались на $\lambda/2$. Пусть O – точка пересечения поверхности P с линией SM , тогда $a = SO$ – расстояние от источника S до поверхности P , $b = OM$ – расстояние от поверхности до точки наблюдения.

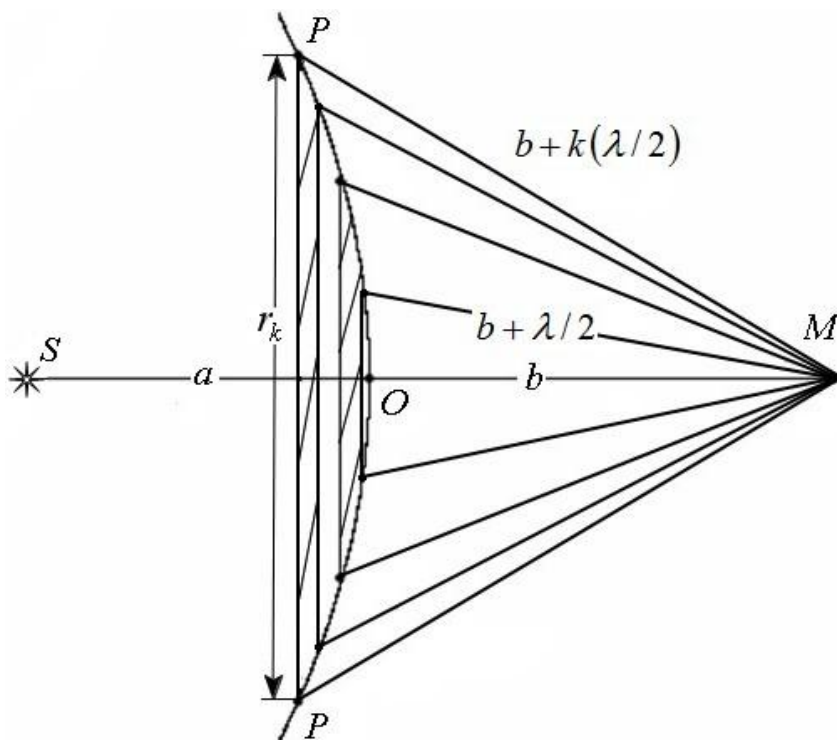


Рис. 4

Если на пути сферической волны поставить непрозрачную преграду с круглым отверстием так, чтобы отверстие оставляло открытыми ровно k зон Френеля, то радиус отверстия равен радиусу k -й зоны Френеля и при малых k определяется по формуле

$$r_k = \sqrt{abk\lambda / (a + b)} \quad (9)$$

при $r_{\text{отв}} = r_k \ll b \approx a$ (сферическая волна) или по формуле

$$r_k = \sqrt{bk\lambda} \quad (10)$$

при $r_{\text{отв}} = r_k \ll b \ll a$ (плоская волна).

Дифракционная картина на экране симметрична относительно точки M и состоит из concentric чередующихся светлых и темных колец, число которых равно числу открытых отверстий зон Френеля.

Если отверстие открывает четное число зон Френеля, то амплитуда проходящей в точку M волны

$$A \approx A_1/2 - A_k/2 \quad (11)$$

и в точке M наблюдается минимум (темное круглое пятно).

Если отверстие открывает нечетное число зон, то амплитуда волны

$$A \approx A_1/2 + A_k/2 \quad (12)$$

и в точке M наблюдается максимум (светлое круглое пятно).

Дифракцию Фраунгофера можно наблюдать на щели и на дифракционной решетке.

Пусть на бесконечную щель шириной a , образованную двумя бесконечными полуплоскостями, перпендикулярно полуплоскостям падает плоская волна (рис. 5). Параллельные лучи, испускаемые каждым элементом щели, собирает в своей фокальной плоскости линза. (Она не дает дополнительной разности хода, поэтому не изображена на рис. 5.) В фокальной плоскости линзы на расстоянии L от щели параллельно полуплоскостям расположен экран \mathcal{E} . В результате дифракции на экране наблюдается дифракционная картина в виде

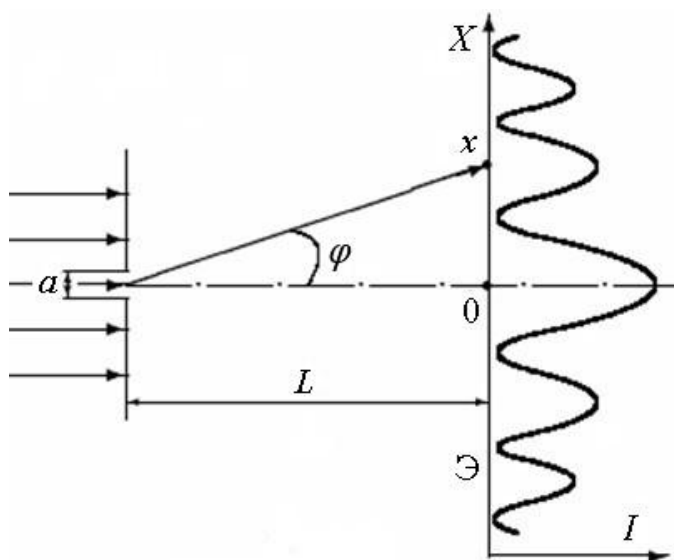


Рис. 5

симметричных относительно щели бесконечных полос, параллельных щели. Распределение интенсивности света I на экране показано справа от него. При падении на щель монохроматического света на экране чередуются светлые и темные полосы, центральная светлая полоса наиболее яркая. При падении белого света центральная полоса белая, остальные полосы цветные. При угле дифракции φ оптическая разность хода крайних лучей

$$\Delta = a \sin \varphi_m. \quad (13)$$

Точки минимума интенсивности дифракционной картины на экране определяются условием:

$$\Delta_m = \pm 2m \lambda / 2, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (14)$$

где m – порядок минимума. Тогда с учетом соотношений (13) и (14) получим:

$$a \sin \varphi_m = \pm 2m \lambda / 2, \quad m = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Точки максимума определяются условием:

$$\Delta_m = \pm (m+1) \lambda / 2, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (16)$$

где m – порядок максимума (порядок дифракции). Тогда с учетом соотношения (13) получим:

$$a \sin \varphi_m = \pm (m+1) \lambda / 2, \quad m = 1, 2, \dots \quad (17)$$

Нулевой порядок дифракции отвечает центральному максимуму, наблюдаемому при $\varphi_0 = 0$.

Пусть на дифракционную решетку шириной l с числом щелей (штрихов) N и периодом $d = l / N$ падает нормально монохроматическая электромагнитная волна с длиной λ (рис. 6); x_m – координата точки наблюдения интерференции на экране Э; $L \gg d$ (L – расстояние от решетки до экрана).

Положение дифракционных максимумов на экране можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} d \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots; \\ \operatorname{tg} \varphi_m = \frac{x_m}{L}, \end{cases} \quad (18)$$

где φ_m – угол дифракции – угол отклонения лучей от первоначального направления и попадания на экран в точку с максимумом m ($m = 0$ – нулевой, или центральный максимум).

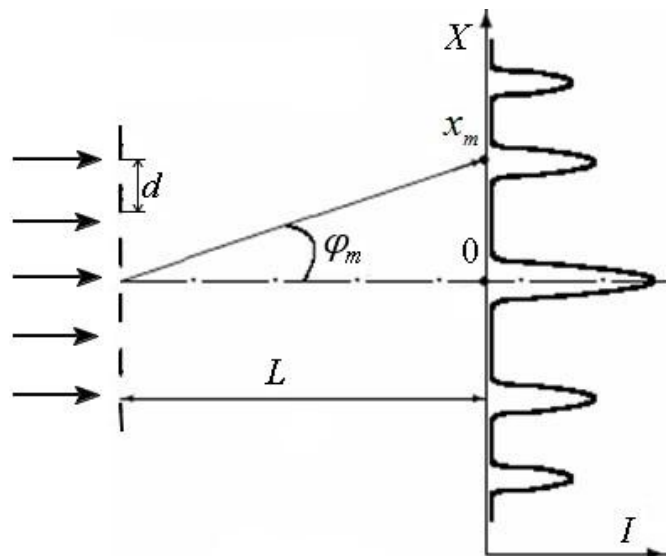


Рис. 6

Если на дифракционную решетку падает белый свет, то в центре экрана наблюдается белая полоса, а слева и справа от нее – максимумы, представляющие собой радужные спектры (от фиолетового до красного).

Задачи

21. (1) Найти радиус третьей зоны Френеля, если ширма с круглым отверстием находится на расстоянии 10 м от точечного источника монохроматического света с длиной волны 600 нм, а экран находится на расстоянии 20 м от отверстия.

22. (2) Экран находится на расстоянии 40 м от точечного монохроматического источника света с длиной волны 500 нм. На расстоянии 20 м от источника помещена ширма с круглым отверстием. При каком радиусе отверстия центр дифракционного изображения будет а) наиболее темным, б) наиболее светлым?

23. (3) На расстоянии 6,0 м от точечного монохроматического источника света с длиной волны 600 нм находится экран. Посредине между экраном и источником света расположена непрозрачная ширма с отверстием радиусом 2,4 мм. Ширму медленно сдвигают на 1,5 м ближе к экрану. Сколько раз при ее перемещении в центре дифракционной картины на экране будет наблюдаться темное пятно?

24. (1) На непрозрачную пластинку с узкой щелью падает нормально плоская волна с длиной 500 нм. Угол отклонения прошедших лучей, соответствующий первому дифракционному максимуму, составляет 30° . Определить ширину щели.

25. (2) Плоская световая волна длиной 500 нм падает нормально на непрозрачную плоскую преграду, в которой имеется щель шириной 200 мкм. На расстоянии 1,0 м от преграды расположен экран, на котором наблюдается дифракционная картина. Найти расстояние между соседними максимумами второго и третьего порядка.

26. (2) На щель в металлической пластине шириной 0,1 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,5 мкм. За щелью помещена собирающая линза, в фокальной плоскости которой находится экран. Что наблюдается на экране, если угол дифракции равен а) $17,2'$, б) $25,8'$?

27. (1) На дифракционную решетку с периодом 10 мкм падает нормально монохроматический свет. Угол наблюдения главного максимума третьего порядка равен 10° . Определить длину падающей световой волны.

28. (2) Свет с длиной волны 530 нм нормально падает на дифракционную решетку с периодом 1,5 мкм. Найти: 1) угол дифракции для максимума наибольшего порядка; 2) расстояние от дифракционной решетки до экрана, где наблюдается спектр, если расстояние между максимумами интенсивности первого порядка равно 0,26 м.

29. (2) На дифракционную решетку с периодом 6 мкм нормально падает монохроматический свет. Угол между спектрами первого и второго порядка, расположенных с одной стороны от главного максимума, равен $4^\circ 36'$. Определить длину световой волны.

30. (3) Дифракционная решетка содержит 120 штрихов на 1 мм. На нее нормально падает параллельный пучок лучей белого света. Найти: 1) наибольший порядок полного спектра, который дает эта решетка; 2) угол между направлением на красную и фиолетовую линии в спектре первого порядка, расположенном с одной стороны от главного максимума; 3) расстояние между этими линиями на экране, если расстояние от экрана до решетки равно 0,80 м.

1.3. Поляризация света

Направление распространения преломленного светового луча определяется законом преломления: падающий и преломленный лучи и перпендикуляр к границе раздела в точке падения лежат в одной плоскости,

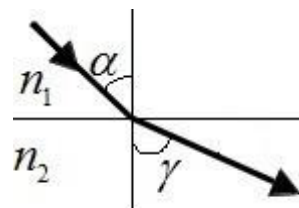


Рис. 7

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (19)$$

где α – угол падения;

γ – угол преломления (рис. 7);

v_1 и v_2 – фазовые скорости света;

n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления в средах.

При падении луча из оптически более плотной среды на оптически менее плотную ($n_1 > n_2$) наблюдается полное внутреннее отражение, если $\alpha > \alpha_0$ (рис. 8), где α_0 – предельный угол полного внутреннего отражения,

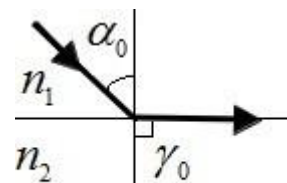


Рис. 8

$$\sin \alpha_0 = n_2 / n_1. \quad (20)$$

Согласно закону преломления (20) предельному углу соответствует максимально возможный угол преломления 90° .

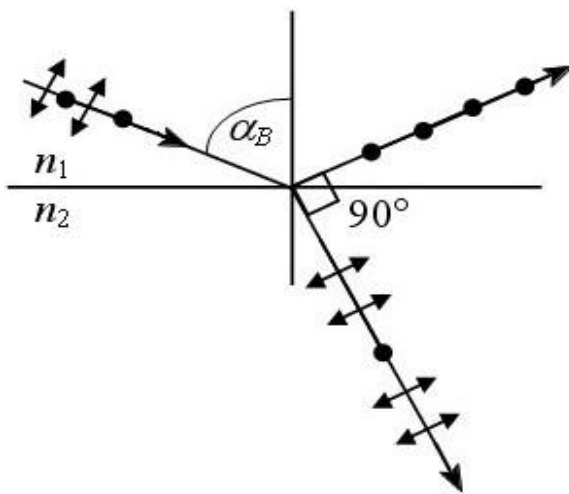


Рис. 9

При падении света под углом Брюстера α_B справедлив закон: отраженный от диэлектрика свет полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (рис. 9),

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_2 / n_1. \quad (21)$$

Кроме того, отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. На рис. 9 стрелками на луче указано направление колебаний вектора напряженности электрического поля \vec{E} , если они происходят в плоскости рисунка, и точками, если перпендикулярны ей.

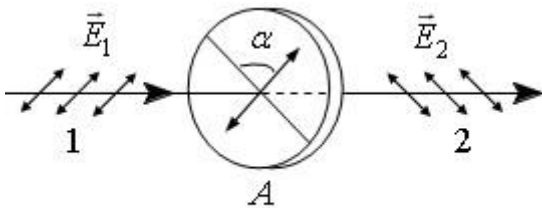


Рис. 10

Поляризаторы пропускают только световую волну, в которой напряженность электрического поля \vec{E} колеблется параллельно плоскости, называемой плоскостью пропускания. Любой поляризатор может быть использован как анализатор.

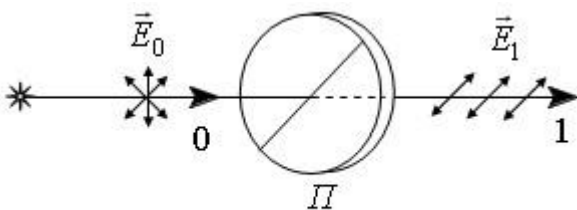


Рис. 11

Если плоскость колебаний падающего на анализатор A линейно поляризованного света с интенсивностью I_1 образует угол α с плоскостью пропускания анализатора (рис. 10, луч 1), то интенсивность прошедшей волны (луч 2) выражается законом Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha. \quad (22)$$

Если учесть потери на отражение и поглощение, которые определяются посредством коэффициента потерь k_A , то интенсивность света, прошедшего через анализатор,

$$I_2 = 1 - k_A I_1 \cos^2 \alpha. \quad (23)$$

Если падающий на поляризатор с интенсивностью I_0 свет неполяризован (рис. 11, луч 0), то интенсивность света, прошедшего через поляризатор (луч 1),

$$I_1 = 1 - k_{II} I_0 / 2 \quad (24)$$

(потери на анализаторе и на поляризаторе в общем случае могут быть разными).

Задачи

31. (1) Найти угол Брюстера, если луч света переходит из мыльного раствора с показателем преломления 1,33 в глицерин с показателем преломления 1,47.

32. (2) Угол преломления луча, идущего из воздуха в жидкость, равен 35° . Определить показатель преломления жидкости, если известно, что отраженный луч максимально поляризован.

33. (2) Луч света проходит через глицерин и, отражаясь от дна стеклянного сосуда, оказывается максимально поляризованным при угле падения $46,5^\circ$. Найти предельный угол полного внутреннего отражения луча на границе стекла и глицерина. Показатель преломления стекла больше, чем глицерина.

34. (2) Предельный угол полного внутреннего отражения луча на границе жидкости с воздухом равен 43° . Каким должен быть угол падения луча из воздуха на поверхность жидкости, чтобы отраженный луч был максимально поляризован?

35. (1) Анализатор в два раза уменьшает интенсивность поляризованного света, приходящего от поляризатора. Определить угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора. Поглощением и отражением света пренебречь.

36. (1) Пренебрегая поглощением и отражением света, определить угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через эту систему, уменьшилась в восемь раз.

37. (2) Угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до 60° ? Поглощением и отражением света пренебречь.

38. (2) Угол между плоскостями пропускания двух одинаковых поляроидов равен 45° . Естественный свет, проходя через эту систему, ослабляется в шесть раз. Определить коэффициенты световых потерь в поляроидах, считая их одинаковыми.

39. (2) Естественный свет последовательно проходит через два поляризатора, плоскости пропускания которых образуют между собой угол 40° . Коэффициент потерь каждого поляризатора равен 0,15. Найти, во сколько раз луч, выходящий из второго поляризатора, ослаблен по сравнению с лучом, падающим на первый.

40. (2) Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, составляет 47,5 % падающего естественного света. Во сколько раз уменьшится интенсивность поляризованного света, падающего на поляризатор, если угол между плоскостью пропускания и плоскостью поляризации равен 15° ?

2. КВАНТОВАЯ, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

2.1. Квантово-оптические явления

2.1.1. Внешний фотоэффект. Эффект Комптона

К середине XIX в. были хорошо изучены оптические (волновые) свойства излучения: интерференция, дифракция и т. д. Однако к концу XIX в. были обнаружены явления, явно противоречащие волновым представлениям о природе излучения. Чтобы разрешить противоречия, Макс Планк в 1900 г. высказал гипотезу о том, что излучение поглощается и испускается (а позже было признано, что и распространяется) порциями (квантами, корпускулами), т. е. особыми частицами (эти частицы позже были названы фотонами), энергия, масса и импульс которых неразрывно связаны с их волновыми характеристиками:

$$W_{\phi} = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}; \quad (25a)$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k. \quad (25b)$$

Таким образом, оказалось, что излучение – это поток частиц (корпускул, квантов) – фотонов, которым при этом присущи и волновые свойства.

Явление внешнего фотоэффекта заключается в вырывании электронов с поверхности металла фотонами. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта имеет вид:

$$W_{\phi} = A_{\text{вых}} + W_{k \text{ max}}. \quad (26)$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из металла;

$W_{k \text{ max}}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Фотоэффект не наблюдается, если энергия фотона меньше работы выхода. Граничные значения частоты или длины волны (красная граница фотоэффекта) определяются по формулам:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}. \quad (27)$$

Иногда требуется вылетевшие из металла электроны задержать у поверхности этого металла, для чего используют задерживающее электрическое поле, работа которого идет на изменение кинетической энергии электрона:

$$A = q_e U_3 = -\frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (28)$$

где U_3 – задерживающее напряжение электрического поля.

Эффект Комптона заключается в появлении в рассеянном излучении волн большей длины по сравнению с падающим излучением и связан с рассеянием фотонов на свободных электронах.

Для элементарного акта рассеяния фотона на свободном электроны выполняются законы сохранения энергии и импульса:

$$\begin{cases} W_{\phi} = W'_{\phi} + W_{ke}; \\ \vec{p}_{\phi} = \vec{p}'_{\phi} + \vec{p}_e. \end{cases} \quad (29)$$

Решая систему уравнений (29), можно получить, что изменение длины волны рассеянного излучения по сравнению с падающим излучением зависит только от угла φ , под которым рассеивается фотон. Обычно записывают выражение не для «новой» длины волны, а для разности между длинами волн рассеянного и основного излучения:

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \varphi), \quad (30)$$

где λ_c – комптоновская длина волны электрона.

Задачи

41. (1) Чему равна работа выхода электронов из металла, если фототок для него прекращается при увеличении длины волны падающего излучения до 0,32 мкм?

42. (2) Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых из вольфрама излучением с длиной волны 180 нм. Найти задерживающую разность потенциалов, при которой фототок прекратится.

43. (2) На поверхность платины падают лучи длиной волны 50 нм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение кинетической энергии фотоэлектрону?

44. (3) Какой максимальный заряд можно получить на алюминиевой пылинке (шарике) радиусом 12 мкм при освещении ее фотонами, соответствующими красной границе фотоэффекта в платине?

45. (1) Рентгеновское излучение длиной волны 87,3 пм нормально падает на металлическую мишень. Волны какой длины будут регистрироваться в отраженном излучении?

46. (2) Какую энергию получит свободный электрон, рассеявший фотон рентгеновского излучения длиной волны 25,1 пм на угол 120° ?

47. (2) Фотон с энергией 102 кэВ при взаимодействии со свободным электроном был рассеян на угол 90° . Найти импульс рассеянного фотона.

48. (2) Фотон рассеивается на свободном электроне. Длина волны фотона до рассеяния была равна 4,13 пм. Кинетическая энергия электрона отдачи оказалась равной 0,144 МэВ. Найти угол рассеяния фотона.

49. (3) Фотон длиной волны 5,22 пм рассеивается на угол 60° на свободном электроне. Определить энергию фотона (в электрон-вольтах) после рассеяния и импульс, полученный электроном.

50. (3) Фотон длиной волны 3,25 пм рассеивается на свободном электроне на угол 90° . Определить импульс электрона отдачи.

2.1.2. Тепловое излучение. Давление света

Любое нагретое тело излучает электромагнитные волны. Свойства теплового излучения определяются характеристиками поверхности тела и его температурой. Наиболее простой моделью нагретых тел является модель абсолютно черного тела (АЧТ).

Энергетической светимостью R_τ называется энергия, испускаемая в единицу времени единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям в пределах телесного угла 2π , т. е. в пределах полупространства,

$$R_\tau = \frac{dW}{dSdt}. \quad (31)$$

Излучательной способностью (спектральной плотностью энергетической светимости) $\varepsilon_{\tau} \omega$ называется энергетическая светимость нагретого тела в узком интервале частоты $d\omega$, принадлежащем диапазону $(\omega; \omega + d\omega)$, отнесенная к интервалу $d\omega$:

$$\varepsilon_{\tau} \omega = \frac{dR_{\tau}}{d\omega}. \quad (32)$$

Поглощательной способностью (коэффициентом поглощения) $a_{\tau} \omega$ называется безразмерная физическая величина, показывающая, какая часть падающего на тело излучения из узкого интервала частоты $d\omega$, принадлежащего диапазону $(\omega; \omega + d\omega)$, будет поглощена телом.

Для излучения тел справедлив закон Кирхгофа: отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тел и является универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры – функцией Кирхгофа:

$$\frac{\varepsilon_{\tau} \omega, T}{a_{\tau} \omega, T} = f_{\tau} \omega, T. \quad (33)$$

Поскольку АЧТ поглощает все падающее на него излучение, то очевидно, что для АЧТ поглощательная способность $a_{\tau} = 1$, а излучательная способность совпадает с универсальной функцией Кирхгофа $\varepsilon_{\tau} \omega, T = f_{\tau} \omega, T$.

Излучательная способность тел, свойства которых близки к свойствам АЧТ (а значит, и универсальная функция Кирхгофа), измеряется экспериментально.

Из анализа экспериментальных данных для АЧТ были получены:

закон Стефана – Больцмана –

$$R_{\tau} = \sigma T^4, \quad (34)$$

закон смещения Вина (рис. 12) –

$$\lambda_{(\max)} T = b, \quad (35)$$

где σ и b – постоянные Стефана – Больцмана и Вина.

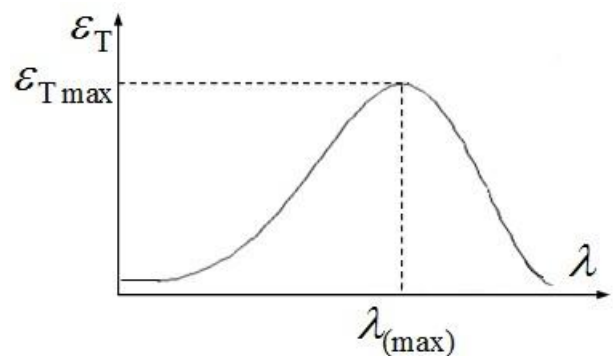


Рис. 12

После того, как Макс Планк сформулировал знаменитую гипотезу (носящую его имя) о дискретном характере излучения энергии нагретыми телами, им была получена формула (формула Планка), идеально соответствующая экспериментальному графику универсальной функции Кирхгофа (см. рис. 12).

Свет, падая на вещество, оказывает давление, которое может быть найдено по формуле:

$$P = 1 + \rho \frac{I}{c}, \quad (36)$$

где ρ – коэффициент отражения;

$$I = \frac{dW}{dSdt} \text{ – интенсивность световой волны;}$$

c – скорость света в вакууме.

Задачи

51. (1) АЧТ имеет температуру 500 К. Какова будет температура этого тела, если в результате его нагревания поток излучения увеличился в пять раз?

52. (2) Смотровое окно закалочной печи имеет диаметр 60 мм. Из окна каждую минуту излучается энергия 4,80 кДж. Какова температура в печи, если излучательная способность пламени на 80 % меньше, чем излучательная способность АЧТ?

53. (3) Какую мощность надо подводить к зачерненному металлическому шарiku радиусом 2 см, чтобы поддерживать его температуру на 27 К выше температуры окружающей среды? Температура окружающей среды 20 °С. Считать, что тепло теряется только вследствие излучения.

54. (2) Мощность, излучаемая АЧТ, составляет 10 кВт, максимум излучения приходится на длину волны 0,80 мкм. Определить площадь излучающей поверхности.

55. (2) АЧТ имеет температуру 2900 К. В результате остывания этого тела длина волны, на которую приходится максимум интенсивности в спектре равновесного излучения, изменилась на 9 мкм. До какой температуры охладилось тело?

56. (2) Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра на фиолетовую?

57. (1) Чему равна сила, с которой солнечный свет действует на Землю, если на каждый квадратный метр Земли, перпендикулярный солнечным лучам, в единицу времени поступает 1400 Дж энергии? Считать, что Земля поглощает практически всю падающую на нее энергию. Радиус Земли – 6400 км.

58. (2) Чему равно давление света лампы проектора мощностью 500 Вт на экран размером 2 м на 3 м при проецировании пустого (белого) кадра, если экран отражает 90 % падающего на него излучения? Считать, что в энергию электромагнитных волн преобразуется 20 % мощности лампы.

59. (2) Какую мощность должен иметь «фотонный двигатель», чтобы вдали от звезд обеспечить движение космического корабля массой 100 т с ускорением, равным ускорению свободного падения тел вблизи поверхности Земли? Считать, что излучение двигателя будет плоскопараллельным лучом.

60. (3) Какое наибольшее значение может иметь момент сил трения на оси вращения «крылышек» в опытах Лебедева по давлению света, чтобы «крылышки», расположенные перпендикулярно падающему свету, пришли в движение. Считать, что диаметр каждого «крылышка» 5,5 см, расстояние между их центрами 15 см, а точечный источник света мощностью излучения 200 Вт находится на расстоянии 1,2 м от оси вращения.

2.2. Квантовая механика

В 1924 г. Луи де Бройль предложил сопоставить движению частицы волну, длину которой можно вычислить по формуле:

$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \quad (37)$$

Соотношение неопределенностей Гейзенберга, записанное для координаты и проекции импульса,

$$\Delta x \Delta p_x \geq h \quad (38)$$

означает, что у микрочастицы не могут быть измерены одновременно точное значение координаты частицы и проекция ее импульса на эту же ось координат. Разумеется, что такие же соотношения можно записать и для других проекций. По сути, соотношение (38) определяет также минимально возможное значение проекции импульса частицы, движение которой ограничено интервалом Δx .

Соотношение неопределенностей Гейзенберга можно записать также для энергии и времени:

$$\Delta W \Delta t \geq h. \quad (39)$$

Соотношение (39) связывает время жизни микрочастицы на энергетическом уровне и ширину (неопределенность, погрешность энергии) уровня.

Поведение квантовых микрочастиц описывается уравнением Шредингера, решением которого является волновая функция $\psi_{(x,y,z,t)}$, которую часто называют амплитудой вероятности.

Для частицы массой m , находящейся в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме (БГОПЯ) шириной a , энергия принимает дискретные значения:

$$W_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \quad (40)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Квантованные значения энергии W_n называются уровнями энергии, а число n – главным квантовым числом. Состояние с $n = 1$ называется основным, а все остальные – возбужденными.

Стационарные *волновые функции*, являющиеся решением стационарного уравнения Шредингера для частицы в БГОПЯ и удовлетворяющие граничным условиям и условию нормировки, имеют вид:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi n}{a} x\right). \quad (41)$$

Задачи

61. (1). Протон имеет дебройлевскую длину волны 12 пм. Найти импульс и кинетическую энергию (в электрон-вольтах) этого протона. Можно ли обнаружить отклонения от классической механики, изучая столкновение этого протона с другим протоном? Радиус протона равен 1,2 фм.

62. (2) Вычислить дебройлевскую длину волны электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 990 В. Можно ли обнаружить отклонения от классической механики, изучая столкновение этого электрона с металлической пылинкой радиусом 200 нм?

63. (2) Протон движется в магнитном поле $0,25 \text{ Тл}$ по окружности радиусом 10 см . Найти дебройлевскую длину волны этого протона. Можно ли обнаружить отклонения от классической механики, изучая столкновение этого протона с альфа-частицей? Радиус альфа-частицы равен $1,9 \text{ фм}$.

64. (3) Поток электронов, имеющих энергию $0,15 \text{ мэВ}$, падает нормально на преграду с двумя узкими прорезями, расположенными на расстоянии $0,22 \text{ мкм}$ друг от друга. В $2,5 \text{ м}$ от преграды находится экран. Найти расстояние между двумя соседними участками экрана, в которые электроны будут попадать с наибольшей вероятностью.

65. (1) Размер атома имеет порядок $0,1 \text{ нм}$. Оценить наименьшую скорость, с которой может двигаться электрон в атоме.

66. (2) Размер ядра имеет порядок 10 фм . Найти минимальную массу частицы, которая может находиться в ядре.

67. (3) Найти время жизни электрона на энергетическом уровне в атоме, если ширина спектральной линии желтого цвета (560 нм) при переходе электрона с этого уровня в основное состояние равна 26 пм .

68. (2) Вычислить разность энергий четвертого и шестого *возбужденных* уровней энергии электрона при движении его в БГОППЯ с нулевым дном шириной $0,12 \text{ нм}$. Ответ выразить в электронвольтах.

69. (2) Электрон находится в БГОППЯ с нулевым дном шириной a во втором возбужденном энергетическом состоянии. Определить, в каких точках интервала $0 \leq x \leq a$ плотность вероятности обнаружить частицу имеет максимальное и минимальное значения. Решение пояснить рисунком.

70. (2) На рис. 13 изображена волновая функция электрона, находящегося в БГОППЯ шириной a . На каком энергетическом уровне находится электрон? С какой вероятностью электрон можно обнаружить в интервале $a/2; 5a/6$?

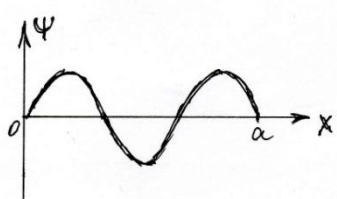


Рис. 13

2.3. Атомная физика

Простейшей квантовой системой, содержащей один электрон, является атом водорода. Состояние электрона в атоме водорода или в водородоподобном (т. е. содержащем только один электрон) ионе определяется набором четырех квантовых чисел: главное квантовое число n , определяющее энергию электрона в атоме; орбитальное квантовое число ℓ , определяющее форму

электронной орбитали; магнитное квантовое число m , определяющее ориентацию электронной орбитали по отношению к какому-нибудь направлению (например, магнитному полю), и магнитное спиновое число m_s , определяющее ориентацию спина электрона в пространстве (например, по отношению к магнитному полю). Каждое квантовое число соответствует физической величине, значение которой точно определено в данном состоянии.

Собственные значения энергии атома водорода определяются его главным квантовым числом n :

$$W_n = -\frac{W_i}{n^2}, \text{ где } n = 1, 2, \dots, \infty. \quad (42)$$

Энергетический спектр атома водорода представлен на рис.14.

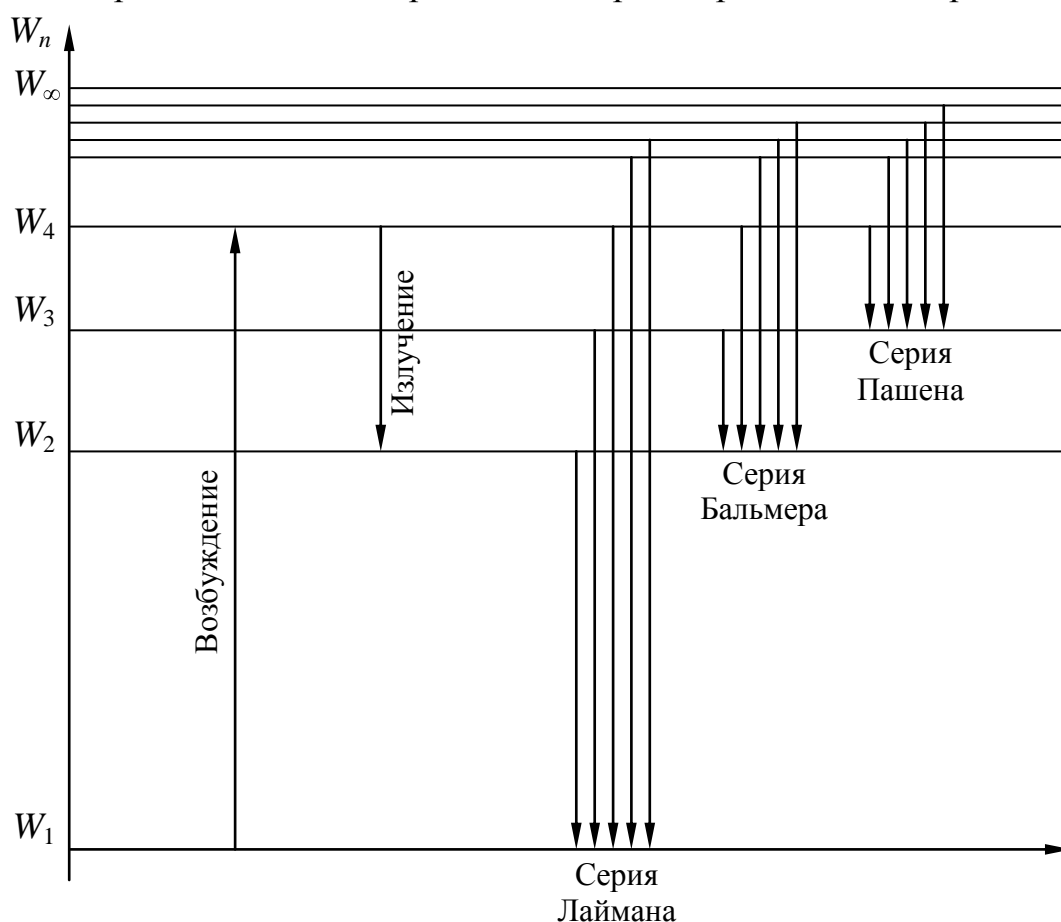


Рис. 14

Величина W_i называется энергией ионизации.

Энергетическое состояние электрона W_1 (с $n = 1$) называется основным, или невозбужденным состоянием. Здесь электрон может находиться неограниченно долго. Если такому электрону сообщить дополнительную энергию $W_{\text{доп}}$, то он может перейти на один из вышележащих энергетических уровней W_m .

$$W_{\text{доп}} = W_m - W_1. \quad (43)$$

Этот процесс называется возбуждением атома, а энергетические состояния (уровни энергии) с $n > 1$ – возбужденными. В любом возбужденном состоянии электрон может находиться очень короткое время ($\sim 10^{-9}$ с), после чего он спонтанно (самопроизвольно) переходит на один из нижележащих уровней.

При этом электрон теряет энергию в виде высокочастотной электромагнитной волны, квантом которой является фотон. Следовательно, при переходе электрона с вышележащего уровня на какой-либо нижележащий излучается фотон (см. рис. 14), длину волны которого можно определить по формуле:

$$W_{\phi} = \frac{hc}{\lambda_{mn}} = W_m - W_n, \quad (44)$$

где λ_{mn} – длина волны излучения, появляющегося при переходе электрона из состояния W_m в состояние W_n (значения энергии W_m и W_n вычисляются по формуле (42)).

Переходы электрона с уровня на уровень ограничены так называемыми правилами отбора, которые являются следствием законов сохранения. Для атома водорода это правило заключается в том, что орбитальное квантовое число при переходе должно изменяться (уменьшаться или увеличиваться) только на единицу ($\Delta \ell = \pm 1$).

Задачи

71. (1) Найти энергию основного и второго возбужденного состояния электрона: 1) в атоме водорода; 2) в однозарядном ионе гелия; 3) в дважды ионизованном атоме лития.

72. (1) Свет какой длины волны будет излучаться нагретым водородом, если в атомах водорода происходят переходы электронов из второго возбужденного состояния в первое возбужденное состояние?

73. (2) В каких пределах должна лежать энергия электронов, чтобы при возбуждении ей атомов водорода спектр содержал шесть спектральных линий?

74. (3) В каких пределах должна лежать длина волн ультрафиолетового излучения, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого излучения в видимой части спектра излучения наблюдались три спектральные линии?

75. (2) Какую наименьшую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода в спектре появилась линия, соответствующая максимальной длине волны в серии Пашена?

76. (2) Какой наименьший импульс должны иметь электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода в спектре появилась линия, соответствующая минимальной длине волны в серии Бальмера?

77. (3) Какую наименьшую ускоряющую разность потенциалов должны пройти электроны, чтобы при возбуждении ими однократно ионизованного атома гелия в его спектре появилась линия, соответствующая максимальной длине волны в серии Лаймана?

78. (3) С помощью четырех квантовых чисел описать состояния электрона в атоме водорода на втором и на третьем энергетическом уровнях.

79. (3) Основываясь на результатах предыдущей задачи, пояснить, какие переходы электронов из одного состояния в другое запрещены правилом отбора.

80. (3) Атом водорода находится во втором возбужденном состоянии. Вычислить все возможные значения момента импульса электрона и его проекции на заданное направление в этом атоме.

2.4. Ядерная физика

Символически любое ядро обозначают в виде A_ZX , где Z – порядковый номер атома в периодической системе элементов Менделеева, или зарядовое число ядра; A – массовое число ядра, или масса ядра в атомных единицах массы. Величина Z показывает количество протонов в ядре, а количество нейтронов в ядре можно вычислить по уравнению: $N = A - Z$. При этом масса ядра $M_{\text{я}}$ оказывается меньше суммарной массы нуклонов, входящих в состав этого ядра. Существует дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}, \quad (45)$$

который, согласно выводам специальной теории относительности, обуславливает энергию связи нуклонов в ядре:

$$\Delta W_{\text{св}} = c^2 \Delta m = c^2 (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) - \quad (46)$$

это энергия, которую нужно сообщить ядру, чтобы разделить его на составные части (нуклоны). Энергия связи, отнесенная к массовому числу, называется удельной энергией связи $W_{\text{уд}} = \Delta W_{\text{св}} / A$.

Закон радиоактивного распада ядер записывается так:

$$N = N_0 \exp -\lambda t = N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \quad (47)$$

где N_0 – первоначальное количество радиоактивных ядер;

N – количество нераспавшихся ядер к моменту времени t ;

λ – постоянная радиоактивного распада;

$T_{1/2}$ – период полураспада радиоактивных ядер (время, за которое распадается половина ядер).

При радиоактивном распаде наблюдаются α -, β - и γ -излучения.

α -частица – это ядро атома гелия ${}^4_2\text{He} = {}^4_2\alpha$, поэтому при α -распаде ядра зарядовое число ядра Z уменьшается на две единицы, а массовое число уменьшается на четыре единицы.

β -частица – это электрон, поэтому при β -распаде ядра зарядовое число Z возрастает на одну единицу, а массовое число остается практически неизменным ($m_e \ll A$).

γ -излучение – это поток фотонов, которые излучаются возбужденными ядрами (при этом ни заряд, ни массовое число ядра не изменяются).

При бомбардировке ядер какими-либо частицами возможно протекание ядерных реакций:



При этом выполняются законы сохранения заряда и массового числа:

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4; \quad (49)$$

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \quad (50)$$

Задачи

81. (1) Вычислить дефект массы Δm и энергию связи ядра ${}^{11}_5\text{B}$ (в МэВ).

82. (1) Определить удельную энергию связи ядра ${}^7_3\text{Li}$ (в МэВ/нуклон).

83. (2) Через какой интервал времени в радиоактивном веществе остается 25 % нераспавшихся радиоактивных ядер?

84. (2) Сколько процентов радиоактивных ядер распадется через интервал времени, равный двум периодам полураспада?

85. (2) Первоначальное количество атомов радиоактивного изотопа было 1010. Период полураспада данного изотопа – 20 мин. Сколько атомов изотопа не испытают превращения через 60 мин?

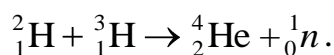
86. (1) В результате захвата α -частицы ядром изотопа ${}^{14}_7\text{N}$ образуются неизвестный элемент и протон. Записать реакцию и определить неизвестный элемент.

87. (2) В результате термоядерного синтеза изотопа водорода трития и изотопа водорода дейтерия образуются гелий ${}^4_2\text{He}$ и неизвестная частица. Записать ядерную реакцию и определить неизвестную частицу.

88. (2) Сколько α - и β -распадов должно произойти при радиоактивном распаде ядра урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ и конечном превращении его в ядро свинца ${}^{198}_{82}\text{Pb}$?

89. (2) Радиоактивный свинец ${}^{212}_{82}\text{Pb}$, испытав один α -распад и два β -распада, превращается в неизвестный химический элемент. Записать ядерную реакцию и определить химический элемент.

90. (3) Вычислить энергию, выделяющуюся при ядерной реакции синтеза 1 г гелия. Какую массу каменного угля, удельная теплота сгорания которого 27 МДж/кг, нужно сжечь, чтобы выделилась такое же количество энергии?



3. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

3.1. Зонная теория твердых тел

Электроны в твердом теле распределяются по квантовым состояниям в соответствии с распределением Ферми – Дирака:

$$\langle N_F \rangle = \left[\exp\left(\frac{W - W_F}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (51)$$

позволяющим вычислить среднее число электронов в любом квантовом состоянии или вероятность того, что данное квантовое состояние может быть занято электроном. В формуле (51) W_F – энергия Ферми.

При $T = 0$ К все уровни, начиная с самого нижнего, заполнены вплоть до уровня Ферми, а энергию электрона, соответствующую данному состоянию, называют энергией Ферми:

$$W_F = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3}, \quad (52)$$

где $n_e = zn$ – концентрация валентных электронов, z – валентность атомов;

$n = \frac{\rho N_A}{M}$ – концентрация атомов.

Плотность энергетических уровней в кристалле при 0 К

$$g(W) = \frac{4\pi V}{h^3} (2m)^{3/2} W^{1/2} \quad (53)$$

позволяет вычислить количество уровней, приходящихся на единичный интервал энергий.

Средняя энергия электронов в кристалле при 0 К

$$\langle W \rangle = \frac{3}{5} W_F. \quad (54)$$

Функция распределения электронов в металлах по энергиям

$$f(W) = \langle N_F \rangle g(W). \quad (55)$$

Условие нормировки для этой функции распределения имеет вид:

$$\int_0^\infty \langle N_F \rangle g(W) dW = N. \quad (56)$$

Задачи

91. (2) Какова вероятность заполнения электронами в металле энергетического уровня, расположенного на 0,01 эВ ниже уровня Ферми, при температуре 18°C?

92. (2) Как и во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами энергетического уровня в металле, если уровень расположен на 0,1 эВ выше уровня Ферми, а температура изменяется от 1000 до 300 К?

93. (1) Вычислить энергию Ферми для алюминия при температуре 0 К. Алюминий считать трехвалентным.

94. (1) Найти среднюю энергию электронов в металле при 0 К, если их концентрация равна $3,6 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$.

95. (2) Определить концентрацию свободных электронов в металле, для которого уровень Ферми равен 6,3 эВ при 0 К.

96. (2) Полагая, что на каждый атом меди приходится по одному свободному электрону, определить температуру, при которой средняя кинетическая энергия электронов классического электронного газа была бы равна средней энергии свободных электронов в меди при 0 К.

97. (3) Давление электронного газа в металлах является одним из основных факторов, определяющих их сжимаемость. Найти давление электронного газа при 0 К в металле, у которого концентрация электронного газа равна $8,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

98. (2) Определить, какая часть электронов проводимости в металле при 0 К имеет кинетическую энергию, большую $0,50 W_F$.

99. (2) Оценить, какая доля свободных электронов в металле при 0 К имеет энергию, не превышающую среднюю энергию электронов.

100. (3) Вычислить суммарную кинетическую энергию электронов проводимости в 1 см^3 цезия при температуре 0 К.

3.2. Тепловые свойства твердых тел

При нагревании все тела расширяются. Тело с линейным размером L при увеличении температуры на ΔT расширяется на величину

$$\Delta L = aL\Delta T, \quad (57)$$

где a – коэффициент линейного теплового расширения.

В рамках классических представлений был получен закон Дюлонга – Пти, который утверждает: молярная теплоемкость всех твердых тел ни от чего не зависит и является постоянной, равной $3R$.

Считая, что ионы кристаллической решетки, являясь квантовыми осцилляторами, при переходе из возбужденных состояний излучают низкочастотные тепловые волны, квантами которых являются **фононы**, и введя характеристическую температуру Дебая, при которой тепловая энергия $k_B T_D$ равна максимальной энергии фононов для данного твердого тела

$$T_D = \frac{\hbar \omega_{\max}}{k_B} = \frac{\hbar v_{3B}}{k_B} (6\pi^2 n)^{1/3}, \quad (58)$$

где \hbar – постоянная Планка;

v_{3B} – скорость звука в данном теле;

n – концентрация атомов твердого тела,

Дебай смог получить выражение для молярной теплоемкости твердых тел, которая точно соответствовала экспериментальным результатам.

Для предельных случаев получается:

1) при $T \gg T_D$, $c_{v_V} = 3R$, что точно соответствует классической теории Дюлонга – Пти,

$$2) \text{ а при } T \ll T_D \quad c_{v_V} = \frac{12}{5} \pi^4 R \left(\frac{T}{T_D} \right)^3, \quad (59)$$

что точно соответствует эксперименту.

Для металлов в общей теплоемкости должна быть учтена еще и электронная теплоемкость

$$c_{v \text{ металла}} = c_{v \text{ реш.}} + c_{ve}, \quad (60)$$

которая вычисляется по формуле:

$$c_{ve} = \frac{\pi^2}{2} zR \frac{k_B T}{W_F}. \quad (61)$$

При температуре, существенно превышающей абсолютный ноль, вклад электронной теплоемкости в теплоемкость металла очень мал, так как тепловому возбуждению подвергается лишь небольшое число электронов.

Процесс теплопроводности в твердых телах осуществляется с помощью фононов. В металлах кроме фононов тепловую энергию переносят еще и электроны. Количественно поток тепловой энергии δQ через поперечное сечение стержня площадью dS за время dt при градиенте температуры dT/dx вдоль стержня можно рассчитать по известному закону Фурье:

$$\delta Q = -\kappa \frac{dT}{dx} dS dt, \quad (62)$$

где κ – коэффициент теплопроводности.

Задачи

101. (1) При температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ длина рельса $12,5\text{ м}$. Какой наименьший воздушный зазор следует оставить на стыке рельсов, если температура нагревания рельса может достигать $40\text{ }^{\circ}\text{C}$? Коэффициент линейного расширения металла $1,2 \cdot 10^{-5}\text{ К}^{-1}$.

102.(2) К стальной проволоке радиусом 1 мм подвешен груз. Под действием этого груза проволока получила такое же удлинение, как при нагревании на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти массу груза. Коэффициент линейного расширения металла $1,2 \cdot 10^{-5}\text{ К}^{-1}$, модуль Юнга 210 ГПа .

103. (3) Диаметр колеса тепловоза при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 2 м . Определить, на сколько оборотов меньше колесо сделает на пути пробега тепловоза в 200 км летом при температуре $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, чем зимой при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент линейного расширения металла колеса $1,2 \cdot 10^{-5}\text{ К}^{-1}$.

104. (2) Оценить максимальное значение импульса фонона в серебре. Фотон какой длины волны обладал бы таким же импульсом?

105.(2) На нагревание металлического предмета массой 100 г от 20 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ затрачено $8,3\text{ кДж}$ тепла. Определить, из какого металла изготовлен предмет, если указанный интервал температур выше характеристической температуры Дебая.

106. (2) Медный образец массой 100 г находится при температуре 10 К . Определить количество теплоты, необходимое для нагревания образца до температуры 20 К . Характеристическая температура Дебая для меди 339 К .

107. (2) Вычислить изменение энтропии 100 г кристаллического хлористого натрия, характеристическая температура Дебая которого 320 К , при его нагревании от 10 до 25 К .

108.(3) Определить температуру, при которой теплоемкость электронного газа будет равна теплоемкости кристаллической решетки меди. Характеристическая температура Дебая для меди 339 К .

109. (2) Стальной стержень длиной 30 см и диаметром 17 мм , нагревается с одного конца до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а другой конец упирается в тающий лед. Предполагая, что передача тепла происходит исключительно вдоль стержня, подсчитать массу льда, растаявшего за 10 минут . Коэффициент теплопроводности стали принять равным $47\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг .

110. (2) Медный кофейник нагревается на плите. Вода доведена до кипения. Каждую секунду выделяется 2,6 г пара. Толщина дна кофейника – 3,2 мм, диаметр дна – 10 см. Определить разность температур между внутренней и наружной поверхностями дна, предполагая, что оно нагревается равномерно. Потерями тепла пренебречь. Коэффициент теплопроводности меди принять равным 384 Вт/(м·К), удельная теплота парообразования для воды 2,25 МДж/кг.

3.3. Электропроводность металлов и полупроводников

Металлы – хорошие проводники электрического тока. Носителями электрического тока в металлах являются свободные электроны.

В классической электронной теории электропроводности металлов, которая считала электроны в металлах практически свободными частицами – отрицательно заряженным электронным газом (в качестве модели использовалась модель идеального газа), было получено выражение для расчета удельной проводимости металлического проводника:

$$\sigma = \frac{q^2 n_e \langle \ell \rangle}{m \langle v \rangle}, \quad (63)$$

где q – заряд электрона;

$\langle \ell \rangle$ – средняя длина свободного пробега электронов (равная межузельному расстоянию кристаллической решетки);

$\langle v \rangle$ – средняя скорость теплового (хаотического) движения электронов.

В квантовой физике для определения удельной проводимости металла было получено выражение:

$$\sigma = \frac{q^2 n_e \langle L \rangle}{m^* v_F}, \quad (64)$$

где m^* – эффективная масса электрона,

$\langle L \rangle$ – средняя транспортная длина свободного пробега электронов (для полного уменьшения скорости в данном направлении до нуля требуется не одно, а в среднем Z столкновений с рассеивающими центрами). Только после Z столкновений исчезает всякая корреляция между начальной и конечной скоростями движения электронов.

Время, в течение которого будет происходить «рассасывание» направленного движения электронов, и в этом случае представляет собой время релаксации. Тогда

$$\langle L \rangle = \langle \ell \rangle \cdot Z, \quad (65)$$

где $\langle \ell \rangle$ – средняя длина свободного пробега электрона, которому в металле мешают двигаться фононы (квазичастицы тепловых волн в кристаллах).

Полученный результат практически совпадает с классическим (63), но величины, входящие в выражения (63) и (64), имеют принципиальную разницу. В квантовой физике считается, что электроны при своем движении в твердом теле рассеиваются на тепловых флуктуациях кристаллической решетки (фононах), концентрация которых существенно зависит от температуры, при этом средняя скорость теплового движения электронов практически не зависит от температуры, так как тепловому возбуждению подвергается небольшое количество электронов, находящихся вблизи уровня Ферми.

В области высоких температур $T \gg T_D$ все осцилляторы возбуждены вплоть до ω_{\max} , тогда с повышением температуры концентрация фононов $\sim T$ и $R \sim T$, что согласуется с экспериментом. В области низких температур $T \ll T_D$ с повышением температуры происходит не только увеличение фононов с данной частотой, но и быстрый рост новых фононов, поэтому $R \sim T^3$, что также хорошо согласуется с экспериментом. В области сверхнизких температур вблизи 0 К концентрация фононов становится столь малой, что основную роль в рассеянии электронов начинают выполнять примеси, концентрация которых не зависит от температуры, и тогда R стремится к $R_0 = \text{const}$.

Если в металлах концентрация свободных электронов не зависит от температуры, то в полупроводниках с повышением температуры наблюдается экспоненциальный рост носителей заряда (электронов, дырок):

$$n_e \sim \langle N_F \rangle = \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right). \quad (66)$$

Тогда для удельной проводимости собственного полупроводника можно записать:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right). \quad (67)$$

Так как $R \sim \frac{1}{\sigma}$, то сопротивление собственного полупроводника можно вычислить по формуле:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2k_B T}\right). \quad (68)$$

Явление возникновения свободных носителей зарядов (электронов, дырок) в полупроводнике при облучении его электромагнитным излучением называется внутренним фотоэффектом, или фотопроводимостью полупроводника. Внутренний фотоэффект возможен при условии, чтобы энергия электромагнитного излучения (энергия фотонов) была не меньше энергии активации собственного (ширина запрещенной зоны) и примесного полупроводников: $W_\phi \geq \Delta W$. Граничное значение энергии фотонов (частота, длина волны соответствующего излучения) называется красной границей внутреннего фотоэффекта:

$$\begin{cases} \nu_{\text{гр}} = \frac{\Delta W}{h}; \\ \lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{\Delta W}. \end{cases} \quad (69)$$

При увеличении освещенности увеличивается количество свободных зарядов (электронов, дырок), что ведет к снижению электрического сопротивления.

Задачи

111. (2) Пользуясь классической теорией электропроводности металлов, определить число соударений, которые испытывает электрон за время 1 с, находясь в металле, если концентрация свободных электронов равна $5,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Удельную проводимость металла принять равной 10 МСм/м.

112. (2) Оценить среднее время между двумя последовательными соударениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки меди при температуре 27 °С, если удельное электрическое сопротивление 17 нОм·м. Считать, что число электронов проводимости и число атомов меди в единице объема одинаково.

113. (2) Каково должно быть время ускорения электрическим полем напряженностью 3,6 В/см электрона проводимости в германии, чтобы измене-

ние импульса этого электрона было равно импульсу акустического фонона с частотой 1,4 ТГц? Скорость звука – 4,6 км/с.

114. (2) Во сколько раз изменится при повышении температуры от 300 до 360 К электропроводность: а) металла; б) собственного полупроводника, ширина запрещенной зоны которого 0,32 эВ? Каков характер изменения в обоих случаях?

115. (2) Германиевый образец нагревают от 0 до 17 °С. Принимая ширину запрещенной зоны германия 0,75 эВ, определить, во сколько раз возрастает его удельная проводимость.

116. (2) При нагревании некоторого собственного полупроводникового кристалла от 0 до 10 °С его удельная проводимость возрастает в 2,3 раза. Определить ширину запрещенной зоны кристалла.

117. (2) Сопротивление полупроводникового кристалла *PbS* при температуре 20 °С равно 10 кОм. Определить его сопротивление при температуре 50 °С, если энергия активации у него 0,41 эВ.

118. (2) Электрон из зоны проводимости кристалла кремния рекомбинирует с дыркой на донорном уровне. Донорный уровень образован атомом мышьяка, имеющим энергию активации 54 мэВ. Какова частота излучаемой при этом электромагнитной волны? Прозрачен или непрозрачен кремний при такой частоте?

119. (2) При очень низкой температуре красная граница внешнего фотоэффекта сурьмяноцезиевого фотокатода равна 0,65 мкм, а красная граница фотопроводимости – 2,07 мкм. Определить в электронвольтах положение дна зоны проводимости этого полупроводника относительно вакуума.

120. (3) Используя понятие «энергетическая зона», доказать расчетом следующие свойства: а) металлы непрозрачны во всем диапазоне световых волн; б) полупроводники непрозрачны для видимого света, но прозрачны для инфракрасного; в) многие изоляторы прозрачны для видимого света.

Библиографический список

1. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М., 2006. 560 с.
2. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М., 2003. 607 с.

3. Савельев И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. М., 2007. Т. 3. 320 с.
4. Оселедчик Ю. С. Физика. Модульный курс для технических вузов / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. М., 2012. 525 с.
5. Епифанов Г. И. Физика твердого тела / Г. И. Епифанов. СПб, 2011. 288 с.
6. Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М., 2002. Ч. 1. 616 с.
7. Чертов А. Г. Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. М., 2001. 640 с.
8. Физика: Большой энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Большая российская энциклопедия, 2003. 944 с.
9. Физические величины / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П.1

Физические постоянные

Физическая постоянная	Значение
Скорость света в вакууме c , м/с	$3,0 \cdot 10^8$
Постоянная Планка h , Дж·с	$6,63 \cdot 10^{-34}$
\hbar , Дж·с	$1,05 \cdot 10^{-34}$
Комптоновская длина волны электрона λ_c , м	$2,42 \cdot 10^{-12}$
Постоянная Стефана – Больцмана σ , Вт/(м ² К ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$
Постоянная Вина b , К·м	$2,9 \cdot 10^{-3}$
Постоянная Больцмана k_B , Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
Универсальная газовая постоянная R , Дж/(моль·К)	8,31
Энергия ионизации атома водорода W_i , эВ	13,6
Число Авогадро N_A , моль ⁻¹	$6,02 \cdot 10^{23}$

Таблица П.2

Заряд и масса покоя частиц

Название частицы	Заряд, Кл	Масса покоя, кг
Электрон	$-1,60 \cdot 10^{-19}$	$9,11 \cdot 10^{-31}$
Протон	$+1,60 \cdot 10^{-19}$	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Альфа-частица	$+3,20 \cdot 10^{-19}$	$6,64 \cdot 10^{-27}$

Таблица П.3

Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
милли	м	10^{-3}	кило	к	10^3
микро	мк	10^{-6}	мега	М	10^6
нано	н	10^{-9}	гига	Г	10^9
пико	п	10^{-12}	тера	Т	10^{12}

Таблица П.4

Интервалы длины волн и
соответствующие им цвета видимой части спектра

Цвет спектра	Длина волны, нм	Цвет спектра	Длина волны, нм
Красный	760 – 620	Голубой	500 – 480
Оранжевый	620 – 590	Синий	480 – 450
Желтый	590 – 560	Фиолетовый	450 – 380
Зеленый	560 – 500		

Таблица П.5

Плотность вещества

Вещество	Плотность ρ , г/см ³	Вещество	Плотность ρ , г/см ³
Алюминий	2,7	Серебро	10,5
Медь	8,9	Цезий	1,87

Таблица П.6

Работа выхода электрона из металла

Металл	A_v , эВ	Металл	A_v , эВ
Алюминий	3,74	Медь	4,47
Вольфрам	4,54	Платина	5,29

Таблица П.7

Атомная масса нуклонов и изотопов некоторых элементов

Изотоп	${}_1^1\text{p}$	${}_0^1\text{n}$	${}_5^{11}\text{B}$	${}_3^7\text{Li}$
Ат. масса, а. е. м.	1,007276470	1,008665012	11,0093055	7,0160040
Изотоп	${}_1^2\text{D}$	${}_1^3\text{T}$	${}_2^4\text{He}$	${}_2^3\text{He}$
Ат. масса, а. е. м.	2,014101795	3,0160493	4,002603267	3,01602968

Таблица П.8

Некоторые внесистемные единицы измерения физических величин

Название	Значение	Название	Значение
1электронвольт (эВ)	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	1 литр (л)	10^{-3} м ³
1ат. ед. массы (а. е. м.)	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг	1 килокалория (ккал)	4,1868 Дж

Таблица П.9

Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева										VII		VIII							
I		II		III		IV		V		VI		He							
1	H 1,00794 водород	3	Li 6,941 литий	4	Be 9,01218 бериллий	5	B 10,811 бор	6	C 12,011 углерод	7	N 14,0067 азот	8	O 15,9994 кислород	9	F 18,998403 фтор	10	Ne 20,179 неон	2	He 4,002602 гелий
2		11	Na 22,98977 натрий	12	Mg 24,305 магний	13	Al 26,98154 алюминий	14	Si 28,0855 кремний	15	P 30,97376 фосфор	16	S 32,066 сера	17	Cl 35,453 хлор	18	Ar 39,948 аргон	26	Fe 55,847 железо
3		19	K 39,0983 калий	20	Ca 40,078 кальций	21	Sc 44,95591 скандий	22	Ti 47,88 титан	23	V 50,9415 ванадий	24	Cr 51,9961 хром	25	Mn 54,9380 марганец	28	Ni 58,69 никель	27	Co 58,9332 кобальт
4		29	Cu 63,546 медь	30	Zn 65,39 цинк	31	Ga 69,723 галлий	32	Ge 72,59 германий	33	As 74,9216 мышьяк	34	Se 78,96 селен	35	Br 79,904 бром	36	Kr 83,80 криптон	44	Ru 101,07 рутений
5		37	Rb 85,4678 рубидий	38	Sr 87,62 стронций	39	Y 88,9059 иттрий	40	Zr 91,224 цирконий	41	Nb 92,9064 ниобий	42	Mo 95,94 молибден	43	Tc [98] технеций	45	Rh 102,9055 родий	46	Pd 106,42 палладий
6		47	Ag 107,8682 серебро	48	Cd 112,41 кадмий	49	In 114,82 индий	50	Sn 118,710 олово	51	Sb 121,75 сурьма	52	Te 127,60 теллур	53	I 126,9045 йод	54	Xe 131,29 ксенон	76	Os 190,2 осмий
7		55	Cs 132,9054 цезий	56	Ba 137,33 барий	57	La* 138,9055 лантан	72	Hf 178,49 гафний	73	Ta 180,9479 тантал	74	W 183,85 вольфрам	75	Re 186,207 рений	77	Pt 192,22 иридий	78	Pt 195,08 платина
8		80	Au 196,9665 золото	81	Hg 200,59 ртуть	82	Tl 204,383 таллий	83	Pb 207,2 свинец	84	Bi 208,9804 висмут	85	Po [209] полоний	86	At [210] астат	88	Rn [222] радон	108	Hs [265] гасий
9		87	Fr [223] франций	88	Ra [226] радий	89	Ac** [227] актиний	104	Rf [261] резерфордий	105	Db [262] дубний	106	Sg [263] сигборгий	107	Bh [262] борий	109	Mt [266] майгтерий	110	Ds [271] дармштадтий
10		111	Rg [272] регентий	112	Uub [285] унубий	113 (Uut)	114	Uuq [287] ункувадий	115 (Up)	116	Uuh [292] унгверсий	117 (Uus)	118	Uuo [293] унуоктий	119	Uut [293] унгверсий	120	Uuo [293] унуоктий	

* Лантаноиды

Ce 58 140,12 церий	Pr 59 140,9077 протактиний	Nd 60 144,24 неодим	Pm 61 [145] прометий	Sm 62 150,36 самарий	Eu 63 151,96 европий	Gd 64 157,25 гадолиний	Tb 65 158,9254 тербий	Dy 66 162,50 дипрозий	Ho 67 164,9304 гольмий	Er 68 167,26 эрбий	Tm 69 168,9342 тулий	Yb 70 173,04 иттербий	Lu 71 174,967 лютеций
--------------------------	----------------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	------------------------------	-----------------------------	-----------------------------	------------------------------	--------------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

* * Актиноиды

Th 90 232,0381 торий	Pa 91 [231] протактиний	U 92 238,0289 уран	Np 93 [237] нептуний	Pu 94 [244] плутоний	Am 95 [243] амерций	Cm 96 [247] курий	Bk 97 [247] берклий	Cf 98 [251] калифорний	Es 99 [252] эйзенштейний	Fm 100 [257] фермий	Md 101 [258] менделевий	No 102 [259] нобелий	Lr 103 [260] лоуренсий
----------------------------	-------------------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------	-------------------------	---------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------

Целое число в скобках – массовое число наиболее устойчивого изотопа

Учебное издание

ГОНЧАР Игорь Иванович, КРОХИН Сергей Николаевич,
ЛИТНЕВСКИЙ Леонид Аркадьевич, СЕРДЮК Ольга Ивановна,
СОСНОВСКИЙ Юрий Михайлович, ТОДЕР Георгий Борисович

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Часть 3

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.
КВАНТОВАЯ, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.
ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Практикум к решению задач

Редактор Н. А. Майорова
Корректор И. А. Сенеджук

Подписано в печать .01.2015. Формат $60 \times 84^{1/16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,8. Уч.-изд. л. 3,1.
Тираж 1000 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

ЧАСТЬ 3

**ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.
КВАНТОВАЯ, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.
ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

ОМСК 2014

РЕЦЕНЗИЯ
на методические указания
к проведению практических занятий по физике
И.И.Гончара, С. Н. Крохина, Л. А. Литневского,
О.И.Сердюк, Ю.М.Сосновского, Г.Б.Тодера
«Практикум по физике. Часть 3. «Волновая оптика.
Квантовая, атомная и ядерная физика. Физика твердого тела»

Методические указания предназначены для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов 2 курса при изучении разделов «Волновая оптика», «Квантовая, атомная и ядерная физика» и «Физика твердого тела» для технических специальностей и направлений бакалавриата.

В указаниях приведены краткие сведения из теории, выписаны основные формулы, необходимые для решения задач, подобран большой банк задач для самостоятельной работы студентов. Весь материал удачно структурирован по темам, практически привязанным к отдельным занятиям, что будет облегчать преподавателям процедуру составления календарных планов, а студентам даст возможность порешать разноплановые задачи на каждую тему.

Методические указания написаны доступным студентам языком и реализуют компетентностный подход к изучению курса физики. Считаю, что данная работа полезна для студентов и должна быть опубликована.

Зав. кафедрой общей физики ОмГУ,
к.ф.-м.н., доцент

В. Н. Сергеев

Подпись В. Н. Сергеева заверяю
Ученый секретарь ОмГУ им. Ф. М. Достоевского

Л. И. Ковалевская