

А.Н. Матвеев

Оптика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
А11

A11 **А.Н. Матвеев**
Оптика / А.Н. Матвеев – М.: Книга по Требованию, 2023. – 352 с.

ISBN 978-5-458-36601-4

Изложение материала ведется в рамках электромагнитной теории с использованием преобразования Фурье как для монохроматического, так и для немонохроматического и хаотичного излучений. Наряду с традиционными в книге освещены вопросы, получившие особенно значительное развитие в последние 15—20 лет: Фурье-оптика, Фурье-анализ случайных сигналов, матричные методы в геометрической оптике, голограмфия, лазеры, нелинейные явления и др.

Книга представляет собой четвертый том курса общей физики для университетов и вузов. Предыдущие тома — «Механика и теория относительности», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм» — вышли соответственно в 1976, 1981 и 1983 гг.

ISBN 978-5-458-36601-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригиналe, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

4	Геометрическая оптика	5
§ 21. Приближение геометрической оптики	118	—
Уравнение эйконала. Луч света. Область применимости лучевого приближения. Принцип Ферма. Вывод закона преломления из принципа Ферма. Распространение луча в среде с переменным показателем преломления.		
§ 22. Линзы, зеркала и оптические системы	123	
Параксиальное приближение. Преломление на сферической поверхности. Матричные обозначения. Распространение луча в линзе. Преломление луча на второй сферической поверхности. Преломление луча линзой. Распространение луча через оптическую систему. Отражение от сферических поверхностей		
§ 23. Оптическое изображение	127	
Матрица оптической системы. Преобразование луча от плоскости предмета к плоскости изображения. Кардинальные элементы оптической системы. Физический смысл постоянных Гаусса. Построение изображений. Уравнение линзы. Тонкие линзы. Система тонких линз. Использование ЭВМ		
§ 24. Аберрации оптических систем	134	
Источники аберраций. Точные матрицы преобразований. Сферическая аберрация. Кома. Аберрации, обусловленные внеосевыми наклонными лучами. Хроматическая аберрация. Иммерсионный объектив. Условие Аббе		
§ 25. Оптические приборы	140	
Диафрагмирование. Основные понятия, связанные с диафрагмированием. Глаз как оптическая система. Фотоаппарат. Лупа. Микроскоп. Зрительная труба. Проекционные устройства		
Задачи	145	
5	Интерференция	148
§ 26. Двухлучевая интерференция, осуществляемая делением амплитуды	148	
Определение интерференции. Интенсивность при суперпозиции двух монохроматических волн. Способы получения когерентных волн в оптике. Интерференция монохроматических волн, распространяющихся строго вдоль оси интерферометра Майкельсона. Интерференция монохроматических волн, распространяющихся под углом к оси интерферометра. Причина размывания полос интерференции. Интерференция немонохроматического света. Принцип Фурье-спектроскопии. Видимость при гауссовой форме линии. Видимость при лоренцевой форме линии. Интерферометр Майкельсона с линейными полосами. Интерференционная картина от белого света. Интерферометр Маха—Цендера. Интерферометр Тваймана—Грина. Интерферометр Жамена		
§ 27. Двухлучевая интерференция, осуществляемая делением волнового фронта	162	
Принцип Гюйгенса. Схема Юнга. Интерференция при белом свете. Источник конечного размера. Источник с однородным распределением интенсивности излучения. Временная и пространственная когерентности. Угол и ширина когерентности. Звездный интерферометр. Измерение диаметров звезд. Измерение расстояния между компонентами двойной звезды. Бипризма Френеля. Билинза Бийе. Зеркало Ллойда. Бизеркало Френеля. Закон сохранения энергии в явлениях интерференции		
§ 28. Многолучевая интерференция, осуществляемая делением амплитуды	171	
Интерферометр Фабри—Перо. Распределение интенсивности в интерференционной картине. Интерференционные кольца. Разрешающая способность. Факторы, ограничивающие разрешающую способность. Дисперсионная область. Сканирующий интерферометр Фабри—Перо. Интерференционные фильтры. Пластиинка Люммера—Герке. Эшелон Майкельсона		
§ 29. Интерференция в тонких пленках	180	
Оптическая длина пути. Отражение от параллельных поверхностей. Линии равного наклона. Роль размера источника. Роль толщины пленки и монохроматичности излучения. Линии равной толщины. Кольца Ньютона. Учет многократных отражений. Слой с нулевой отражательной способностью. Слой с высокой отражательной способностью.		

6 Дифракция

Матричный метод расчета многослойных пленок. Многослойные диэлектрические зеркала. Полупрозрачные материалы	190
§ 30. Частичная когерентность и частичная поляризация	
Частичная когерентность. Функция взаимной когерентности. Комплексная степень когерентности. Степень когерентности. Опыт Брауна и Твисса. Частичная поляризация. Матрица когерентности квазимонохроматической плоской волны. Комплексная степень когерентности взаимно перпендикулярных проекций напряженности электрического поля волны. Естественный (неполяризованный) свет. Полностью поляризованный свет. Степень поляризации световой волны. Выражение степени поляризации через экстремальные значения интенсивности. Представления естественного света. Соотношение между степенью поляризации и степенью когерентности. Теорема Ван-Циттерта—Цернике	204
Задачи	208
§ 31. Метод зон Френеля	
Принцип Гюйгенса—Френеля. Зоны Френеля. Графическое вычисление амплитуды. Пяtno Пуассона. Дифракция на прямолинейном крае полусферического экрана. Зонная пластина как линза. Трудности метода зон Френеля	213
§ 32. Приближение Кирхгофа	
Формула Грина. Теорема Гельмгольца—Кирхгофа. Условие излучения. Приближение Кирхгофа. Оптическое приближение. Формула дифракции Френеля—Кирхгофа. Теорема взаимности Гельмгольца. Вторичные источники. Приближение Френеля	219
§ 33. Дифракция Фраунгофера	
Область дифракции Фраунгофера. Дифракция на прямоугольном отверстии. Дифракция на щели. Дифракция на круглом отверстии. Дифракционная решетка. Дифракция белого света на решетке. Дисперсионная область. Разрешающая способность. Отражательные дифракционные решетки. Дифракция на щели с непрерывным изменением фазы волны. Фазовые решетки. Амплитудно-фазовые решетки. Наклонное падение лучей на решетку. Дифракция на непрерывных периодических и непериодических структурах. Дифракция на ультразвуковых волнах. Сравнение характеристик спектральных аппаратов	232
§ 34. Дифракция Фремеля	
Область дифракции Френеля. Дифракция на прямоугольном отверстии. Интегралы Френеля. Спираль Корню	234
Задачи	236
§ 35. Линза как элемент, осуществляющий преобразование Фурье	
Фазовое преобразование, осуществляющее тонкой линзой. Расчет функции толщины. Виды линз. Линза как элемент, осуществляющий преобразование Фурье	239
§ 36. Дифракционное образование изображений линзой	
Фурье-преобразование амплитуд между фокальными плоскостями линзы. Формирование изображения линзой. Предел разрешающей способности оптических приборов. Метод темного поля. Метод фазового контраста	247
§ 37. Пространственная фильтрация изображений	
Существо пространственной фильтрации изображений. Пространственная фильтрация изображений дифракционной решетки. Эксперимент Аббе—Портера	249
§ 38. Голография	
Синхронное детектирование. Голограмма плоской волны. Восстановление изображения. Голограмма точечного объекта. Голограмма произвольного объекта. Требования к фотопластинкам и времени экспозиции. Объемное воспроизведение предмета. Толстослойные гологramмы (метод Денисюка). Условие Вульфа—Брэгга. Получение голограммы и восстановление плоской волны. Получение голограммы и восстановление сферической волны. Получение голограммы и восстановление изображения произвольного объекта. Цветное объемное изображение. Особенности голограмм как носителей информации. Применения голографии	

8	Распространение света в анизотропных средах	262	7
	§ 39. Описание анизотропных сред	262	
	Источники анизотропии. Описание анизотропной диэлектрической среды. Тензор диэлектрической проницаемости		
	§ 40. Распространение плоской электромагнитной волны в анизотропной среде	264	
	Плоская электромагнитная волна в анизотропной среде. Зависимость фазовой скорости от направлений распространения волны и колебаний вектора D . Уравнение Френеля. Типы возможных волн		
	§ 41. Ход лучей в анизотропной среде	267	
	Зависимость лучевой скорости от направления. Эллипсоид лучевых скоростей. Анализ хода лучей с помощью эллипса лучевых скоростей. Оптическая ось. Двусосные и одноосные кристаллы. Эллипсоид волновых нормалей. Лучевая поверхность		
	§ 42. Двойное лучепреломление	272	
	Обыкновенный и необыкновенный лучи. Сущность двойного лучепреломления. Построение Гюйгенса. Оптическая ось перпендикулярна поверхности кристалла. Оптическая ось параллельна поверхности кристалла. Оптическая ось под углом к поверхности кристалла. Закон Малюса. Поляризация при двойном лучепреломлении. Поляроид. Поляризационные и двоякопереломляющие призмы. Призма Николя. Двоякопереломляющие призмы. Полихроизм		
	§ 43. Интерференция поляризованных волн	276	
	Интерференция волн при взаимно перпендикулярных направлениях линейной поляризации. Пластина в четверть волны. Пластина в полволны. Пластина в целую волну. Анализ линейно поляризованного света. Анализ эллиптически поляризованного света. Анализ циркулярно поляризованного света. Компенсаторы. Цвета кристаллических пластинок. Явления в сходящихся лучах		
	§ 44. Вращение плоскости поляризации	281	
	Вращение плоскости поляризации в кристаллических телах. Вращение плоскости поляризации в аморфных веществах. Феноменологическая теория вращения плоскости поляризации. Оптическая изомерия. Вращение плоскости поляризации в магнитном поле		
	§ 45. Искусственная анизотропия	285	
	Анизотропия при деформации. Анизотропия, создаваемая в веществе электрическим полем. Анизотропия, создаваемая в веществе магнитным полем. Эффект Поккельса		
	Задачи	288	
9	Рассеяние света	290	
	§ 46. Природа процессов рассеяния	290	
	Природа рассеяния. Типы рассеяния. Многократное рассеяние		
	§ 47. Рэлеевское рассеяние и рассеяние Ми	291	
	Модель элементарного рассеивателя. Рэлеевское рассеяние. Закон Рэлея. Угловое распределение и поляризация света при рэлеевском рассеянии. Ослабление интенсивности света. Рассеяние Ми. Распределение интенсивности по углам и поляризация излучения в рассеянии Ми. Проявления рассеяния Ми		
	§ 48. Рассеяние Мандельштама—Бриллюэна	297	
	Компоненты Мандельштама—Бриллюэна. Несмешенная компонента. Явление Мандельштама—Бриллюэна в твердых телах		
	§ 49. Комбинационное рассеяние	298	
	Классическая интерпретация. Экспериментальные факты. Квантовая интерпретация. Применения комбинационного рассеяния		
10	Генерация света	302	
	§ 50. Излучение абсолютно черного тела	302	
	Плотность излучения. Равновесная плотность излучения. Первый закон Кирхгофа. Поглощательная способность и энергетическая светимость. Второй закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело. Концентрация молекулений. Формула Рэлея—Джинса. Формула Вина. Формула Планка. Закон Стефана—Больцмана. Закон смещения Вина. Элементарная квантовая теория. Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна		

**11
Нелинейные
явления в
оптике**

§ 51. Оптические усилители	309
Прохождение света через среду. Закон Бургера. Условия усиления. Воздействие светового потока на заселенность уровней. Условия насыщения. Создание инверсной заселенности	
§ 52. Лазеры	312
Принципиальная схема лазера. Порог генерации. Условия стационарной генерации. Добротность. Непрерывные и импульсные лазеры. Повышение мощности излучения. Метод модулированной добротности	
§ 53. Лазерное излучение	315
Моды излучения. Резонатор с прямоугольными плоскими зеркалами. Аксиальные (продольные) моды. Ширина линий излучения. Боковые моды. Цилиндрический резонатор со сферическими зеркалами. Синхронизация мод. Продолжительность импульса. Осуществление синхронизации мод. Лазерные спеклы	
§ 54. Характеристики некоторых лазеров	321
Разнообразие лазеров. Рубиновый лазер. Гелий-неоновый лазер. CO ₂ -лазер с замкнутым объемом. Проточный CO ₂ -лазер. Т-лазер. Газодинамические лазеры. Лазеры на красителях	
Задачи	326
§ 55. Нелинейная поляризованность	328
Линейная поляризованность. Нелинейная поляризованность. Квадратичная нелинейность. Нелинейная восприимчивость. Комбинационные частоты	
§ 56. Генерация гармоник	330
Волна линейной поляризованности. Волны нелинейной поляризованности. Условие пространственного синхронизма. Длина когерентности. Осуществление пространственного синхронизма. Векторное условие пространственного синхронизма. Генерация суммарных и разностных частот. Спонтанный распад фотона. Пареметрическое усиление света. Пареметрические генераторы света	
§ 57. Самовоздействие света в нелинейной среде	338
Нелинейная поправка к показателю преломления. Самофокусировка и дефокусировка пучка. Длина самофокусировки. Пороговая мощность. Основные причины возникновения нелинейности показателя преломления. Инерционность	
Приложение. Единицы СИ, используемые в книге	342

Предисловие

Стремительное внедрение достижений науки в производство — необходимая черта сегодняшнего дня. Одним из ярких примеров здесь является именно оптика. Бурное развитие лазерной техники стало не только научным достижением, но и во многих отраслях революционизировало промышленную технологию. Важнейшее значение приобрела сегодня проблема подготовки квалифицированных кадров для отраслей промышленности, внедряющих новейшие научные разработки.

«Значительно улучшить подготовку в вузах и техникумах специалистов для ведущих отраслей народного хозяйства...», — призывал июньский (1983г.) Пленум ЦК КПСС.

Применение лазеров и их использование совместно с ЭВМ создали весьма благоприятные условия для развития оптики. Высокая когерентность лазерного излучения позволяет изучать и воспроизводить в оптическом диапазоне широкий класс явлений, недоступных для исследований при малых степенях когерентности излучения. Высокая плотность энергии лазерного излучения дает возможность исследовать нелинейные оптические процессы в условиях, недоступных при прежних методах исследования. Возможность генерации коротких и сверхкоротких лазерных импульсов открыла путь к исследованию быстро протекающих процессов, включая внутримолекулярные. Использование ЭВМ в громадной степени ускорило оптические исследования, поскольку во многих случаях оно сведет их либо к прямому расчету, либо к постановке численных экспериментов.

Все это за последние 25 лет привело к значительному развитию оптики, существенно расширились ее приложения. Начало этому процессу было положено важными работами, приведшими к созданию квантовых генераторов излучения. Наряду с фундаментальными работами по мазерам и лазерам советскими физиками внесен большой вклад в развитие многих важных разделов оптики. Например, таких, как рассеяние света, голограмма, оптические системы, нелинейная оптика и т. д. В этом развитии оптики фундаментальные основы ее, естественно, не претерпели существенных изменений. В ряде случаев они были прояснены, а в других случаях — обогащены проникновением понятий, методов, математических приемов и т. д. из других областей науки (например, теории случайных процессов, физики линейных и нелинейных колебаний, матричных методов расчета и т. д.).

Содержание книги достаточно полно отражено оглавлением. Несколько больше внимания, чем обычно, удалено статистическим свойствам света и спектральному представлению. Дифракция изложена в рамках интеграла Кирхгофа. На материале геометрической оптики и интерференции в тонких пленках показана эффективность матричных методов. Дифракционная теория формирования изображений, пространственная фильтрация изображений, голограмма и другие аналогичные вопросы представлены единообразно в рамках Фурье-оптики. Анализ частичной когерентности и частичной поляризации проводится в рамках первой корреляционной функции.

Математическая сторона излагаемого материала представлена в возможно простой форме, совместимой с достаточной строгостью изложения. В необходимых случаях даются математические пояснения и приводятся более детальные расчеты. Громоздкость некоторых из этих расчетов не должна создавать у студента впечатления о слож-

ности используемого математического аппарата. Чтобы рассеять это впечатление, ему необходимо лишь запастись терпением и провести самостоятельно эти расчеты.

Наиболее существенное отличие курса оптики от курсов механики, молекулярной физики и электричества состоит в том, что его фундаментальные основы лежат вне курса. Это обстоятельство приводит к значительному усилению роли дедуктивного метода изложения. Поэтому изложение в основном носит дедуктивный характер, а анализ экспериментальных данных в большинстве случаев (хотя и не всегда) призван либо продемонстрировать согласие выводов теории с результатами опытов, либо объяснить наблюдаемые явления.

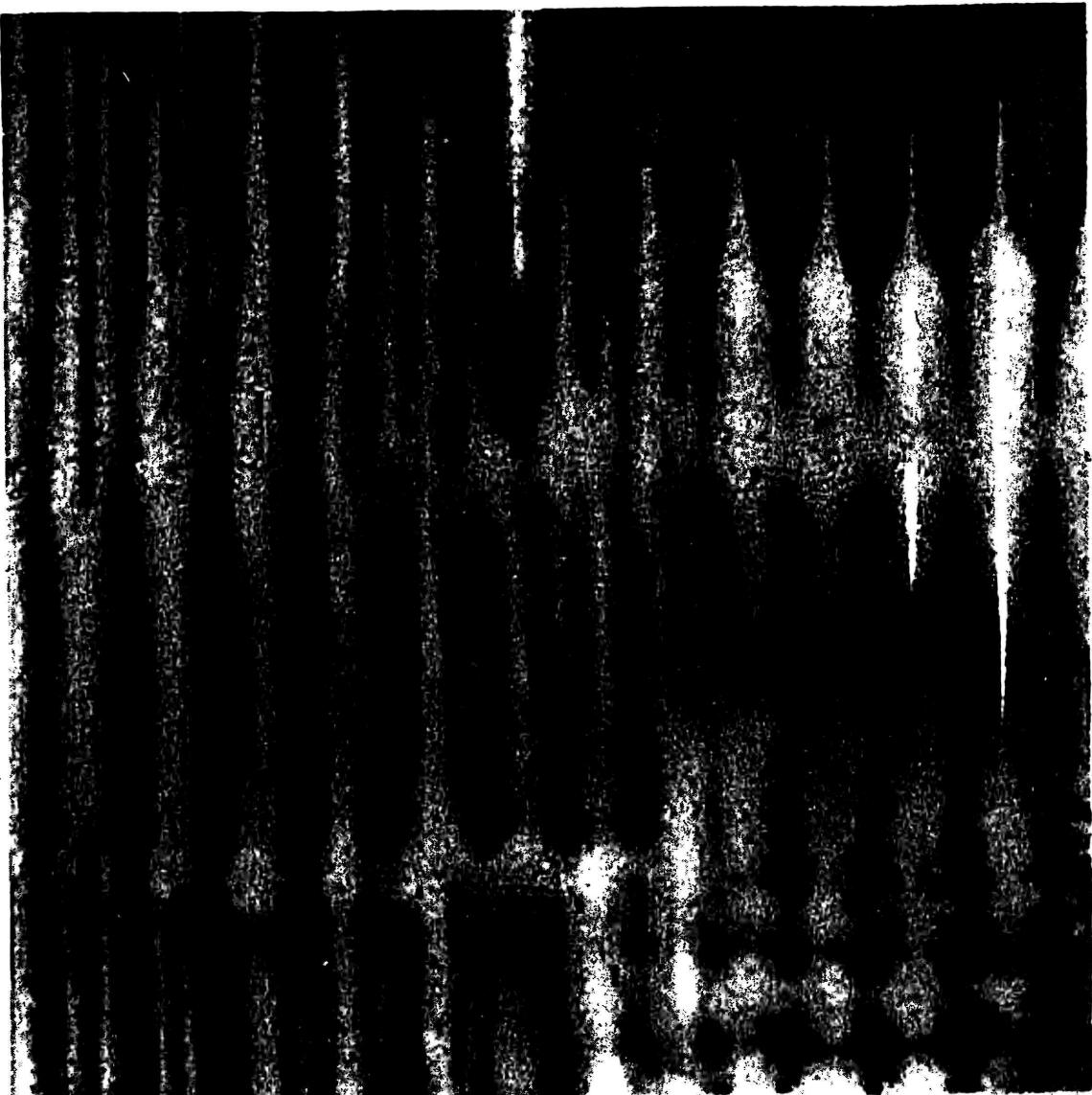
Книга написана на основе многолетнего опыта преподавания автора на физическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Автор благодарен своим коллегам, дискуссии с которыми оказали влияние на общий план книги.

Автор благодарен академику АН УССР А. И. Ахиезеру, а также проф. Н. И. Калитеевскому и сотрудникам возглавляемой им кафедры за внимательное рецензирование рукописи и ценные замечания.

Автор

Основная идея:
Основываясь
на электромагнитной
природе света,
изучить свойства
монохроматических
световых волн
с помощью
уравнений Максвелла.

Электромагнитные волны



§ 1 | Оптический диапазон электромагнитных волн

Анализируются факторы, делающие волны видимого диапазона наиболее подходящими для зрения.
Описываются характеристики оптического диапазона.

Длины волн видимого диапазона. Видимый диапазон включает электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом. Граница диапазона этих волн зависит от индивидуальных особенностей глаза и варьируется приблизительно в пределах

$$\lambda = 0,38 \div 0,76 \text{ мкм}. \quad (1.1)$$

Частоты волн видимого диапазона. В оптике используется как круговая частота

$$\omega = 2\pi/T, \quad (1.2)$$

где T — период колебаний волны, так и частота

$$v = 1/T, \quad (1.3)$$

связанные очевидным соотношением

$$\omega = 2\pi v. \quad (1.4)$$

Частота выражается в герцах, а круговая частота — в секундах в минус первой степени. Принимая во внимание, что

$$\lambda = cT, \quad (1.5)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света в вакууме, для границ видимого диапазона получаем:

$$v = (4 \div 8) \cdot 10^{14} \text{ Гц}; \quad (1.6) \quad \omega = (2,5 \div 5,0) \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}. \quad (1.7)$$

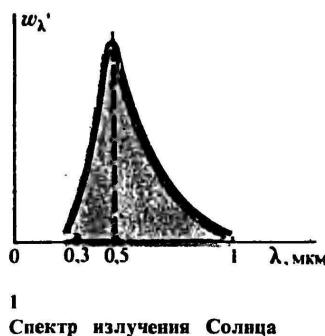
Оптический и другие диапазоны электромагнитных волн. Теоретически мыслимым является существование всех частот от $v = 0$ до $v = \infty$. Однако корпускулярные свойства излучения накладывают на эти возможности ограничения. Как показывается в квантовой теории, электромагнитное излучение существует в виде «порций» энергии (квантов). Энергия кванта излучения связана с его частотой формулой

$$E = \hbar\omega = hv, \quad (1.8)$$

где $\hbar = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$ — постоянная Планка; $\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·с}$ называется также постоянной Планка (новой).

Обе эти величины встречаются одинаково часто в зависимости от обстоятельств. Как видно (в 1.8), постоянную \hbar удобно выбирать в случае оперирования с круговыми частотами, а h — при использовании частот v .

Из (1.8) следует, что бесконечные частоты $v = \infty$ невозможны, поскольку соответствующие кванты излучения обладали бы бесконечной энергией. Соотношение (1.8) также дает ограничение на малые частоты, если существует минимально возможное значение энергии кванта E_0 . А это означает, что и частота не может быть меньше $v_0 = E_0/h$. В настоящее время в физике нет никаких свидетельств ограничения снизу энергии фотонов электромагнитного излучения. Следовательно, частоты электромагнитных волн не ограничены снизу. Минимальная частота (около 8 Гц) наблюдается в стоячих электромагнитных волнах между ионосферой и земной поверхностью. Отсюда можно заключить [см. (1.8)], что минимальная энергия квантов электромагнитного излучения по крайней мере меньше 10^{-33} Дж .



Всевозможные частоты электромагнитных волн подразделяются на следующие диапазоны:

Название диапазона волн	Границы диапазона	
	по длинам волн λ	по энергии E квантов
Гамма-излучение	$<0,0012$ нм	> 1 МэВ
Излучение:		
рентгеновское	0,0012—12 нм	100 эВ — 1 МэВ
ультрафиолетовое	12—380 нм	3,2—100 эВ
видимое	380—760 нм	1,6—3,2 эВ
инфракрасное	760— 10^6 нм = 1 мм	$1,2 \cdot 10^{-3}$ — 1,6 эВ
Радиоволны	> 1 мм	$< 1,2 \cdot 10^3$ эВ

Каждый из диапазонов имеет свои характерные особенности. С увеличением частоты волн усиливается проявление корпускулярных свойств излучения. Волны разных диапазонов различаются также методами генерации излучения. Каждый из диапазонов служит предметом изучения соответствующего раздела физики.

Видимый диапазон и примыкающие к нему диапазоны ультрафиолетового и инфракрасного излучений в совокупности составляют диапазон электромагнитных волн, изучаемый в оптике. Кванты излучения видимого диапазона называются фотонами. Они имеют энергию в интервале

$$E = (2,6 \div 5,2) \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \div 3,2 \text{ эВ}. \quad (1.9)$$

Почему мы видим именно в видимом диапазоне? При температуре выше 0 К все материальные тела излучают электромагнитные волны, которые поглощаются и отражаются (рассеиваются) материальными телами. Интенсивность излучения отражения и поглощения зависит от частоты излучения, температуры, свойств вещества и других факторов. Наиболее интенсивным источником электромагнитного излучения, определяющим «радиационную обстановку» вблизи земной поверхности, является Солнце. Температура поверхности Солнца составляет около 6000 К. Спектр его излучения является спектром излучения абсолютно черного тела (см. § 50). Максимум интенсивности излучения по длинам волн приходится примерно на длину волны 0,5 мкм (рис. 1).

При прохождении света через атмосферу Земли в результате рассеяния и поглощения состав солнечного спектра существенно меняется в зависимости от толщины проходящего светом слоя воздуха, запыленности и других факторов. В результате спектр у поверхности Земли обрывается примерно на волне $\lambda \approx 0,3$ мкм. Волны с меньшей длиной волны от Солнца поверхности Земли не достигают. Это обусловли-

- Длины волн видимого диапазона заключены примерно в пределах 0,38—0,76 мкм, а оптический диапазон включает также и инфракрасную и ультрафиолетовую области спектра.
- Видимый диапазон наиболее подходит для зрения потому, что на меньшие длины волн днем вблизи поверхности Земли приходится слишком малая доля энергии, а на больших длинах волн зрению мешают шумы.
- Какие изменения претерпевает солнечный спектр при прохождении через атмосферу? Укажите границы видимого диапазона по частотам и круговым частотам.
- Укажите границы оптического диапазона длин волн.

вается поглощением их озоном O_3 в верхних слоях атмосферы. Ослабление волн зависит главным образом от высоты Солнца над уровнем горизонта, что наглядно характеризуется следующими данными:

Цвет, область спектра	Доля излучения, достигающего поверхности Земли при положении Солнца		Диапазон длин волн, мкм	Энергия излучения, %	
	в зените	при заходе или восходе		в спектре Солнца	у поверх- ности Земли
Красный, 0,65 мкм	0,96	0,21	0,3—0,4	5	1
Зеленый, 0,52 мкм	0,9	0,024	0,4—0,75	52	40
Фиолетовый, 0,41 мкм	0,76	0,000065	0,75—2,3	43	59

Таким образом, при прохождении атмосферы наиболее сильно ослабляется коротковолновая часть спектра. Это является, в частности, причиной покраснения Солнца при восходе и заходе. За счет поглощения в атмосфере доля энергии ультрафиолетовой части спектра уменьшается, а инфракрасной и микроволновой — увеличивается. Например, если взять энергию, приходящуюся на интервал длин волн от 0,3 до 2,3 мкм за 100%, то распределение энергии в солнечном спектре до прохождения атмосферы и у поверхности Земли характеризуется данными, приведенными в таблице выше.

Видение предметов осуществляется посредством отраженного света. Поэтому наиболее подходящим для зрения является интервал вблизи длины волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения, т. е. $\lambda \approx 0,5$ мкм, причем интервал должен быть таким, чтобы на него приходилась значительная часть полной энергии излучения. Этим условиям полностью удовлетворяет видимый диапазон электромагнитных волн. Является вполне естественным, что в результате эволюции именно в этом диапазоне развилась способность человека к зрению.

Однако достаточно много энергии (больше 50%) приходится на микроволновую часть спектра. Поэтому энергетические соображения в принципе не исключают возможности развития способности зрения у человека в этом диапазоне. Тем не менее эта область спектра непригодна для зрения.

Почему микроволновая область непригодна для зрения? Волновые свойства излучения приводят к ухудшению качества зрения с увеличением длины волны, поскольку при этом ухудшается разрешающая способность как оптических приборов (см. § 36), так и глаза. Кроме того, с увеличением длины волны необходимо увеличивать геометрические размеры приемных устройств, в том числе и биологических элементов, связанных со зрением. Это, безусловно, отрицательный фактор в отборе, осуществляемом в процессе эволюции.

Однако главная причина непригодности микроволнового диапазона для зрения связана с корпускулярными свойствами электромагнитного излучения и существованием больших «шумов» в этом диапазоне, которые делают невозможным зрение глазами, имеющими температуру порядка температуры тела человека или животных.

Прежде всего покажем невозможность зрения в микроволновом диапазоне с помощью отраженного солнечного излучения, а затем рассмотрим условия, при которых в микроволновом диапазоне можно видеть предметы («ночное видение»).

Как известно из молекулярной физики, средняя концентрация фотонов, приходящихся на один модуль колебаний (см. § 50) с частотой ω , в равновесном излучении при температуре T задается формулой