

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ
ПО РАЗДЕЛАМ «ОПТИКА», «КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА» И
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»**

ОМСК 2022

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

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ
ПО РАЗДЕЛАМ «ОПТИКА», «КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА» И
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

Утверждено методическим советом университета

Омск 2022

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
П69

Учебно-методическое пособие для подготовки студентов к решению задач по разделам «Оптика», «Квантовая и атомная физика» и «Физика твердого тела» / И. А. Дроздова, Р. С. Курманов, В. Л. Литневский, Л. А. Литневский, Ю. М. Сосновский, Г. Б. Тодер, Н. А. Хмырова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2022. 40 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 обучающихся. В приложении приведен необходимый справочный материал.

Предназначено для студентов второго курса.

Библиогр.: 10 назв. Рис. 11. Прил. 1.

Рецензенты: доктор физ.-мат. наук, профессор Г. И. Косенко;
канд. физ.-мат. наук, доцент О. В. Гателюк.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Интерференция света	6
1.1. Оптическая разность хода лучей	6
1.2. Опыт Юнга	7
1.3. Интерференция света в тонких пленках	8
1.4. Кольца Ньютона	9
2. Дифракция и поляризация света	10
2.1. Дифракция Френеля	10
2.2. Дифракция Фраунгофера на щели.....	12
2.3. Дифракционная решетка	13
2.4. Угол Брюстера	14
2.5. Закон Малюса	15
3. Квантово-оптические явления	16
3.1. Внешний фотоэффект	16
3.2. Эффект Комптона	17
3.3. Тепловое излучение	18
4. Квантовая механика	20
4.1. Соотношения неопределенностей Гейзенберга	20
4.2. Частица в БГОППЯ	21
4.3. Одномерный квантовый гармонический осциллятор	22
5. Атомная и ядерная физика	23
5.1. Уровни энергии и спектр излучения атома водорода	23
5.2. Квантование момента импульса. Правило отбора	25
5.3. Дефект массы	26
5.4. Закон радиоактивного распада	26
5.5. Ядерные реакции	27
6. Свободные электроны в металле	28
6.1. Распределение Ферми – Дирака	28
6.2. Энергия Ферми	28
6.3. Средняя энергия электронов в металле	29
7. Тепловые свойства твердых тел	30
7.1. Тепловое расширение	30
7.2. Закон Дюлонга – Пти	30

7.3. Температура Дебая.....	31
7.4. Теплоемкость твердых тел	31
7.5. Теплопроводность твердых тел	32
8. Электропроводность металлов и полупроводников	33
8.1. Электропроводность металлов	33
8.2. Проводимость полупроводников	35
8.3. Внутренний фотоэффект	35
Библиографический список	36
Приложение. Справочные данные	37

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.

Для удобства использования в учебно-методическом пособии применена сквозная нумерация задач, в скобках указан уровень сложности задачи.

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Интерференцией света называется явление перераспределения энергии в световом потоке при наложении *конечного* числа (как минимум двух) *когерентных* волн. В результате интерференции наблюдается устойчивая *интерференционная картина* чередующихся максимумов и минимумов, обусловленная усилением или ослаблением интенсивности результирующей волны, бегущей в данном направлении.

1.1. Оптическая разность хода лучей

Результат интерференции когерентных волн (максимум или минимум) определяется *оптической разностью хода* лучей (волн):

$$\Delta = s_2 - s_1, \quad (1.1)$$

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

В точках, для которых выполняется условие: оптическая разность хода лучей равна нулю или целому числу длин волн (*условие максимума*)

$$\Delta = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (1.2)$$

наблюдаются интерференционные максимумы (m – порядок максимума).

В точках, для которых выполняется условие: оптическая разность хода лучей равна нечетному числу полуволен (*условие минимума*)

$$\Delta = \pm (2m - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (1.3)$$

наблюдаются интерференционные минимумы (m – порядок минимума).

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

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

1.2. Опыт Юнга

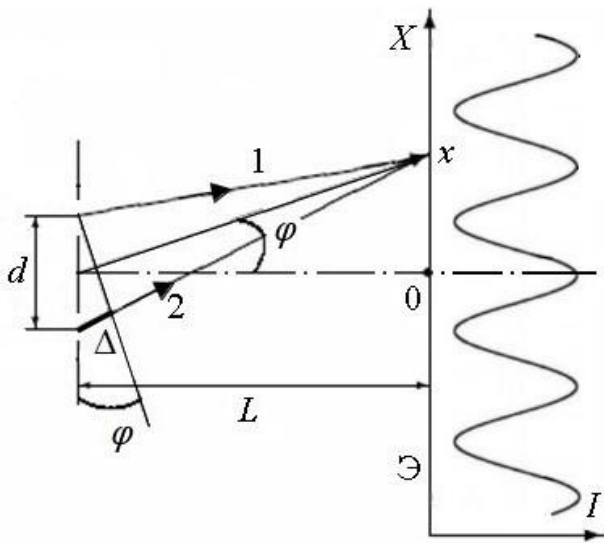


Рис. 1.1

В опыте Юнга (рис. 1.1) источник света с длиной волны λ освещает две узкие бесконечно длинные горизонтальные щели, перпендикулярные плоскости рисунка и расположенные на расстоянии d одна от другой. 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 оптической оси 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 (координаты) максимумов и минимумов на экране можно найти по формулам:

$$\begin{cases} x_{\max} = \pm \frac{L}{d} m \lambda, & m = 0, 1, 2, \dots; \\ x_{\min} = \pm \frac{L}{d} (2m - 1) \frac{\lambda}{2}, & m = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (1.4)$$

4. (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.

5. (2) 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?

6. (2) 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.

1.3. 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. 1.2) вычисляется по формуле:

$$\Delta = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} \pm \Delta_{\text{доп}}, \quad (1.5)$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ – дополнительная разность хода, связанная с возможной потерей полуволны при отражении от границы раздела сред: *при отражении луча света от оптически более плотной среды фаза этого луча меняется на 180° , что приводит к увеличению или уменьшению оптической длины пути s этого луча на $\lambda/2$.*

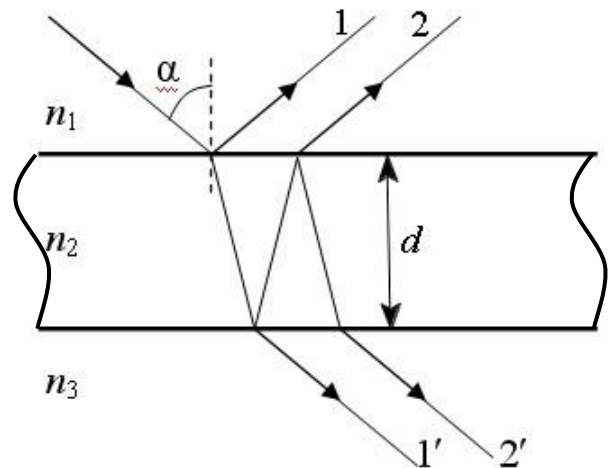


Рис. 1.2

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.

7. (1) Какой толщины пленка с показателем преломления 1,38 должна быть нанесена на поверхность линзы очков, показатель преломления стекла которых 1,57, чтобы максимально уменьшить отражение зеленого света (длина волны 500 нм) при нормальном падении лучей?

8. (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?

9. (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?

1.4. Кольца Ньютона

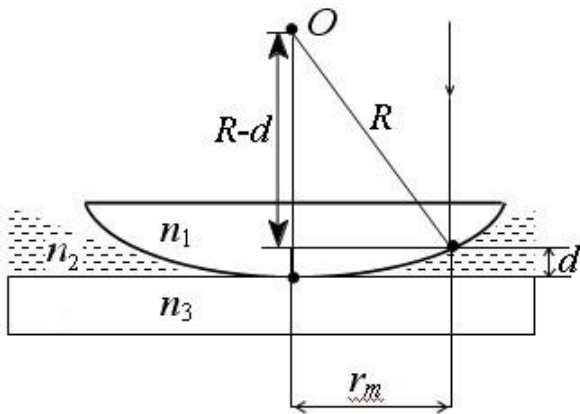


Рис. 1.3

Кольца Ньютона – интерференционные полосы в форме колец, расположенных concentrically вокруг точки касания плосковыпуклой стеклянной линзы и плоской стеклянной пластинки. Интерференция возникает в тонком зазоре между линзой и пластинкой, который играет роль тонкой пленки переменной толщины (рис. 1.3).

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. 1.3), то оптическая разность хода лучей, интерферирующих в отраженном и в проходящем свете, при толщине зазора $d \ll R$ вычисляется по формуле:

$$\Delta = (r_m^2/R)n_2 \pm \Delta_{\text{доп}}, \quad (1.6)$$

где r_m – радиус интерференционного кольца.

Дополнительная разность хода $\Delta_{\text{доп}}$, связанная с возможной потерей полу волны при отражении от границы раздела сред, находится по правилу, изложенному в подразд. 1.3.

10. (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 13 мм.

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

2. ДИФРАКЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Дифракцией света называется перераспределение энергии в световом потоке при наложении *бесконечного* числа *когерентных* волн. Часто дифракция возникает при прохождении света вблизи препятствий, приводит к отклонению света от прямолинейного направления распространения и к попаданию в область геометрической тени. Различают *дифракцию Френеля* (наблюдается в сходящихся лучах) и *дифракцию Фраунгофера* (в параллельных лучах).

2.1. Дифракция Френеля

Дифракцию Френеля обычно наблюдают на круглом отверстии или на диске.

Согласно принципу Гюйгенса – Френеля монохроматическое излучение точечного источника S (рис. 2.1) 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 , $b = OM$ – минимальное расстояние от поверхности до точки наблюдения.

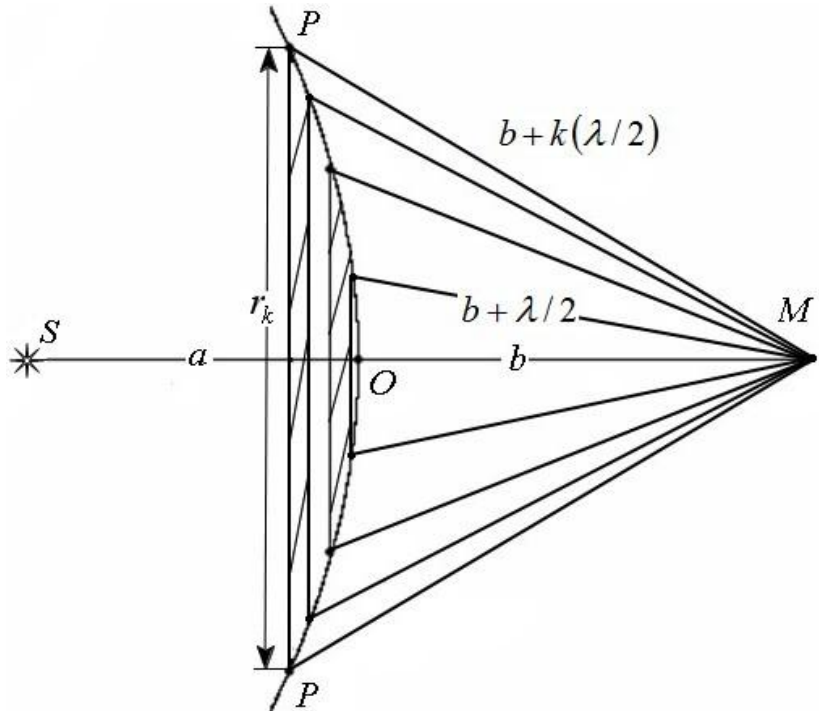


Рис. 2.1

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

$$r_k = \sqrt{abk\lambda/(a+b)} \quad (2.1)$$

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

$$r_k = \sqrt{bk\lambda} \quad (2.2)$$

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

Дифракционная картина наблюдается на экране в пределах геометрической проекции отверстия на экран, симметрична относительно точки М и состоит из концентрических чередующихся светлых и темных колец, число которых равно числу открытых отверстием зон Френеля.

Если отверстие открывает четное число зон Френеля, то амплитуда волны, приходящей в центр дифракционной картины в точку М,

$$A \approx A_1/2 - A_k/2, \quad (2.3)$$

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

Если отверстие открывает нечетное число зон, то амплитуда волны, приходящей в центр дифракционной картины в точку М,

$$A \approx A_1/2 + A_k/2, \quad (2.4)$$

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

Если на пути сферической волны поставить непрозрачную преграду в виде небольшого круглого диска, то в центре геометрической тени диска на экране не будет всегда наблюдаться светлая точка (дифракционный максимум).

12. (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.

13. (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?

14. (3) На расстоянии 6,0 м от точечного монохроматического источника света с длиной волны 600 нм находится экран. Посередине 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?

2.2. Дифракция Фраунгофера на щели

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. 2.2). Параллельные лучи, испускаемые каждым элементом щели, собирает в своей фокальной плоскости линза. (Она не дает дополнительной разности хода, поэтому не изображена на рис. 2.2.) В фокальной плоскости линзы на расстоянии L от щели параллельно полуплоскостям расположен экран Э. В результате дифракции на экране наблюдается дифракционная картина в виде 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

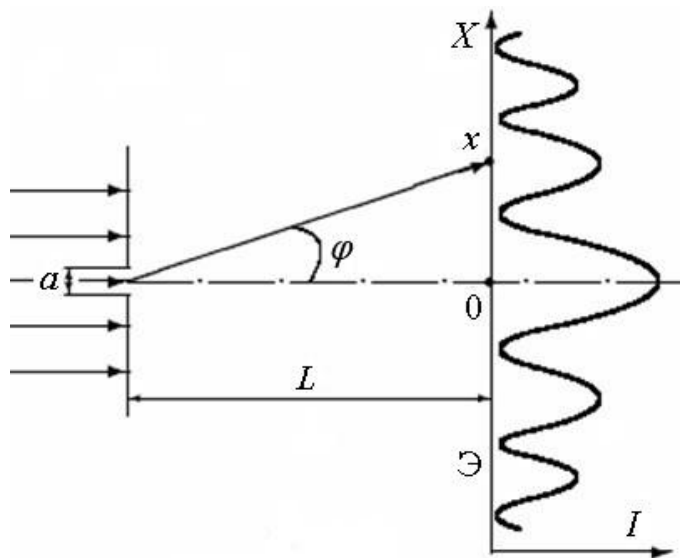


Рис. 2.2

$$\Delta = a \sin \varphi_m \quad (2.5)$$

определяет число зон Френеля, укладывающихся в щели, видимых под углом φ .

Точки минимума интенсивности дифракционной картины на экране определяются условием, соответствующим четному числу открытых зон Френеля:

$$a \sin \varphi_m = \pm 2m(\lambda / 2) \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (2.6)$$

где m – порядок минимума.

Точки максимума определяются условием, соответствующим нечетному числу открытых зон Френеля:

$$a \sin \varphi_m = \pm (2m + 1)(\lambda / 2) \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (2.7)$$

где m – порядок максимума (порядок дифракции).

Нулевой порядок дифракции отвечает центральному максимуму, который наблюдается при $\varphi_0 = 0$ и является по сути изображением щели на экране. Таким образом, при дифракции Фраунгофера дифракционная картина наблюдается за пределами геометрической проекции щели на экран.

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

16. (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.

17. (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) $25,8'$?

2.3. Дифракционная решетка

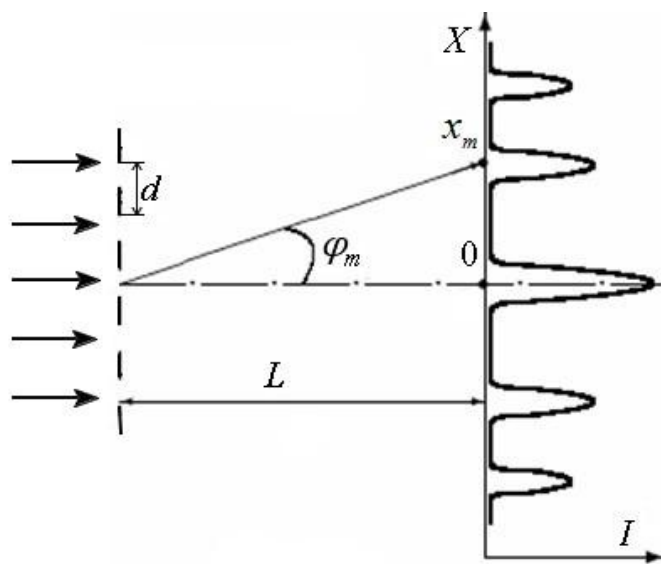


Рис. 2.3

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. 2.3); x_m – координата точки наблюдения интерференции на экране Э; $L \gg d$ (L – расстояние от решетки до экрана).

Положение главных дифракционных максимумов на экране можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} d \sin \varphi_m = \pm m\lambda, & m = 0, 1, 2, \dots; \\ \operatorname{tg} \varphi_m = \frac{x_m}{L}, \end{cases} \quad (2.8)$$

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).

18. (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.

19. (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.

2.4. Угол Брюстера

Отражение света, падающего на границу раздела сред под углом Брюстера, является одним из способов получения поляризованного света.

При падении света под углом Брюстера α_B справедлив закон: отраженный от диэлектрика свет полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (рис. 2.4):

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_2 / n_1. \quad (2.9)$$

Кроме того, отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. На рис. 2.4 стрелками на луче указано направление колебаний вектора напряженности электрического поля \vec{E} , если они происходят в плоскости рисунка, и точками, если перпендикулярны ей.

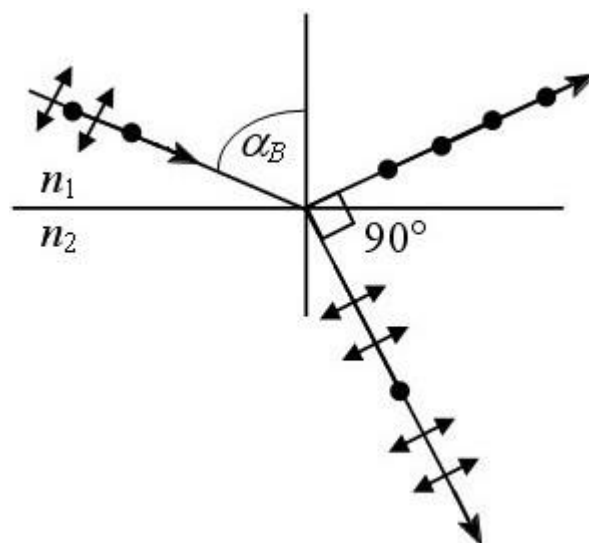


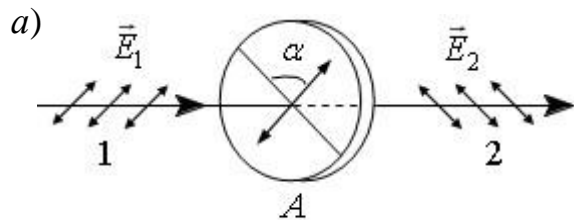
Рис. 2.4

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

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

2.5. Закон Малюса

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.



Если плоскость колебаний падающего на анализатор A линейно поляризованного света с интенсивностью I_1 образует угол α с плоскостью пропускания анализатора (луч 1 на рис. 2.5), то интенсивность прошедшей волны (луч 2) выражается законом Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha. \quad (2.10)$$

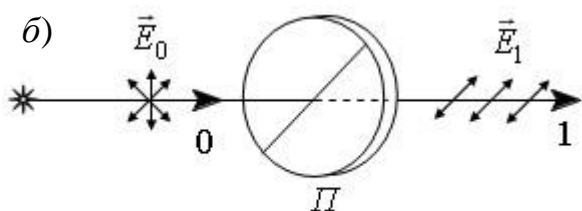


Рис. 2.5

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

$$I_2 = (1 - k_A) I_1 \cos^2 \alpha. \quad (2.11)$$

Если падающий на поляризатор с интенсивностью I_0 свет неполяризован (луч 0 на рис. 2.5), то интенсивность света, прошедшего через поляризатор (луч 1),

$$I_1 = (1 - k_P) I_0 / 2. \quad (2.12)$$

22. (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.

23. (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.

24. (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.

3. КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

К середине XIX в. были хорошо изучены оптические (волновые) свойства излучения: интерференция, дифракция и др. 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 (позже названными фотонами), энергия и импульс которых связаны с их волновыми характеристиками – частотой ν и длиной волны λ :

$$W_{\phi} = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}; \quad (3.1 \text{ а})$$

$$p_{\phi} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k. \quad (3.1 \text{ б})$$

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

Гипотеза М. Планка позволила объяснить так называемые квантово-оптические явления (фотоэффект, эффект Комптона, тепловое излучение и др.), а в конечном счете оказалась «первым камнем» при построении новой физической теории – квантовой физики.

3.1. Внешний фотоэффект

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

$$W_{\phi} = A_{\text{вых}} + W_{k \text{ max}}, \quad (3.2)$$

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:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}. \quad (3.3)$$

Если на фотоэлемент подать обратное напряжение, то при некотором его

значении U_3 (запирающее или задерживающее напряжение) фототок прекратится. Значение этого напряжения выражается из формулы работы задерживающего электрического поля, которая идет на изменение кинетической энергии электрона:

$$A = q_e U_3 = -\frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (3.4)$$

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

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

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

3.2. Эффект Комптона

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:

$$\begin{cases} W_{\phi} = W'_{\phi} + W_{ke}; \\ \vec{p}_{\phi} = \vec{p}'_{\phi} + \vec{p}_e. \end{cases} \quad (3.5)$$

Решая систему уравнений (3.5), 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:

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \varphi), \quad (3.6)$$

где $\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \text{ пм}$ – комптоновская длина волны электрона.

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

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

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

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

3.3. Тепловое излучение

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

$$R_T = \frac{dW}{dSdt}. \quad (3.7)$$

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

$$\varepsilon_T(\omega) = \frac{dR_T}{d\omega}. \quad (3.8)$$

Поглощательной способностью (коэффициентом поглощения) $a_T(\omega)$ 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 темпера-

туры – функцией Кирхгофа:

$$\frac{\varepsilon_{\tau}(\omega, T)}{a_{\tau}(\omega, T)} = f_{\tau}(\omega, T). \quad (3.9)$$

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.

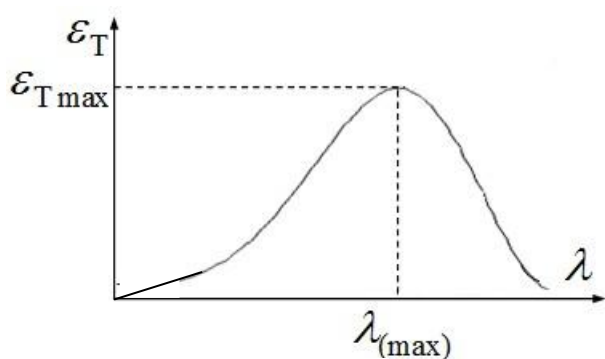


Рис. 3.1

Из анализа экспериментальных данных для АЧТ были получены:

закон Стефана – Больцмана –

$$R_{\tau} = \sigma T^4, \quad (3.10)$$

закон смещения Вина (рис. 3.1) –

$$\lambda_{(\max)} T = b, \quad (3.11)$$

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

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. 3.1).

32. (1) К вечеру жаркого солнечного дня закопченная стена старинного здания прогрелась до 30°C . Сколько энергии за 1 с излучает каждый квадратный метр этой стены вскоре после захода Солнца, считая закопченную стену АЧТ?

33. (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?

34. (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 равна 20°C . Считать, что тепло теряется только вследствие излучения.

4. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

4.1. Соотношения неопределенностей Гейзенберга

В 1924 г. Луи де Бройль предложил сопоставить движению частицы волновой процесс (в этом суть *гипотезы де Бройля*), длина волны которого определяется импульсом частицы p и вычисляется по формуле

$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \quad (4.1)$$

Соотношение неопределенностей Гейзенберга, записанное для координаты и проекции импульса,

$$\Delta x \Delta p_x \geq h \quad (4.2)$$

означает, что у микрочастицы не могут быть измерены одновременно точное значение координаты частицы и проекция ее импульса на эту же ось координат. По сути, соотношение (4.2) определяет также минимально возможное значение проекции импульса частицы, движение которой ограничено интервалом Δx .

Соотношение неопределенностей Гейзенберга можно записать также для энергии и времени:

$$\Delta W \Delta t \geq h. \quad (4.3)$$

Соотношение (4.3) связывает время жизни микрочастицы на энергетическом уровне и ширину (неопределенность, погрешность энергии) уровня.

35. (1) Протон имеет дебройлевскую длину волны 12 пм. Найти импульс и кинетическую энергию (в электрон-вольтах) этого протона.

36. (2) Вычислить дебройлевскую длину волны электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 990 В.

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

38. (1) Размер атома имеет порядок 0,1 нм. Оценить наименьшую скорость, с которой может двигаться электрон в атоме.

39. (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.

4.2. Частица в БГОППЯ

Поведение квантовых микрочастиц описывается уравнением Шрёдингера, решением которого является волновая функция $\Psi(x, y, z, t)$, не зависящую от времени часть которой $\psi(x, y, z)$ часто называют амплитудой вероятности.

Для частицы массой m , находящейся в *бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме* (БГОППЯ) с нулевым дном шириной a , энергия принимает дискретные значения:

$$W_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \quad (4.4)$$

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 Шрёдингера для частицы в БГОППЯ и удовлетворяющие граничным условиям и условию нормировки, имеют вид:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi n}{a} x\right). \quad (4.5)$$

40. (2) Вычислить разность энергий четвертого и шестого *возбужденных* уровней энергии электрона при движении его в БГОППЯ с нулевым дном шириной 0,12 нм. Ответ выразить в электрон-вольтах.

41. (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.

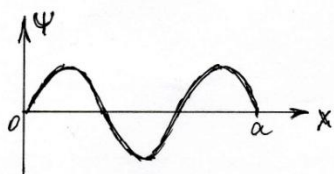


Рис. 4.1

42. (2) На рис. 4.1 изображена волновая функция электрона, находящегося в БГОППЯ шириной a . На каком энергетическом уровне находится электрон? С какой вероятностью электрон можно обнаружить в интервале $(a/2; 5a/6)$?

43. (3) С какой вероятностью можно обнаружить электрон, находящийся на втором энергетическом уровне, в средней третьей части БГОППЯ?

4.3. Одномерный квантовый гармонический осциллятор

Квантовый гармонический осциллятор – микрочастица, находящаяся в параболической потенциальной яме, квантовый аналог классического осциллятора – грузика, закрепленного на пружине.

В отличие от классической частицы, которая не может покинуть пределы потенциальной ямы, квантовая частица может обнаруживаться за пределами ямы. Наличие граничных условий приводит к тому, что спектр разрешенных энергетических состояний становится дискретным (как и в БГОППЯ):

$$W_n = \hbar\omega_0\left(n + \frac{1}{2}\right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (4.6)$$

где ω_0 – циклическая частота собственных колебаний осциллятора.

Энергетический спектр вида (35) называется эквидистантным – любые два соседних уровня энергии находятся на одинаковом «расстоянии» (энергетическом!) друг от друга. Кроме того, квантовый гармонический осциллятор не может иметь энергию меньше $W_0 = \hbar\omega_0/2$ – так называемую энергию *нулевых колебаний*.

44. (1) Вычислить наименьшее возможное значение энергии квантового гармонического осциллятора, собственная циклическая частота колебаний которого равна 25 пс^{-1} .

45. (2) Ион железа в узле кристаллической решетки – пример гармонического осциллятора. Найти «расстояние» между соседними уровнями энергии такого осциллятора, если частота его колебаний равна приблизительно 10^{15} с^{-1} .

46. (2) Вычислить энергию первых трех уровней для частицы массой 96 нг , которая может колебаться на «пружинке» жесткостью 12 мкН/м . Можно ли обнаружить дискретность энергетического спектра этой частицы, если энергия теплового движения равна $0,022 \text{ эВ}$?

47. (2) Оценить количество состояний гармонического осциллятора в интервале энергии от $1,00$ до $1,01 \text{ нДж}$. Жесткость осциллятора равна $3,2 \text{ мкН/м}$, масса – $9,6 \text{ нг}$.

48. (2) Представим два «осциллятора» в виде слона и мышки, каждый из которых подвешен на пружинке, которая под их собственным весом растягивается на 9 см . Сколько уровней энергии «слонового» осциллятора уложится ниже первого возбужденного уровня энергии «мышьиного»?

5. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Простейшей реальной 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.

5.1. Уровни энергии и спектр излучения атома водорода

Собственные значения энергии атома водорода (водородоподобного атома) определяются его *главным квантовым числом* n :

$$W_n = -\frac{W_i}{n^2}, \text{ где } n = 1, 2, \dots, \infty. \quad (5.1)$$

Величина $W_i = 13,6 \cdot Z^2$ эВ называется *энергией ионизации*, где Z – порядковый номер элемента в таблице Д. И. Менделеева.

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 .

$$W_{\text{доп}} = W_m - W_1. \quad (5.2)$$

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 (рис. 5.1), длину волны которого можно определить по формуле

(второй постулат Бора):

$$W_{\phi} = \frac{hc}{\lambda_{mn}} = W_m - W_n, \quad (5.3)$$

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 вычисляют по формуле (5.1)).

Энергетический спектр атома водорода представлен на рис. 5.1.

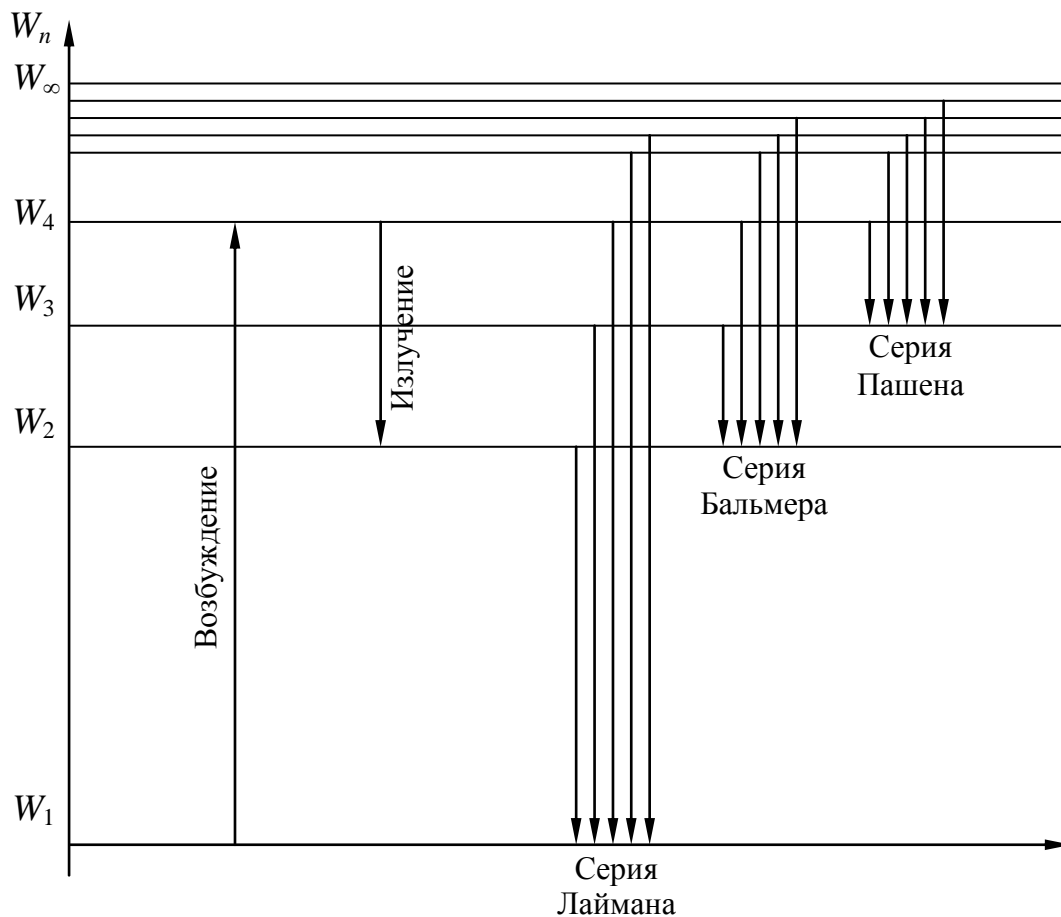


Рис. 5.1

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

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

51. (2) В каких пределах должны лежать энергии электронов, чтобы при возбуждении ими атомов водорода спектр содержал шесть спектральных линий?

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

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

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

55. (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?

5.2. Квантование момента импульса. Правило отбора

В атоме водорода принимает дискретные значения не только энергия атома, но и *модуль момента импульса* электрона

$$L_\ell = \hbar \sqrt{\ell(\ell+1)} \quad (\ell = 0, 1, 2, \dots, n-1), \quad (5.4)$$

значения которого определяются *орбитальным квантовым числом* ℓ , а также его проекция на выделенную ось (например, на направление магнитного поля)

$$L_{\ell_z} = m_{\ell_z} \hbar \quad (m_{\ell_z} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell), \quad (5.5)$$

значения которой определяются *магнитным квантовым числом* m_{ℓ_z} .

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 только на единицу ($\Delta \ell = \pm 1$).

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

57. (3) Основываясь на результатах задачи 56, пояснить, какие переходы электронов из одного состояния в другое запрещены правилом отбора.

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

5.3. Дефект массы

Символически любое ядро обозначают в виде ${}_Z^AX$, где Z – зарядовое число ядра (количество протонов в ядре, порядковый номер атома в таблице Д. И. Менделеева); A – массовое число ядра (масса ядра в атомных единицах массы). Количество нейтронов в ядре можно вычислить по уравнению: $N = A - Z$. При этом масса ядра $M_{\text{я}}$ оказывается меньше суммарной массы протонов m_p и нейтронов m_n , входящих в состав этого ядра. Существует дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}, \quad (5.6)$$

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

$$\Delta W_{\text{св}} = c^2 \Delta m = c^2 (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) - \quad (5.7)$$

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

59. (1) Вычислить дефект массы Δm и энергию связи ядра ${}_{5}^{11}\text{B}$ (в МэВ).

60. (1) Определить удельную энергию связи ядра ${}_{3}^7\text{Li}$ (в МэВ/нуклон).

5.4. Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада ядер записывается так:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \quad (5.8)$$

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 (50 %) ядер).

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

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

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

5.5. Ядерные реакции

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:

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4; \quad A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \quad (5.10)$$

В результате ядерной реакции выделяется (если $Q > 0$) энергия

$$Q = c^2 [(M_{\text{я1}} + M_{\text{я2}}) - (M_{\text{я3}} + M_{\text{я4}})]. \quad (5.11)$$

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

65. (2) В результате термоядерного синтеза изотопа водорода трития ${}^3_1\text{H}$ и изотопа водорода дейтерия ${}^2_1\text{H}$ образуется гелий ${}^4_2\text{He}$ и неизвестная частица. Записать ядерную реакцию и определить неизвестную частицу.

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

67. (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 неизвестный химический элемент.

68. (3) Вычислить энергию, выделяющуюся при ядерной реакции синтеза 1 г гелия: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$. Какую массу каменного угля, удельная теплота сгорания которого 27 МДж/кг, нужно сжечь, чтобы выделилась такое же количество энергии?

6. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В МЕТАЛЛЕ

6.1. Распределение Ферми – Дирака

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

$$\langle N_F \rangle = \left[\exp\left(\frac{W - W_F}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (6.1)$$

позволяющим вычислить среднее число электронов в любом квантовом состоянии или вероятность того, что данное квантовое состояние может быть занято электроном. В формуле (6.1) W – энергия электрона; W_F – энергия Ферми; k_B – постоянная Больцмана; T – температура тела.

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

70. (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?

71. (3) При какой температуре вероятность заполнения энергетического уровня 11 эВ в алюминии будет равна 60 %?

6.2. 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:

$$W_F = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3}, \quad (6.2)$$

где $n_e = zn$ – концентрация валентных электронов;

z – валентность атомов;

$n = \rho N_A / M$ – концентрация атомов.

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

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

6.3. Средняя энергия электронов в металле

Плотность энергетических уровней в кристалле объемом V определяется формулой

$$g(W) = \frac{4\pi V}{h^3} (2m)^{3/2} W^{1/2} \quad (6.3)$$

и позволяет вычислить количество уровней, приходящихся на единичный интервал энергий. Здесь m – масса электрона.

Средняя энергия электронов в кристалле при температуре 0 К

$$\langle W \rangle = \frac{3}{5} W_F. \quad (6.4)$$

Значение средней энергии электронов очень слабо зависит от температуры, поэтому формулу (6.4) можно применять для расчета средней энергии электронов в металлах также при комнатной и более высокой температуре без потери необходимой при решении задач точности.

Функция распределения электронов в металлах по энергиям

$$f(W) = \langle N_F \rangle g(W). \quad (6.5)$$

Условие нормировки для этой функции распределения имеет вид:

$$\int_0^\infty \langle N_F \rangle g(W) dW = N. \quad (6.6)$$

Необходимо обратить внимание на то, что функция распределения (6.5) нормирована не на единицу, а на полное число частиц (электронов проводимости), находящихся в кристалле.

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

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

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

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

78. (3) Используя функцию распределения электронов в металлах по энергиям, вывести формулу средней энергии электронов (6.4).

7. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

7.1. Тепловое расширение

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

$$\Delta L = aL\Delta T, \quad (7.1)$$

где a – коэффициент линейного теплового расширения, который показывает *относительное* удлинение тела при его нагревании на 1 К.

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

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

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

7.2. Закон Дюлонга – Пти

В рамках классических представлений был получен закон Дюлонга – Пти, который утверждает: *молярная теплоемкость простых твердых тел ни от чего не зависит и является постоянной величиной, равной $c_v = 3R$* , где R – универсальная газовая постоянная. Закон Дюлонга – Пти хорошо выполняется при температуре выше характеристической температуры Дебая. При более низкой температуре теплоемкость тел уменьшается, что не может объяснить классическая физика.

82. (2) Вычислить количество теплоты, которое необходимо сообщить золотому слитку массой 20 г для его нагревания на 15 °С, если начальная температура была комнатной, а температура Дебая для золота равна 170 К.

83. (2) На нагревание металлического предмета массой 100 г от 20 до 50 °С затрачено 694 Дж тепла. Определить, из какого металла изготовлен предмет, если указанный интервал температур выше характеристической температуры Дебая.

7.3. Температура Дебая

Температура вещества, начиная с которой становятся несущественными квантовые эффекты, называется *температурой Дебая*. Она определяется максимальной энергией фонона $\hbar\omega_{\max} = k_B T_D$ и может быть вычислена по формуле

$$T_D = \frac{\hbar\omega_{\max}}{k_B} = \frac{\hbar}{k_B} \left(\frac{1}{v_{\parallel 3B}^3} + \frac{2}{v_{\perp 3B}^3} \right)^{-1/3} (18\pi^2 n)^{1/3}, \quad (7.2)$$

где \hbar – постоянная Планка, k_B – постоянная Больцмана, ω_{\max} – максимальная циклическая частота фононов, n – концентрация атомов твердого тела;

$v_{\parallel 3B}, v_{\perp 3B}$ – скорости распространения продольной и поперечной звуковых волн в данном теле соответственно.

84. (1) Какова максимальная энергия фононов в кристалле свинца, если его характеристическая температура 88 К?

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

86. (2) Вычислить температуру Дебая для алюминия, если скорости продольных и поперечных звуковых волн в алюминии соответственно равны 6400 и 3130 м/с. Сравнить полученный результат с табличным значением.

7.4. Теплоемкость твердых тел

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, Дебай смог получить выражение для молярной теплоемкости твердых тел, которая хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

Для предельных случаев получается:

1) при $T \gg T_D$ молярная теплоемкость $c_v = 3R$, что соответствует классической теории теплоемкости (закону Дюлонга – Пти);

2) при низких температурах $T \ll T_D$

$$c_v = \frac{12}{5} \pi^4 R \left(\frac{T}{T_D} \right)^3, \quad (7.3)$$

что соответствует эксперименту.

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

$$C_V \text{ металла} = C_V \text{ реш} + C_{Ve}, \quad (7.4)$$

которая вычисляется по формуле

$$c_{Ve} = \frac{\pi^2}{2} zR \frac{k_B T}{W_F}. \quad (7.5)$$

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

87. (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 равна 339 К.

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

7.5. Теплопроводность твердых тел

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*:

$$\delta Q = -\kappa \frac{dT}{dx} dS dt, \quad (7.6)$$

где κ – коэффициент теплопроводности.

89. (2) Стальной стержень длиной 30 см и диаметром 17 мм нагревается с одного конца до 300 °С, а другой конец упирается в тающий лед. Предполагая, что передача тепла происходит исключительно вдоль стержня (без потерь через стенки), подсчитать массу льда, растаявшего за 10 минут.

90. (2) Медный кофейник нагревается на плите. Вода, доведенная до кипения, каждую минуту выделяет 2,6 г пара. Толщина дна кофейника – 3,2 мм, диаметр дна – 10 см. Определить разность температур между внутренней и наружной поверхностями дна кофейника, полагая, что все дно нагревается равномерно.

8. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

8.1. Электропроводность металлов

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 удельной проводимости металлического проводника:

$$\sigma = \frac{q^2 n_e}{m} \cdot \frac{\langle \ell \rangle}{\langle v \rangle}, \quad (8.1)$$

где q , m – заряд и масса электрона соответственно;

n_e – концентрация электронов;

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

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

В квантовой физике для удельной проводимости металла было получено выражение:

$$\sigma = \frac{q^2 n_e \langle L \rangle}{m^* v_F}, \quad (8.2)$$

где m^* , v_F – эффективная масса и скорость Ферми 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

$$\langle L \rangle = \langle \ell \rangle \cdot Z, \quad (8.3)$$

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 (8.1), но величины, входящие в формулы (8.1) и (8.2), 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 ростом температуры концентрация фононов $\sim T$ и $R \sim T$, что хорошо согласуется с экспериментом:

$$R = R_0(1 + \alpha t^\circ), \quad (8.4)$$

где R_0 – сопротивление проводника при температуре $t^\circ = 0$ °C;

α – температурный коэффициент сопротивления.

В области низких температур $T \ll T_D$ с ростом 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 $R_0 = \text{const}$.

91. (1) Удельная проводимость у металла равна 10 МСм/м. Оценить по классической теории среднюю длину свободного пробега электронов в металле, если концентрация свободных электронов равна $2,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Среднюю скорость хаотического движения электронов принять равной 1,6 Мм/с.

92. (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.

93. (2) Оценить среднее время между последовательными соударениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки меди при комнатной температуре, если удельное электрическое сопротивление 17 нОм·м. Считать, что число электронов проводимости равно числу атомов меди.

8.2. Проводимость полупроводников

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

$$n_e \sim \langle N_F \rangle = \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right). \quad (8.5)$$

Тогда можно записать для удельной проводимости собственного полупроводника:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right). \quad (8.6)$$

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

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2k_B T}\right). \quad (8.7)$$

94. (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?

95. (2) Германиевый образец нагревают от 0 до 17 °С. Определить, во сколько раз увеличивается его удельная проводимость.

96. (2) При нагревании некоторого собственного полупроводникового кристалла от 0 до 10 °С его удельная проводимость увеличивается в 2,3 раза. Определить ширину запрещенной зоны кристалла и материал полупроводника.

8.3. Внутренний фотоэффект

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 (частоты, длины волны соответствующего

излучения) называется красной границей внутреннего фотоэффекта:

$$\nu_{\text{гр}} = \frac{\Delta W}{h}; \quad \lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{\Delta W}. \quad (8.8)$$

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

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

Библиографический список

1. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва, 2006. – 560 с. – Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва, 2003. – 607 с. – Текст : непосредственный.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – Москва, 2007. – Т. 3. – 320 с. – Текст : непосредственный.
4. Оселедчик, Ю. С. Физика. Модульный курс для технических вузов / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. – Москва, 2012. – 525 с. – Текст : непосредственный.
5. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела / Г. И. Епифанов. – Санкт-Петербург, 2011. – 288 с. – Текст : непосредственный.
6. Ландау, Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва, 2002. – Ч. 1. – 616 с. – Текст : непосредственный.
7. Бушманов, Б. Н. Физика твердого тела / Б. Н. Бушманов, Ю. А. Хромов. – Москва, 1971. – 224 с. – Текст : непосредственный.
8. Чертов, А. Г. Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – Москва, 2001. – 640 с. – Текст : непосредственный.
9. Физика: Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – Москва, 2003. – 944 с. – Текст : непосредственный.
10. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – Москва, 1991. – 1232 с. – Текст : непосредственный.

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	$2,43 \cdot 10^{-12}$
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}

Т а б л и ц а 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		

Т а б л и ц а 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

Т а б л и ц а 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

Т а б л и ц а 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

Т а б л и ц а П.8

Некоторые внесистемные единицы измерения физических величин

Название	Значение	Название	Значение
1 электрон-вольт (эВ)	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	1 литр (л)	10^{-3} м ³
1 ат. ед. массы (а. е. м.)	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг	1 килокалория (ккал)	4186,8 Дж

Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева

периоды	группы элементов																										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII																			
I	H 1 1,00797 1s ¹ Водород								Символ элемента	Порядковый номер																	
II	Li 3 6,939 2s ² 2s ¹ Литий	Be 4 9,0122 2s ² 2s ² Бериллий			N 7 14,0067 2s ² 2p ³ Азот	O 8 15,9994 2s ² 2p ⁴ Кислород	F 9 18,9984 2s ² 2p ⁵ Фтор	(H)	Электронная конфигурация внешнего слоя	19 39,102 4s ¹ Калий																	
III	Na 11 22,9898 3s ¹ Натрий	Mg 12 24,312 3s ² 3s ² Магний	Al 13 26,9815 3s ² 3p ¹ Алюминий	Si 14 28,086 3s ² 3p ² Кремний	P 15 30,9738 3s ² 3p ³ Фосфор	S 16 32,064 3s ² 3p ⁴ Сера	Cl 17 35,453 3s ² 3p ⁵ Хлор		Относительная атомная масса (а.е.м.)	18 39,948 3s ² 3p ⁶ Аргон																	
IV	K 19 39,102 4s ¹ Калий	Ca 20 40,08 4s ² Кальций	Sc 21 44,956 3d ¹ 4s ² Скандий	Ti 22 47,90 3d ² 4s ² Титан	V 23 50,942 3d ³ 4s ² Ванадий	Cr 24 51,996 3d ⁵ 4s ¹ Хром	Mn 25 54,938 3d ⁵ 4s ² Марганец	Fe 26 55,847 3d ⁶ 4s ² Железо	Co 27 58,932 3d ⁷ 4s ² Кобальт	Ni 28 58,71 3d ⁸ 4s ² Никель																	
5	29 63,546 3d ¹⁰ 4s ¹ Медь	30 65,37 3d ¹⁰ 4s ² Цинк	Zn 31 69,72 4s ² 4p ¹ Галлий	Ge 32 72,59 4s ² 4p ² Германий	As 33 74,9216 4s ² 4p ³ Мышьяк	Se 34 78,96 4s ² 4p ⁴ Селен	Br 35 79,904 4s ² 4p ⁵ Бром	Li металлы, образующие основные оксиды и основания	B неметаллы образующие амфотерные оксиды и гидроксиды	Kr 36 83,80 4s ² 4p ⁶ Криптон																	
6	Rb 37 85,47 5s ¹ Рубидий	Sr 38 87,62 5s ² Стронций	Y 39 88,905 4d ¹ 5s ² Иттрий	Zr 40 91,22 4d ² 5s ² Цирконий	Nb 41 92,906 4d ⁴ 5s ¹ Ниобий	Mo 42 95,94 4d ⁵ 5s ¹ Молибден	Tc 43 [99] 4d ⁵ 5s ² Технеций	Ru 44 101,07 4d ⁷ 5s ¹ Рутений	Rh 45 102,905 4d ⁸ 5s ¹ Родий	Pd 46 106,4 4d ¹⁰ 5s ⁰ Палладий																	
7	47 107,868 4d ¹⁰ 5s ¹ Серебро	48 112,40 4d ¹⁰ 5s ² Кадмий	In 49 114,82 5s ² 5p ¹ Индий	Sn 50 118,69 5s ² 5p ² Олово	Sb 51 121,75 5s ² 5p ³ Сурьма	Te 52 127,60 5s ² 5p ⁴ Теллур	I 53 126,9044 5s ² 5p ⁵ Йод	<div><div></div>s-элементы</div> <div><div></div>p-элементы</div> <div><div></div>d-элементы</div> <div><div></div>f-элементы</div>		Xe 54 131,30 5s ² 5p ⁶ Ксенон																	
8	Cs 55 132,905 6s ¹ Цезий	Ba 56 137,34 6s ² Барий	La* 57 138,91 5d ¹ 6s ² Лантан	Hf 72 178,49 4f ¹⁴ 5d ² 6s ² Гафний	Ta 73 180,948 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ² Тантал	W 74 183,85 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² Вольфрам	Re 75 186,2 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ² Рений	Os 76 190,2 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ² Осмий	Ir 77 192,2 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ² Иридий	Pt 78 195,09 5d ⁹ 6s ¹ Платина																	
9	79 196,967 5d ¹⁰ 6s ¹ Золото	80 200,59 5d ¹⁰ 6s ² Ртуть	Hg 81 204,37 6s ² 6p ¹ Таллий	Pb 82 207,19 6s ² 6p ² Свинец	Bi 83 208,980 6s ² 6p ³ Висмут	Po 84 [210] 6s ² 6p ⁴ Полоний	At 85 210 6s ² 6p ⁵ Астат		[293] - масса наиболее устойчивого изотопа 1 а.е.м.=1,66 × 10 ⁻²⁷ кг	Rn 86 [222] 6s ² 6p ⁶ Радон																	
10	Fr 87 [223] 7s ¹ Франций	Ra 88 [226] 7s ² Радий	Ac** 89 [227] 6d ¹ 7s ² Актиний	Rf 104 [261] 5f ¹⁴ 6d ² 7s ² Резерфордий	Db 105 [262] 5f ¹⁴ 6d ³ 7s ² Дубний	Sg 106 [263] 5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ² Сибургий	Bh 107 [262] 5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ² Борий	Hs 108 [265] 5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ² Хассий	Mt 109 [266] 5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ² Мейтнерий	Ds 110 [271] 5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ¹ Дармштадтий																	
11	111 [281] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ¹ Рентгений	Rg 112 [285] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² Коперниций	Nh 113 [286] 7s ² 7p ¹ Нихоний	Fl 114 [289] 7s ² 7p ² Флеровий	Mc 115 [289] 7s ² 7p ³ Московский	Lv 116 [293] 7s ² 7p ⁴ Ливерморий	Ts 117 [294] 7s ² 7p ⁵ Теннессин			Og 118 [294] 7s ² 7p ⁶ Оганесон																	
высшие оксиды																											
R ₂ O																											
RO																											
R ₂ O ₃																											
RO ₂																											
R ₂ O ₅																											
RO ₃																											
R ₂ O ₇																											
RO ₄																											
летучие водородные соединения																											
RH ₄																											
RH ₃																											
H ₂ R																											
HR																											
лантаноиды																											
58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
140,12	140,908	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	141,242	
Церий	Прозермий	Неодим	Прометий	Самарий	Европий	Гадолиний	Тербий	Диспрозий	Гольмий	Эрбий	Тулий	Иттербий	Лотетий	Лантан	Серебро	Золото	Ртуть	Таллий	Свинец	Висмут	Полоний	Астат	Радон	Франций	Радий	Актиний	
актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	актиноиды	

Учебное издание

ДРОЗДОВА Илга Анатольевна, КУРМАНОВ Рамиль Султангареевич,
ЛИТНЕВСКИЙ Владимир Леонидович, ЛИТНЕВСКИЙ Леонид Аркадьевич,
СОСНОВСКИЙ Юрий Михайлович, ТОДЕР Георгий Борисович,
ХМЫРОВА Наталья Анатольевна

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ
ПО РАЗДЕЛАМ «ОПТИКА», «КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА» И
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

Редактор Н. А. Майорова

Подписано в печать 03.11.2022. Формат $60 \times 84^{1/16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,8.
Тираж 30 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35