

И.И. Ташлыкова-Бушкевич

Физика

Часть 2

Оптика. Квантовая физика.
Строение и физические
свойства вещества



И.И. Ташлыкова-Бушкевич

Физика

*Утверждено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебника
для студентов учреждений
высшего образования
по техническим специальностям*

В двух частях

Часть 2

Оптика. Квантовая физика.
Строение и физические
свойства вещества

2-е издание, исправленное



Минск
«Вышэйшая школа»

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

T25

Рецензенты: кафедра технической физики учреждения образования «Белорусский национальный технический университет» (доцент кафедры кандидат физико-математических наук *В.А. Мартинович*); доцент кафедры физики учреждения образования «Белорусский национальный технический университет» кандидат физико-математических наук *Н.П. Юркевич*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Ташлыкова-Бушкевич, И. И.

T25 Физика : учебник. В 2 ч. Ч. 2. Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества / И. И. Ташлыкова-Бушкевич. — 2-е изд., испр. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 232 с. : ил.
ISBN 978-985-06-2506-9.

В части 2 рассмотрены оптика, квантовая физика, строение и физические свойства вещества.

Содержание учебника соответствует современному уровню развития физики. Материал изложен в максимально доступной и наглядной форме.

В зависимости от тактических задач обучения учебник может быть использован для самостоятельной работы студентов, на аудиторных занятиях под руководством преподавателя, а также для заочной и дистанционной форм обучения.

Для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям.

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

ISBN 978-985-06-2506-9 (ч. 2)

ISBN 978-985-06-2507-6

© Ташлыкова-Бушкевич И. И., 2014

© Ташлыкова-Бушкевич И. И., 2014, с изменениями

© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время система высшего образования является динамично развивающейся сферой общества. В учебном процессе актуально объединение классических и современных методов обучения, использование как экспериментальной, так и демонстрационной базы. Лекционные занятия приобретают новый статус, являясь вспомогательным средством в контролируемой самостоятельной работе студентов.

В данном учебнике материал излагается в соответствии с программой курса физики для специальностей инженерно-технического профиля учреждений высшего образования. В части 2 рассмотрены оптика, квантовая физика, строение и физические свойства вещества в объеме, необходимом для ориентации в потоке научной и технической информации и использования знаний по физике в современной технике, в основе работы которой применяются как новые, так и классические физические идеи и принципы.

Отличительной особенностью настоящего учебника является подача теоретических знаний в сочетании с многочисленными примерами, что позволит студентам быстро овладеть основами курса общей физики на современном уровне. В качестве примеров в том числе использованы подлинные экспериментальные данные физических исследований последних десятилетий, включая результаты, полученные автором в области физики конденсированного состояния, физики водородного материаловедения и физики взаимодействия заряженных частиц с поверхностью кристаллов при изучении быстрозатвердевших фольг сплавов алюминия. Исследования выполнены автором в рамках проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ), Японского общества содействия развитию науки (JSPS), Международного фонда Матсумэ (MIF, Япония) и Международного центра теоретической физики им. Нобелевского лауреата Абдус Салама (ICTP, Италия).

Учебник адресован студентам, изучающим курс общей физики в течение одного, двух или трех семестров, и базируется на материале лекций, читаемых автором студентам Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Автор выражает признательность рецензентам книги.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть учебника состоит из разделов оптики, квантовой физики, а также строения и физических свойств вещества.

В разделе «Оптика» рассматриваются геометрическая и физическая оптика. В геометрической оптике вопрос о природе света не затрагивается, используются эмпирические законы распространения света. В физической оптике излагаются темы интерференции, дифракции и поляризации, рассматриваются вопросы, связанные с процессами испускания света, природой света и световых явлений.

Раздел «Квантовая физика» посвящен таким вопросам, как квантовая природа электромагнитного излучения, волновые свойства микрочастиц, операторы квантовой физики. Изучаются физические основы квантовой механики, даются основные законы, которые являются фундаментом наук о строении вещества. Материал включает описание и объяснение специфических явлений квантовой механики, не имеющих аналогов в классической механике.

Раздел «Строение и физические свойства вещества» включает пять тем: физика атомов, в том числе двухатомных молекул, физика твердого тела, физика ядра и физика элементарных частиц. Приводятся результаты современных экспериментальных исследований в области физики твердого тела. При изложении основ физики атомов рассматривается «полуклассическая» теория Бора. Понятия квантовой механики используются для объяснения строения электронных оболочек атомов, атомных и молекулярных спектров, а также строения и свойств атомных ядер. Кратко освещаются вопросы, связанные с периодической системой элементов Менделеева. Характеристическое рентгеновское излучение рассматривается на примере рентгеновских спектров. Тема физики двухатомных молекул включает в себя материал об энергетических уровнях двухатомной молекулы, а также о комбинационном рассеянии света. Физика твердого тела представлена как компактное, но вместе с тем достаточно полное изложение основ современной физики конденсированного состояния, в том числе рассматриваются тепловые свойства кристаллов, освещаются вопросы квантования энергии колебаний решетки, вводится понятие фононов. В физике ядра излагаются основные понятия, включающие описание ядерных сил, рассмотрение явления радиоактивности, что позволяет сделать краткий обзор возможностей использования ядерной энергии. В теме об элементарных частицах даются характеристики фундаментальных взаимодействий, системно анализируется основная часть известных на данный момент элементарных частиц. Рассматриваются общие вопросы теории элементарных частиц.

РАЗДЕЛ 4. ОПТИКА

ТЕМА 21. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

21.1. Предварительные сведения. Световая волна. Показатель преломления среды

Оптика — это раздел физики, который изучает природу света, световые явления и взаимодействие света с веществом.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, длины которых заключены в диапазоне с условными границами от единиц нанометров до десятых долей миллиметров (диапазон частот $\sim 3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{11}$ Гц). Поэтому оптика является частью общего учения об электромагнитном поле.

В зависимости от рассматриваемых явлений оптику делят на *геометрическую* (лучевую), *волновую* (физическую), *квантовую* (корпускулярную).

В данном разделе будет в основном изучаться оптический диапазон длин волн, который включает инфракрасное излучение, видимое излучение (обычно называемое светом) и ультрафиолетовое излучение.

Электромагнитная волна характеризуется векторами напряженности $\vec{E}$ и $\vec{H}$ электрического и магнитного полей волны. Поскольку именно действие электрического поля на вещество приводит к поглощению, излучению, поляризации и другим оптическим явлениям, то будем говорить о *световом векторе*, имея в виду вектор $\vec{E}$. Монохроматическая **световая волна**, распространяющаяся вдоль оси X со скоростью v , описывается уравнением, определенным выражением (20.5) (см. тему 20):

$$E = A \cos(\omega t - kx + \alpha), \quad (21.1)$$

где A — модуль амплитуды светового вектора ($A = |\vec{E}_m|$); ω — циклическая частота волны; $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ — волновое число; $(\omega t - kx + \alpha)$ — фаза волны.

В точке с координатой x начальной фазой колебаний будет величина $\varphi = -kx + \alpha$ (при $t = 0$ и $x = 0$ фаза волны равна α). Уравнение (21.1) определяет изменение во времени и пространстве проекции светового вектора $\vec{E}$, перпендикулярного направлению распространения волны (см. рис. 20.1).

Показателем преломления (абсолютным показателем преломления) среды называется величина n , равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме c к их фазовой скорости v в данной среде (см. формулу (20.3)):

$$n = c/v = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (21.2)$$

где ϵ и μ — соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Для большинства прозрачных веществ $\mu \approx 1$ и справедлива формула, связывающая оптические свойства вещества с его электрическими свойствами:

$$n = \sqrt{\epsilon}, \quad (21.3)$$

где ϵ зависит от частоты электромагнитной волны.

Этим объясняется **дисперсия** света, т.е. зависимость n (скорости распространения световой волны в среде v) от частоты ν (длины волны λ) света. Поэтому на практике показатель преломления среды зависит от цвета света. Действительно, как известно, световые волны различных частот воспринимаются человеком как различные цвета.

Показатель преломления n характеризует оптическую плотность среды. Среду с большим показателем преломления называют оптически более плотной, а среду с меньшим показателем преломления — оптически менее плотной.

Относительный показатель преломления второй среды относительно первой равен отношению абсолютных показателей преломления двух сред:

$$n_{21} = n_2/n_1.$$

В веществе с показателем преломления n длина волны света вычисляется как

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (21.4)$$

где λ_0 — длина световой волны в вакууме.

Световая волна характеризуется **интенсивностью** I . Поскольку интенсивность излучения определяется как модуль среднего по времени значения плотности потока энергии (см. формулу (20.14)), то согласно уравнению (21.1)

$$I \sim n E_m^2 = n A^2, \quad (21.5)$$

где n — показатель преломления среды, в которой распространяется волна.

Световой луч (или просто **луч**) — это линия, вдоль которой переносится световая энергия. Лучи ортогональны волновым поверхностям (см. подте-

му 8.1). Вектор Пойнтинга в изотропных средах направлен в каждой точке волновой поверхности по касательной к лучу.

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон криволинейными, например сферическими, поверхностями. В частном случае одна из поверхностей может быть плоской. Линза является *тонкой*, если ее толщина значительно меньше, чем радиусы кривизны обеих поверхностей. Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, есть *главная оптическая ось*.

Оптической призмой называется призма, изготовленная из материала, прозрачного для оптического излучения в некотором интервале его частот. Оптические призмы могут быть и не призмами в строго геометрическом смысле, например иметь усеченную вершину. Выделяют три класса оптических призм: отражательные, спектральные (преломляющие или дисперсионные), а также поляризационные.

21.2. Законы геометрической оптики. Оптическая длина пути.

Принцип Ферма. Таутохронизм

Еще до установления природы света были известны следующие **законы геометрической оптики** (вопрос о природе света не рассматривался).

1. Закон независимости световых лучей: эффект, производимый отдельным лучом, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные лучи или они устранены.

2. Закон прямолинейного распространения света: свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.

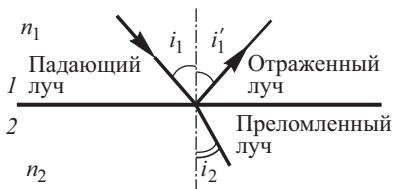


Рис. 21.1. Иллюстрация к законам преломления и отражения лучей

3. Закон отражения света: отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол отражения i'_1 равен углу падения i_1 (рис. 21.1): $i'_1 = i_1$.

4. Закон преломления света (закон Снелля, 1621): падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к поверхности раздела двух сред, проведенный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; при преломлении света на границе раздела двух изотропных сред с показателями преломления n_1 и n_2 выполняется условие

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

(21.6)

Полное внутреннее отражение — это отражение светового луча от границы раздела двух прозрачных сред в случае его падения из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду под углом $i_1 \geq i_{\text{пр}}$, для которого выполняется равенство

$$\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1 = n_{21}, \quad (21.6a)$$

где n_{21} — относительный показатель преломления (случай $n_1 > n_2$).

Наименьший угол падения $i_{\text{пр}}$, при котором весь падающий свет полностью отражается в среду I , называется *предельным углом* полного отражения.

Явление полного отражения используется в световодах и призмах полного отражения (например, в биноклях).

Оптической длиной пути L между точками A и B прозрачной среды называют расстояние, на которое свет (оптическое излучение) распространился бы в вакууме за то же время, за которое он проходит от A до B в среде. Так как скорость света в любой среде меньше его скорости в вакууме, то L всегда больше реально проходимого расстояния. В неоднородной среде

$$L = \int_A^B n ds, \quad (21.7)$$

где n — показатель преломления среды; ds — бесконечно малый элемент траектории луча.

В однородной среде, где геометрическая длина пути света равна s , оптическая длина пути будет определяться как

$$L = ns. \quad (21.7a)$$

Три последних закона геометрической оптики можно получить из **принципа Ферма** (ок. 1660): в любой среде свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время. В случае, когда это время является одинаковым для всех возможных путей, все пути света между двумя точками называются **таутохронными** (рис. 21.2).

Условию таутохронизма удовлетворяют, например, все пути лучей, проходящих через линзу и дающих изображение S' источника света S . Свет распространяется по путям неравной

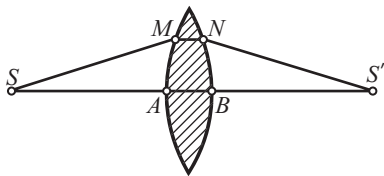


Рис. 21.2. Пример таутохронных путей света ($SMNS' > SABS'$)

геометрической длины за одно и то же время (рис. 21.2). Именно то, что испущенные из точки S лучи одновременно и через наименьшее возможное время собираются в точке S' , позволяет получить изображение источника S .

Оптическими системами называется совокупность оптических деталей (линз, призм, плоскопараллельных пластинок, зеркал и т.п.), скомбинированных для получения оптического изображения или для преобразования светового потока, идущего от источника света.

Различают следующие **типы оптических систем** в зависимости от положения предмета и его изображения: микроскоп (предмет расположен на конечном расстоянии, изображение — на бесконечности), телескоп (и предмет, и его изображение находятся в бесконечности), объектив (предмет расположен в бесконечности, а изображение — на конечном расстоянии), проекционная система (предмет и его изображение расположены на конечном расстоянии от оптической системы). Оптические системы находят применение в технологическом оборудовании для оптической локации, оптической связи и т.д.

Оптические микроскопы позволяют исследовать объекты, размеры которых меньше минимального разрешения глаза, равного 0,1 мм. Использование микроскопов дает возможность различать структуры с расстоянием между элементами до 0,2 мкм. В зависимости от решаемых задач микроскопы могут быть учебными, исследовательскими, универсальными и т.д. Например, как правило, металлографические исследования образцов металлов начинаются с помощью метода световой микроскопии (рис. 21.3). На представленной типичной микрофотографии сплава (рис. 21.3, *а*) видно, что поверхность фольг сплава алюминия с медью со-

а

б

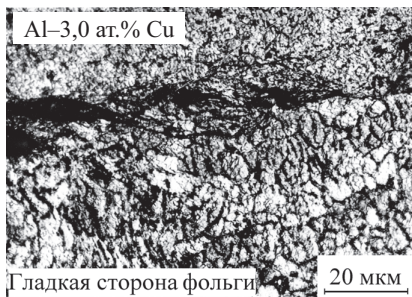
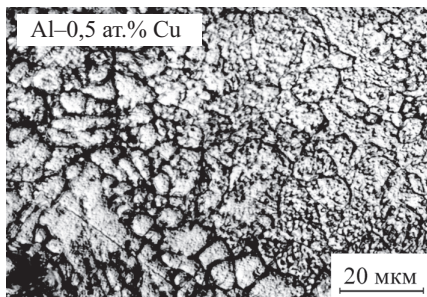


Рис. 21.3. Микрофотографии, полученные методом оптической микроскопии:

а — зеренная структура поверхности фольги сплава Al–0,5 ат.% Cu (Шепелевич и др., 1999); *б* — поперечное сечение по толщине фольги сплава Al–3,0 ат.% Cu (Шепелевич и др., 1999) (гладкая сторона — сторона фольги, контактирующая с подложкой при затвердевании)

держит области более мелких и более крупных зерен (см. подтему 30.1). Анализ зеренной структуры шлифа поперечного сечения толщины образцов показывает, что микроструктура сплавов системы алюминий – медь изменяется по толщине фольг (рис. 21.3, б).

ТЕМА 22. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

22.1. Когерентность и интерференция световых волн

В волновой оптике рассматриваются такие оптические явления, как интерференция, дифракция и поляризация, в которых проявляется волновая природа света. Волновая теория света основывается на **принципе Гюйгенса** (1678): каждая точка, до которой доходит волна, служит источником вторичных сферических волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.

Следовательно, если в некоторый момент времени известен фронт световой волны, то через промежуток времени Δt новое положение фронта волны определяется построением около каждой точки первоначального фронта – источника вторичной сферической волны – сферы радиуса $c \Delta t$ (здесь c – скорость света). Таким образом, принцип Гюйгенса объясняет распространение световых волн, описываемое законами геометрической оптики.

Когерентность – согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов.

Степень согласованности называют **степенью когерентности**: чем лучше согласованность, тем выше степень когерентности. Два колебательных или волновых процесса являются **некогерентными**, когда они не согласованы друг с другом. Монохроматические волны – неограниченные в пространстве волны одной фиксированной частоты и постоянной амплитуды – когерентны.

Интерференция света – это перераспределение энергии светового излучения в пространстве в результате сложения двух или нескольких когерентных световых волн, при котором в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. При этом в пространстве образуется устойчивая картина чередования областей максимумов и минимумов интенсивности света.

Пусть в некоторую точку пространства M приходят от разных источников две монохроматические световые волны с циклической частотой ω и с одинаковым направлением колебаний световых векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$. Согласно принципу суперпозиции образуется результирующая гармоническая волна

$$\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \vec{E}_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (22.1)$$

с амплитудой

$$E_{\text{рез}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \delta}, \quad (22.2)$$

где φ_1 и φ_2 — начальные фазы колебаний, зависящие от координат источников и точки наблюдения M ; разность фаз $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$.

В дальнейшем будем учитывать, что согласно формуле (21.5) интенсивность I световой волны пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора, т.е. $I \sim E^2$.

В случае *некогерентных волн* разность фаз δ изменяется во времени случайным образом. Поэтому среднее по времени значение $\langle \cos \delta \rangle = 0$ и интенсивность результирующего колебания в любой точке пространства M равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$I_{\text{рез}} = I_1 + I_2, \quad (22.3)$$

интерференция в этом случае отсутствует.

В случае *суперпозиции когерентных волн* разность фаз δ постоянна во времени и интенсивность результирующего колебания определяется как

$$I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (22.4)$$

При распространении когерентных волн в средах с различными показателями преломления разность оптических длин путей L_2 и L_1 , проходимых волнами, называется **оптической разностью хода**:

$$\Delta = L_2 - L_1 = s_2 n_2 - s_1 n_1,$$

где s_1 и s_2 — геометрические длины путей первой и второй волн, которые соответственно распространяются в средах с показателями преломления n_1 и n_2 . Можно показать, что разность фаз когерентных волн

$$\delta = 2\pi \left(\frac{s_2}{\lambda_2} - \frac{s_1}{\lambda_1} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (22.5)$$

где λ_0 — длина световой волны в вакууме; Δ — оптическая разность хода волн в точке наблюдения M .

При постоянной разности фаз возможны два крайних случая: если $\cos \delta = +1$, то результирующая интенсивность $I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$; если

$\cos \delta = -1$, то результирующая интенсивность $I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$. Таким образом, при сложении когерентных волн результирующая интенсивность в одних точках пространства будет больше суммы интенсивностей взаимодействующих волн (интерференционные максимумы), в других — меньше суммы интенсивностей взаимодействующих волн (интерференционные минимумы).

Условие интерференционного максимума: если оптическая разность хода волн Δ равна четному числу полуволен в вакууме (целому числу длин волн), то колебания, возбуждаемые обеими волнами в точке M , будут происходить в фазе:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0 \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (22.6)$$

где m — целое число (порядок интерференции).

В точках пространства, в которых наблюдаются интерференционные максимумы, разность фаз когерентных волн равна четному числу π :

$$\delta = 2m\pi. \quad (22.6a)$$

Условие интерференционного минимума: если оптическая разность хода волн Δ равна нечетному числу полуволен в вакууме, то образуются интерференционные минимумы:

$$\Delta = (2m + 1)\lambda_0/2 \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (22.7)$$

При этом разность фаз когерентных волн равна нечетному числу π :

$$\delta = (2m + 1)\pi. \quad (22.7a)$$

Реальные источники не дают строго монохроматического света. В независимых источниках свет излучается атомами, каждый из которых испускает свет лишь в течение $\sim 10^{-8}$ с. Только в пределах этого времени волны, испускаемые атомом, имеют постоянные амплитуду и фазу колебаний. Независимые когерентные источники возможно получить, используя лазеры.

Немонохроматический свет можно представить в виде совокупности сменяющих друг друга коротких гармонических импульсов, излучаемых атомами, — волновых цугов.

Рассмотрим величины, используемые в качестве количественной меры степени когерентности световых колебаний, не зависящей от способа измерения интерференционной картины.

Средняя продолжительность одного волнового цуга $\tau_{\text{ког}}$ называется **временем когерентности**. Если при наложении волновых полей временной сдвиг τ между ними мал по сравнению с $\tau_{\text{ког}}$, то может быть получена четкая интерференционная картина, иначе при $\tau \gg \tau_{\text{ког}}$ интерференционная картина наблюдаться не будет. Величина $\tau_{\text{ког}}$ также ограничивает время измерения интерференционной картины.

Длина когерентности (длина цуга) $l_{\text{ког}}$ — это расстояние, на которое перемещается волна за время когерентности. В вакууме длина когерентности

$$l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}.$$

Длине когерентности соответствует максимально возможный порядок интерференции m_{max} , начиная с которого полосы исчезают:

$$m_{\text{max}} = l_{\text{ког}}/\lambda = \lambda/\Delta\lambda,$$

где λ — длина волны; $\Delta\lambda$ — ширина спектрального интервала интерферирующего света; величина $\lambda/\Delta\lambda$ характеризует степень монохроматичности света.

Временная когерентность — это когерентность колебаний, совершающихся в одной и той же точке пространства. Наблюдение интерференции света возможно лишь при выполнении условия временной когерентности колебаний:

$$\Delta < l_{\text{ког}} = \lambda^2/\Delta\lambda.$$

Пространственная когерентность световой волны от протяженного источника — это когерентность колебаний в один и тот же момент времени, но в разных точках плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Она теряется, если разброс фаз в этих точках достигает π . **Длина пространственной когерентности** (радиус когерентности)

$$\rho_{\text{ког}} \sim \lambda/\varphi,$$

где φ — угловой размер источника относительно точки наблюдения.

В опыте Юнга на рис. 22.1 контрастность интерференционных полос в основном определяется степенью пространственной когерентности освещения щелей S_1 и S_2 . Чтобы наблюдать интерференционную картину, расстояние d ($d = S_1S_2$) между щелями должно быть меньше $\rho_{\text{ког}}$. Линей-

ный размер ΔS источника должен удовлетворять условию пространственной когерентности: $\Delta S < \lambda R/d$.

Общий принцип получения когерентных световых волн таков: волну, излучаемую одним источником света, разделяют некоторым способом на две части, которые достигают точки наблюдения по разным путям. В результате между ними возникает оптическая разность хода Δ . Классические методы наблюдения интерференции: метод Юнга (рис. 22.1), бипризмы Френеля, зеркала Ллойда и т.д.

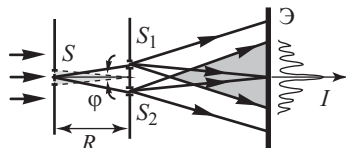


Рис. 22.1. Метод Юнга (1802): свет от источника (щель S) падает на узкие щели S_1 и S_2 , играющие роль когерентных источников ($S_1S_2 = d$)

22.2. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников

Рассмотрим схему опыта Юнга (см. рис. 22.1). Две щели S_1 и S_2 на расстоянии d друг от друга являются когерентными источниками света с длиной волны λ . Экран Θ параллелен плоскости, в которой лежат щели, и находится от них на расстоянии $l \gg d$ (рис. 22.2). В области, где волны и этих источников перекрываются, — в **зоне интерференции** на рис. 22.1 возникает система чередующихся максимумов и минимумов интенсивности, которую можно наблюдать на экране Θ .

Интенсивность I в произвольной точке A однородной среды определяется оптической разностью хода интерферирующих лучей $\Delta = (s_2 - s_1)n$. Поскольку световые волны распространяются в воздухе, то $n \approx 1$ и Δ есть разность расстояний s_1 и s_2 от источников до интересующей нас точки A . Согласно рис. 22.2

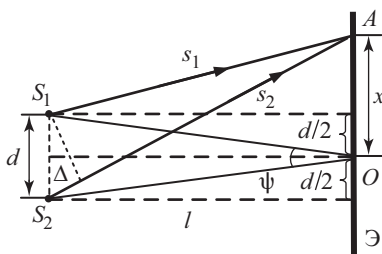


Рис. 22.2. Схема наблюдения интерференции света

$$s_2^2 = l^2 + (x + d/2)^2 \quad \text{и} \quad s_1^2 = l^2 + (x - d/2)^2,$$

$$\text{откуда } s_2^2 - s_1^2 = 2xd \quad \text{или} \quad \Delta = s_2 - s_1 = \frac{2xd}{s_1 + s_2}.$$

Из условия $l \gg d$ следует, что $s_1 + s_2 \approx 2l$. Поэтому $\Delta = \frac{xd}{l}$.

Максимумы освещенности наблюдаются в точках с координатами

$$\frac{xd}{l} = m\lambda \Rightarrow \boxed{x_{\max} = m \frac{l}{d} \lambda} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (22.8)$$

Положения минимумов освещенности определяются координатами

$$\frac{xd}{l} = (m + \frac{1}{2})\lambda \Rightarrow \boxed{x_{\min} = (m + \frac{1}{2}) \frac{l}{d} \lambda} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (22.8a)$$

Расстояние Δx между двумя соседними максимумами (минимумами) интерференционной картины называется **шириной интерференционной полосы**:

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda \quad \text{или} \quad \Delta x = \frac{\lambda}{\psi}, \quad (22.9)$$

где ψ — угловое расстояние между источниками, т.е. угол, под которым видны оба источника из центра экрана; как видно на рис. 22.2, $\psi = d/l$.

Распределение интенсивности. Рассмотрим идеализированный случай, когда источники S_1 и S_2 строго монохроматические. В интересующую нас точку экрана колебания от этих источников будут приходить практически с одинаковой амплитудой, $A_1 = A_2 = A_0$. Тогда согласно (22.4) можно доказать, что

$$I = I_0 \cos^2 \eta x, \quad (22.10)$$

где I_0 — интенсивность в максимумах; $\eta = \frac{\pi d}{\lambda l}$. В минимумах $I = 0$.

Данное идеализированное распределение интенсивности $I(x)$ достаточно хорошо согласуется с экспериментальным, показанным на рис. 22.1.

22.3. Интерференция света в тонких пленках

Полосы равного наклона. Интерференционные полосы называются **полосами равного наклона**, если они возникают при падении света на плоскопараллельную пластинку (пленку) под фиксированным углом в результате интерференции лучей, отраженных от обеих поверхностей пластинки (пленки) и выходящих параллельно друг другу.

Полосы равного наклона локализованы в бесконечности, поэтому для наблюдения интерференционной картины экран помещают в фокальной плоскости собирающей линзы (как для получения изображения бесконеч-

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	4
Обозначения и названия основных единиц физических величин	5
Десятичные приставки к названиям единиц	6
ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 4. ОПТИКА	8
Тема 21. Геометрическая оптика	8
21.1. Предварительные сведения. Световая волна. Показатель преломления среды	8
21.2. Законы геометрической оптики. Оптическая длина пути. Принцип Ферма. Таутохронизм	10
Тема 22. Интерференция света	13
22.1. Когерентность и интерференция световых волн	13
22.2. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников	17
22.3. Интерференция света в тонких пленках	18
22.4. Интерференция многих волн	22
Тема 23. Дифракция света	24
23.1. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля	24
23.2. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске	26
23.3. Дифракция Фраунгофера на щели	27
23.4. Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке	30
23.5. Дифракция на пространственной решетке. Понятие о голографии	32
Тема 24. Поляризация света	35
24.1. Области нормальной и аномальной дисперсии света. Электронная теория дисперсии	35
24.2. Эффект Доплера	38
24.3. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса	40
24.4. Поляризация света при отражении и преломлении. Закон Брюстера. Формулы Френеля	43
24.5. Двойное лучепреломление. Дихроизм	45
Литература	46
РАЗДЕЛ 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	47
Тема 25. Квантовая природа электромагнитного излучения	47
25.1. Тепловое излучение	47
25.2. Законы теплового излучения	50

25.3. Квантовая гипотеза Планка	53
25.4. Фотоэффект. Формула Эйнштейна	56
25.5. Коротковолновая граница тормозного рентгеновского спектра	60
25.6. Фотоны. Импульс фотона. Давление света	63
25.7. Эффект Комптона	65

Тема 26. Волновые свойства микрочастиц

26.1. Гипотеза де Бройля. Опыты Дэвиссона – Джермера	69
26.2. Прохождение электронов через две щели. Неприменимость понятия траектории к микрочастицам	72
26.3. Дифракция электронов и методы структурного анализа материалов	74
26.4. Соотношения неопределенностей Гейзенберга	76
26.5. Прохождение частицы через щель. Оценка энергии нулевых колебаний гармонического осциллятора	79
26.6. Задание состояния частицы в квантовой физике: пси-функция, ее физический смысл как амплитуды вероятности. Нормировка. Стандартные условия. Суперпозиция состояний в квантовой физике	81
26.7. Уравнения Шрёдингера (временное и стационарное). Стационарные состояния. Квантование энергии	83
26.8. Задачи на применение уравнения Шрёдингера	85
26.9. Частица в одномерной бесконечно глубокой потенциальной «яме»	87
26.10. Гармонический осциллятор (результаты решения)	91
26.11. Прохождение частицы через одномерный потенциальный барьер	94
26.12. Туннельный эффект	97
26.13. Явление туннельного эффекта и методы сканирующей зондовой микроскопии	101

Тема 27. Операторы физических величин в квантовой физике

27.1. Описание физических величин в квантовой механике. Операторы	103
27.2. Основные постулаты квантовой теории. Собственные функции и собственные значения	105
27.3. Собственные значения и собственные функции проекции момента импульса	108
27.4. Опыт Барнетта. Опыт Эйнштейна и де Хааза. Опыт Штерна и Герлаха. Спин. Квантовые числа орбитального и спинового моментов	111
27.5. Сложение моментов. Результирующий механический момент многоэлектронной системы	115
27.6. Типы связи в многоэлектронных атомах	117

Литература

РАЗДЕЛ 6. СТРОЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Тема 28. Физика атома

28.1. Представление о модели атома Резерфорда	120
28.2. Постулаты Бора. Боровская модель атома	123
28.3. Квантово-механическая модель атома водорода (результаты решения уравнения Шрёдингера). Квантовые числа атома водорода	127
28.4. Вырождение уровней. Кратность вырождения. Символы состояний	130
28.5. Правила отбора. Схема уровней. Спектральные серии атома водорода	132
28.6. Магнитный момент атома. Атом в магнитном поле	134

28.7. Понятие об эффекте Зеемана	138
28.8. Распределение электронов по энергетическим уровням в атоме. Принцип Паули. Оболочка и подоболочка	139
28.9. Периодическая система элементов	142
28.10. Характеристическое рентгеновское излучение. Рентгеновские спектры. Закон Мозли	144
Тема 29. Двухатомная молекула	146
29.1. Схема энергетических уровней двухатомной молекулы: электронные термы, их колебательная и вращательная структуры	146
29.2. Комбинационное рассеяние света	149
Тема 30. Физика твердого тела	151
30.1. Кристаллические тела. Типы кристаллов	151
30.2. Теплоемкость кристаллов. Закон Дюлонга и Пти. Зависимость теплоемкости от температуры Дебая	154
30.3. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение. Равновесное излучение. Принцип детального равновесия и формула Планка. Активная среда	157
30.4. Лазер (на примере трехуровневой системы). Резонатор	159
30.5. Распределения Ферми – Дирака и Бозе – Эйнштейна	161
30.6. Квантовая теория свободных электронов в металле. Плотность энергетических состояний	164
30.7. Энергетические зоны в кристаллах. Металлы, полупроводники, диэлектрики	168
30.8. Электропроводность металлов и полупроводников. Эффект Холла	170
30.9. Контактная разность потенциалов на переходе металл – металл	174
30.10. Термоэлектрические явления	176
30.11. Полупроводниковые диоды и транзисторы	179
30.12. Сверхпроводимость. Магнитные свойства сверхпроводника (эффект Мейсснера). Эффекты Джозефсона	182
30.13. Понятие о высокотемпературной сверхпроводимости	184
Тема 31. Физика ядра	185
31.1. Состав и масса ядра. Нуклоны. Взаимодействие нуклонов	185
31.2. Энергия связи ядра	188
31.3. Ядерные силы	190
31.4. Радиоактивность	192
31.5. Закон радиоактивного распада	194
31.6. Ядерные реакции	196
31.7. Энергетическая схема ядерной реакции	200
31.8. Реакции деления ядер. Пути использования ядерной энергии	201
31.9. Термоядерные реакции синтеза	205
Тема 32. Элементарные частицы	208
32.1. Виды фундаментальных взаимодействий	208
32.2. Классы элементарных частиц	210
32.3. Частицы и античастицы	213
32.4. Кварки	214
<i>Литература</i>	216

ПРИЛОЖЕНИЯ	218
1. Греческий алфавит	218
2. Параметры некоторых химических элементов	218
3. Некоторые физические константы (с точностью до 0,001)	219
4. Некоторые внесистемные единицы (с точностью до 0,01)	220
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	221

Учебное издание

Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна

ФИЗИКА

В двух частях

Часть 2

**Оптика. Квантовая физика.
Строение и физические свойства вещества**

Учебник

2-е издание, исправленное

Редактор *Е.В. Савицкая*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *Е.З. Липень*
Компьютерная верстка *А.Н. Бабенковой*

Подписано в печать 12.09.2014. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «NewtonС». Офсетная печать. Усл. печ. л. 13,49.
Уч.-изд. л. 13,2. Тираж 1000 экз. Заказ 1658.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.
Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.
e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Типография “Победа”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, производителя
и распространителя печатных изданий № 2/38 от 28.10.2013.
Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.