

А.М. Хорохоров

ОСНОВЫ ОПТИКИ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 12.00.00 «Фотоника, приборостроение,
оптические и биотехнические системы и технологии» в качестве учебного пособия
для реализации образовательных программ высшего образования
по направлениям подготовки бакалавриата и специалитета
12.03.01 «Приборостроение», 12.03.02 «Оптотехника», 12.03.03 «Фотоника
и оптоинформатика», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»,
12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 12.05.01 «Электронные
и оптико-электронные приборы и системы специального назначения»

3-е издание



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 2 6

УДК 535
ББК 22.34
Х81

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8673/>

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Рецензент
канд. техн. наук *А.В. Гурылева*

Хорохоров, А. М.
X81 Основы оптики в техническом университете : учебное пособие /
А. М. Хорохоров. — 3-е изд. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Бау-
мана, 2026. — 389, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6824-9

Изложена электромагнитная теория света, рассмотрены взаимодействие света с изотропной и анизотропной средами, вопросы фотометрии и теплового излучения, явления поляризации, интерференции и дифракции для когерентного и частично когерентного света, а также элементы квантовой оптики. В приложениях и задачах рассмотрены вопросы практического применения теории.

Для студентов, аспирантов и преподавателей технических университетов, а также для специалистов, работающих в области оптики и ее приложений.

УДК 535
ББК 22.34



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных
опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте:
press@bmstu.ru*

ISBN 978-5-7038-6824-9

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023,
с изменениями
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

*Светлой памяти моего Учителя
Ивана Ивановича Пахомова
посвящается*

От автора

Настоящее учебное пособие предназначено в первую очередь для студентов технических специальностей вузов. В основу пособия положены лекции по дисциплине «Основы оптики», которые в течение ряда лет читались студентам оптических специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана. Существующие учебники по физической оптике [1–11] написаны в основном для студентов физических специальностей, а наиболее фундаментальный из них — «Основы оптики» выдающихся физиков М. Борна и Э. Вольфа [3] — давно уже стал библиографической редкостью.

В настоящем пособии автор стремился сочетать достаточную строгость рассмотрения теоретических положений и практическую применимость результатов теории. Часто при изучении литературы по физической оптике у читателя возникают вопросы о том, каким образом и насколько широко используются результаты теории для решения практических задач. Предвосхищая многие из таких вопросов, в тексте пособия и приложениях к нему приведены сведения, имеющие наибольшую практическую ценность для инженеров-оптиков. Этой же цели отвечает и структура пособия, отличающая его от многих учебников аналогичной тематики. В частности, более подробно рассмотрены вопросы фотометрии и теплового излучения, матричный формализм Джонса — незаменимый математический аппарат для решения многих задач поляриметрии, подобранные примеры и задачи имеют ярко выраженную практическую направленность. Разбор этих задач, по мнению автора, будет способствовать лучшему усвоению материала пособия. В заключение каждой главы приведен список вопросов для самоконтроля, ответы на которые позволят читателю получить обобщенную оценку собственного знания терминологии и владения основными методами решения проблем, рассматриваемых в главе.

Автор выражает благодарность своим студентам, чьи вопросы побуждали его неоднократно корректировать отдельные параграфы пособия, для того чтобы сделать их более наглядными и понятными. Большую признательность автор выражает своему коллеге — научному сотруднику МГТУ им. Н.Э. Баумана Виктору Юрьевичу Павлову, сделавшему много ценных замечаний по содержанию книги и оказавшему большую помощь в подготовке ее к изданию.

Автор надеется, что представленные в книге материалы позволят повысить уровень знаний читателя, а разбор и решение многочисленных задач будут способствовать развитию умений и навыков, необходимых для практической инженерной и научной деятельности.

Замечания и предложения по материалу книги прошу направлять в Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Введение

Оптика — раздел физики, занимающийся изучением природы света¹, законов его распространения и взаимодействия с веществом. Еще за 400 лет до нашей эры школой Платона (427–347 до н. э.) были установлены законы прямолинейного распространения и отражения света от зеркальных поверхностей. Закон преломления света был открыт Снеллиусом (В. Снелл, 1580–1626) в конце XVI в. Им было найдено, что отношение синусов углов падения и преломления остается постоянным для двух данных сред. В середине XVII в. Р. Декарт (1596–1650) дал математическую формулировку закона преломления света. По сей день не выяснено, были ли известны Декарту неопубликованные труды Снеллиуса о преломлении света.

В вопросе о природе света многие физики часто занимали противоречивые позиции. Так, согласно И. Кеплеру (1571–1630), свет представляет собой частицы, излучаемые веществом — источником. Он считал распространение света мгновенным процессом. Р. Гук (1635–1703) установил наличие света в области геометрической тени, т. е. дифракции света. Он считал, что свет представляет собой очень быстрые колебания, распространяющиеся мгновенно или с очень большой скоростью.

Значительно расширил эти исследования Х. Гюйгенс (1629–1695). Он разделял точку зрения Гука о волновой природе света, однако полагал, что скорость света конечна и ее значение определяется плотностью среды, в которой он распространяется. При этом, по Гюйгенсу, чем выше плотность среды, тем меньше скорость света в ней. В основу волновой теории Гюйгенса положен принцип, носящий его имя. Согласно этому принципу, каждая точка, до которой доходит световая волна, становится в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая в произвольный момент времени эти вторичные волны, определяет фронт распространяющейся волны в этот момент времени.

Принцип Гюйгенса позволяет определить фронт волны в любой момент времени t' , если он известен в какой-либо предыдущий момент t (рис. В1). Зная положение фронта волны, можно определить направление распространения света (направление, перпендикулярное волновому фронту).

На основании сформулированного принципа Гюйгенса легко объяснить закон преломления. Пусть на границу раздела двух прозрачных сред с абсолютными показателями преломления² n_1 и n_2 падает плоский фронт волны AB (рис. В2). Обозначим угол падения α и будем отсчитывать время от момента соприкосновения точки A фронта волны с поверхностью раздела.

В момент времени $t = 0$ фронт падающей волны имеет положение OB' . Через время t_0 точка B' фронта волны переместится к точке B'' : $B'B'' = v_1 t_0$,

¹Здесь имеется в виду свет в широком смысле слова, т. е. электромагнитное излучение в интервале длин волн $10 \dots 10^6$ нм. Излучение в диапазоне $380 \dots 760$ нм, воспринимаемое глазом, называется *видимым светом*.

²Абсолютный показатель преломления среды n введен И. Ньютоном в конце XVII в. как отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде.

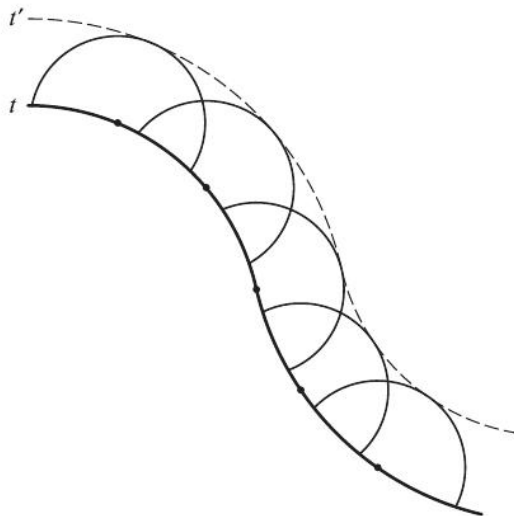


Рис. В1. Объяснение принципа Гюйгенса

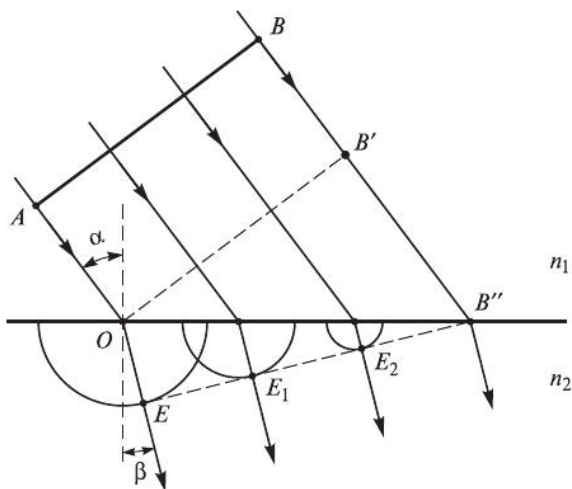


Рис. В2. Схема вывода закона преломления по Гюйгенсу

где v_1 — скорость распространения света в первой среде с показателем преломления n_1 .

За это время точка O фронта волны переместится на расстояние $OE = v_2 t_0$ во второй среде, где v_2 — скорость распространения света в среде с показателем преломления n_2 .

Промежуточные точки фронта волны примут соответственно положение E_1 , E_2 и т. д. Согласно принципу Гюйгенса, огибающей вторичных волн во второй среде к моменту времени t_0 будет линия EB'' . Лучи света представлены прямыми линиями, перпендикулярными фронту волны EB'' . Из рис. В2 следует:

$$\sin \alpha = \frac{B'B''}{OB''} = \frac{v_1 t_0}{OB''};$$

$$\sin \beta = \frac{OE}{OB''} = \frac{v_2 t_0}{OB''},$$

откуда

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (\text{B1})$$

где β — угол преломления.

На основании последнего соотношения можно заключить, что если $n_2 > n_1$ (вторая среда оптически более плотная), то скорость света в более плотной среде меньше, чем в менее плотной. Позднее Гюйгенс, опираясь на предложенный им принцип, объяснил явление двойного лучепреломления, обнаруженное в 1670 г. Р. Бартолини (1625–1698) в кристаллах исландского шпата.

Несовершенства, которые существовали в волновой теории (невозможность объяснить прямолинейное распространение света, явление поляризации и др.) побудили И. Ньютона (1642–1727) развить корпускулярную теорию (или теорию истечения), согласно которой свет распространяется от излучающего тела в виде мельчайших частиц — *корпускул*. Явление дисперсии света, наблюдаемое Ньютоном в опыте с призмой, также было объяснено с помощью корпускулярной теории. По Ньютону, цвета определяются размерами носителей-корпускул: красному цвету соответствуют корпускулы наибольшего размера, фиолетовому — наименьшего.

Корпускулярная теория позволила объяснить законы отражения и преломления света. Согласно этой теории, отражение света происходит подобно упругому удару шарика о неподвижную стенку, т. е. углы падения и отражения должны быть равны. Затем корпускула, падающая на границу раздела двух прозрачных сред, при дальнейшем прохождении в более плотной среде приближается (вследствие увеличения притяжения) к нормали, опущенной к границе раздела.

Выведем закон преломления, исходя из теории Ньютона. Пусть свет падает на границу раздела двух сред с показателями преломления $n_1 < n_2$ (рис. В3). Разложим скорость света в первой среде на горизонтальную v_{1x} и вертикальную v_{1z} компоненты. Согласно Ньютону, горизонтальные составляющие скоростей остаются неизменными, т. е. $v_{1x} = v_{2x}$, в то время как $v_{2z} > v_{1z}$ (при условии $n_1 < n_2$).

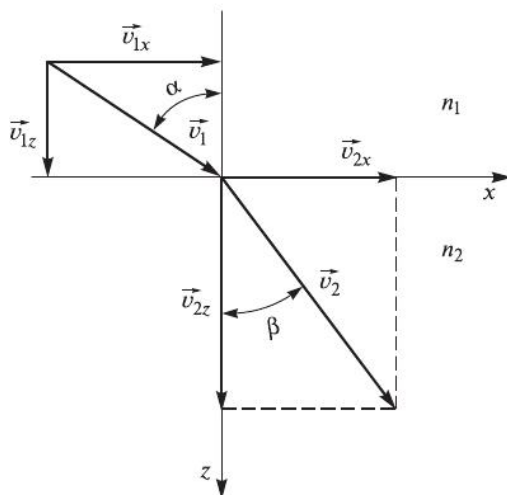


Рис. В3. Схема для вывода закона преломления по Ньютону

Как следует из рис. В3,

$$\sin \alpha = \frac{v_{1x}}{v_1};$$

$$\sin \beta = \frac{v_{2x}}{v_2},$$

откуда

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Полученное выражение, хотя и совпадает по форме с законом преломления (В1), свидетельствует о том, что скорость света в оптически более плотной среде должна быть больше, чем в оптически менее плотной.

Таким образом, к началу XVIII в. существовали два подхода к объяснению природы света: волновая теория Гюйгенса и корпускулярная теория Ньютона. В течение почти всего XVIII столетия был незыблем авторитет Ньютона: господствовала корпускулярная теория. Однако к концу века благодаря теоретическим и экспериментальным исследованиям она стала сдавать свои позиции.

В 1803 г. Т. Юнг (1773–1829) впервые обнаружил явление интерференции, неразрывно связанное с дифракцией света на отверстиях, размеры которых соизмеримы с длиной волны. В 1818 г. О.Ж. Френель (1788–1827), опираясь на волновую теорию и дополнив принцип Гюйгенса концепцией когерентного взаимодействия волн от вторичных источников, создал теорию дифрак-

Оглавление

От автора	3
Введение	4
1. Основы электромагнитной теории излучения	11
1.1. Система уравнений Максвелла	11
1.2. Вывод дифференциальных уравнений для скалярного и векторного потенциалов электромагнитного поля	13
1.3. Решение дифференциальных уравнений для скалярного и векторного потенциалов	15
1.4. Закон сохранения энергии в электромагнитном поле	18
1.5. Электромагнитное поле в волновой зоне	20
1.6. Реакция излучения. Ширина спектральной линии	24
1.7. Задачи и примеры их решения	31
Вопросы для самоконтроля	38
2. Поляризация излучения	39
2.1. Векторные электромагнитные волны	39
2.2. Гармонические электромагнитные волны	42
2.3. Вектор Джонса	43
2.4. Определение параметров эллипса поляризации	49
2.5. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре	51
2.6. Матрицы Джонса поляризационных элементов	52
2.7. Задачи и примеры их решения	57
Вопросы для самоконтроля	60
3. Прохождение электромагнитной волны через границу раздела однородных сред	61
3.1. Уравнения Френеля	61
3.2. Энергетические коэффициенты отражения и пропускания. Поляризация света при отражении и преломлении	70
3.3. Матричное описание пропускания и отражения	73
3.4. Падение света под углом, бóльшим предельного	74
3.5. Металлооптика	80
3.6. Задачи и примеры их решения	89
Вопросы для самоконтроля	92
4. Оптика кристаллов	94
4.1. Описание анизотропной среды	94
4.2. Структура плоской гармонической волны в кристалле	95
4.3. Уравнение Френеля	97
4.4. Лучевой и волновой эллипсоиды Френеля	101
4.5. Лучевая поверхность	103
4.6. Одноосные кристаллы	106
4.7. Двойное лучепреломление	108
4.8. Поляризационные элементы	111
4.9. Искусственная анизотропия	121

4.10. Жидкие кристаллы	124
4.11. Задачи и примеры их решения	126
Вопросы для самоконтроля	129
5. Фотометрия. Законы теплового излучения	130
5.1. Фотометрия	130
5.2. Законы теплового излучения	147
5.3. Задачи и примеры их решения	155
Вопросы для самоконтроля	161
6. Дисперсия света	163
6.1. Классическая осцилляторная модель среды	163
6.2. Дисперсия и поглощение света линейной изотропной среды	165
6.3. Дисперсия в области высоких частот	169
6.4. Дисперсия газов в области низких частот	170
6.5. Дисперсия бесцветных оптических стекол	172
6.6. Распространение светового импульса в диспергирующей среде ...	173
6.7. Волновое число $k(\omega)$ в диспергирующей непроводящей среде ...	177
6.8. Среда с дисперсией первого порядка	178
6.9. Среда с дисперсией второго порядка. Дисперсия групповых скоростей	180
6.10. Дисперсионное распывание импульса	182
6.11. Задачи и примеры их решения	184
Вопросы для самоконтроля	189
7. Дифракция света	190
7.1. Теория дифракции Френеля	190
7.2. Векторная диаграмма дифракции Френеля	196
7.3. Применение теории дифракции Френеля	197
7.4. Теория дифракции Кирхгофа	203
7.5. Дифракция Фраунгофера на амплитудных и фазовых транспарантах	215
7.6. Задачи и примеры их решения	234
Вопросы для самоконтроля	238
8. Интерференция света	239
8.1. Двухлучевая интерференция	240
8.2. Стоячие волны	256
8.3. Метод деления амплитуды	260
8.4. Многолучевая интерференция	271
8.5. Задачи и примеры их решения	280
Вопросы для самоконтроля	285
9. Интерференция и дифракция частично когерентного света	286
9.1. Пространственная и временная когерентность	286
9.2. Комплексное представление вещественных полихроматических полей	287
9.3. Пространственная и временная когерентность световых пучков ...	292
9.4. Временная когерентность	298

9.5. Пространственная когерентность	310
9.6. Задачи и примеры их решения	319
Вопросы для самоконтроля	326
10. Квантовая теория излучения и взаимодействия излучения с веществом	328
10.1. Общие положения квантовой оптики	328
10.2. Квантовая теория излучения	332
10.3. Вероятностный метод анализа квантовых систем	337
10.4. Прохождение излучения через вещество	342
10.5. Структурные схемы лазера и лазерного усилителя	350
10.6. Задачи и примеры их решения	351
Вопросы для самоконтроля	356
Литература	357
Приложение 1. Основные формулы векторного анализа	359
Приложение 2. Отрицательный показатель преломления. Метаматериалы	362
Приложение 3. Дифракция света на диафрагмах с прямолинейными образующими	369
Приложение 4. Дифракционные решетки в спектральных приборах	375
Приложение 5. Оптическая левитация. Лазерный пинцет	381