

***С.А.Ахманов***

***С.Ю.Никитин***

# ***ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА***

*Рекомендовано Министерством общего и профессионального образования Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению и специальности «Физика»*

*Издательство  
Московского университета  
1998*

УДК 535  
ББК 22.34  
А95

Рецензенты:

Кафедра квантовой электроники  
Московского физико-технического института  
(зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, профессор Г. М. Зверев),  
д-р физ.-мат. наук, профессор В. А. Выслоух.

**АХМАНОВ С. А., НИКИТИН С. Ю.**

А95 Физическая оптика: Учебник — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 656 с.  
ISBN 5-211-03906-8.

Книга написана на основе курса лекций, читавшегося авторами на физическом факультете Московского государственного университета. Излагается электромагнитная теория света, физика излучения света, интерференция, дифракция, когерентность света, физика взаимодействия излучения с веществом. Широко представлены современные проблемы оптики: лазеры, нелинейная оптика, сверхкороткие световые импульсы и сверхсильные световые поля, новые методы оптической спектроскопии, фурье-оптика, голография, оптическая левитация, лазерный термоядерный синтез. Специальные дополнения посвящены теоретическим вопросам, таким как электродинамика излучения, квантовая двухуровневая система, метод спектральных разложений, теория случайных процессов. Приводятся сведения из истории физической оптики.

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

УДК 535  
ББК 22.34

ISBN 5-211-03906-8

© С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин, 1998

© Издательство Московского университета, 1998

# Оглавление

Предисловие .....	9
Часть I	
<b>ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА .....</b>	<b>11</b>
Лекция 1. Световые волны в вакууме .....	12
Электромагнитная природа света. Теория Максвелла (12). Опыты Герца (13). Уравнения Максвелла (14). Волновое уравнение (16). Плоская волна (17). Сферическая волна (18). Модулированные волны и излучение реальных источников света (19). Спектральное разложение светового поля (25). Принцип суперпозиции (27). Литература (28).	
Лекция 2. Поляризация света .....	29
Поперечность световой волны (29). Состояние поляризации плоской гармонической волны. Эллиптическая, круговая, линейная поляризации (30). Немонохроматический свет. Естественная поляризация (38). Экспериментальные методы измерения поляризации (39). Литература (46).	
Лекция 3. Энергия света .....	47
Поток энергии в световой волне. Интенсивность света (47). Световые пучки и импульсы: энергия, мощность, интенсивность (51). Концентрация световой энергии во времени и в пространстве (53). Основные понятия фотометрии (54). Литература (58).	
Лекция 4. Световое давление .....	59
Импульс световой волны (59). Измерение светового давления. Опыты Лебедева (62). Световое давление на классический атом (63). Момент импульса световой волны (65). Фотон (67). Оптическое охлаждение (68). Литература (69).	
Дополнение 1. Скорость света .....	71
Астрономические наблюдения (72). Измерения скорости света в земных условиях (73). Опыты Физо (75). Опыты Майкельсона (77). Современные методы измерения скорости света. Эталоны времени и длины (78). Литература (79).	
Дополнение 2. Тепловое действие света .....	80
Оптический нагрев поглощающей среды (80). Быстрый нагрев поверхности металла лазерным импульсом (81). Лазерный отжиг полупроводников (83). Светореактивное давление (86). Лазерное сверхсжатие вещества. Физические принципы лазерного термоядерного синтеза (86). Литература (87).	
Дополнение 3. Оптическая левитация .....	89
Световое давление в лазерных пучках (89). Оптическая левитация малых прозрачных частиц. Опыты Эшкина (90). Оптическая ловушка (90). Элементы теории оптической левитации (91). Геометрия отражения и преломления (92). Энергетика отражения и преломления (94). Формулы Френеля (95). Силы светового давления (97). Световое давление вдоль пучка (99). Световое давление поперек пучка (101). Численные оценки (102). Литература (103).	

Дополнение 4. Спектральные разложения в оптике .....	104
Метод спектральных разложений (104). Периодические функции. Ряд Фурье. Дискретный спектр (104). Спектральные амплитуды и фазы (106). Непериодические функции. Интеграл Фурье. Сплошной спектр (106). Отрицательные частоты (109). Комплексная запись (109). Косинус-преобразование Фурье (111). Примеры (111). Связь между длительностью импульса и шириной спектра (112). Спектр гармонического колебания (114). Дельта-функция и ее свойства (114). Дельтаобразный импульс (115). Полная и неполная спектральная информация. Спектральная плотность (116). Равенство Парсевала (117). Литература (118).	
Дополнение 5. Из истории физической оптики .....	119
Цитаты из оригинальных работ Галилея, Максвелла, Майкельсона, Герца (119). Литература (124).	
Часть II	
<b>ИЗЛУЧЕНИЕ И ГЕНЕРАТОРЫ СВЕТА .....</b>	<b>127</b>
Лекция 5. Классическая физика излучения .....	128
Опыт Герца (128). Атом как элементарный источник света (128). Классическая модель атома (129). Излучение заряда. Условия излучения (130). Расчет поперечной компоненты поля (132). Строгое решение задачи об излучении диполя (133). Гармонические колебания диполя (134). Полная мощность излучения диполя (135). Радиационное затухание (136). Литература (138).	
Лекция 6. Излучение ансамбля осцилляторов .....	139
От динамики осциллятора к статистике ансамбля (139). Нелазерный источник света: интенсивность, поляризация, диаграмма направленности излучения (139). Статистика излучения независимых осцилляторов (142). Спектр излучения (144). Механизмы уширения спектральной линии (146). Естественное уширение (146). Доплеровское уширение (148). Уширение и сдвиг спектральной линии, обусловленные столкновениями (150). Эффект Дики: столкновительное сужение доплеровской спектральной линии в плотном газе (151). Литература (155).	
Лекция 7. Линейный осциллятор в световом поле .....	156
Поглощение света осциллятором и ансамблем осцилляторов (156). Закон Бугера (159). Спектроскопия поглощения (161). Уменьшение фазовой скорости света в среде. Показатель преломления (162). Неоднородный ансамбль осцилляторов (166). Однородная и неоднородная ширина спектра (167). Возбуждение коротким импульсом. Релаксация энергии и дефазировка (168). Принципы частотной и временной спектроскопии (169). Литература (175).	
Лекция 8. Нелинейный осциллятор в световом поле .....	176
Модель нелинейного осциллятора (176). Метод возмущений (177). Осциллятор с квадратичной нелинейностью. Генерация второй оптической гармоники (178). Осциллятор с кубичной нелинейностью. Зависимость частоты колебаний от амплитуды (178). Фазировка осциллятора внешним полем (180). Эффекты самовоздействия света: самофокусировка световых пучков, самомодуляция импульсов (181). Генерация третьей оптической гармоники (182). Нелинейный резонанс и гистерезис. Оптическая бистабильность (182). Параметрическая генерация света. Параметрический резонанс (184). Комбинационное рассеяние света. Модель нелинейно связанных осцилляторов (187). Неоднородный ансамбль нелинейных осцилляторов. Световое эхо (191). Литература (194).	

<b>Лекция 9. Тепловое излучение</b> .....	195
Основные опытные факты. Методы исследования теплового излучения (195). Излучательная и поглощательная способность тел (196). Равновесное тепловое излучение (198). Закон Кирхгофа (198). Спектральная плотность равновесного теплового излучения (201). Термодинамика равновесного теплового излучения (202). Формула Рэлея–Джинса (207). “Ультрафиолетовая катастрофа” (208). Формула Планка (208). Необходимость квантовых представлений (208). Законы теплового излучения (211). Закон Стефана–Больцмана (211). Закон смещения Вина (212). Примеры (213). Литература (215).	
<b>Лекция 10. Лазер</b> .....	216
Квантовые свойства атомов. Постулаты Бора (216). Световые кванты (216). Спонтанное и вынужденное излучение в квантовой системе (219). Принцип действия и устройство лазера (221). Характеристики лазерного излучения (229). Генерация сверхкоротких световых импульсов (230). Литература (236).	
<b>Дополнение 6. Электродинамика излучения</b> .....	237
Потенциалы электромагнитного поля (237). Излучение точечного заряда (239). Излучение диполя в дальней зоне (243). Излучение ротатора (246). Излучение квадруполь (248). Электрическое поле заряда, движущегося прямолинейно и равномерно (253). Литература (256).	
<b>Дополнение 7. Элементы теории вероятностей</b> .....	257
Случайные события и вероятность (257). Случайная величина (258). Дискретные случайные величины (258). Статистическое среднее и среднее арифметическое (261). Распределение Пуассона (262). Непрерывные случайные величины (262). Плотность вероятности (263). Распределение Гаусса (264). Центральная предельная теорема (265). Двумерная плотность вероятности (265). Преобразование распределений вероятности (266). Литература (267).	
<b>Дополнение 8. Теория случайных процессов</b> .....	268
Случайный процесс (268). Плотность вероятности, среднее значение и дисперсия случайного процесса (270). Двумерная плотность вероятности и корреляционная функция случайного процесса (270). Стационарные случайные процессы (270). Среднее значение, дисперсия и корреляционная функция стационарного случайного процесса (271). Многомерная плотность вероятности и многомерные корреляционные функции (273). Статистическое усреднение и усреднение по времени (274). Спектры случайных процессов (276). Связь спектральной плотности и корреляционной функции стационарного случайного процесса. Теорема Винера–Хинчина (278). Преобразование шума линейной системой (281). Литература (281).	
<b>Дополнение 9. Модели строения атома</b> .....	282
Модель Томсона (282). Модель Бора (283). Литература (286).	
<b>Дополнение 10. Квантовая двухуровневая система и классический осциллятор</b> .....	287
Двухуровневая система (287). Состояние квантовой системы (287). Физические величины и операторы (288). Измеряемые величины (288). Уравнение Шредингера (289). Гамильтониан (289). Изолированный атом (289). Частица в потенциальной яме (290). Гармонический осциллятор (290). Атом в переменном внешнем поле (292). Матрица плотности (293). Уравнение для матрицы плотности (294). Учет релаксации (296). Двухуровневая система	

в резонансном внешнем поле (296). Система уравнений для поляризации, населенностей и поля (298). Двухуровневая квантовая система и классический осциллятор (299). Литература (300).

Дополнение 11. Из истории физической оптики .....	301
Цитаты из оригинальных работ Планка и Меймана (301). Литература (304).	

### Часть III

<b>ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, ДИФРАКЦИЯ, КОГЕРЕНТНОСТЬ .....</b>	<b>305</b>
--	------------

<b>Лекция 11. Интерференция света .....</b>	<b>306</b>
---	------------

Интерференционные явления в оптике (306). Опыт Юнга (307). Интерферометр Майкельсона (309). Интерференция монохроматических волн (309). Интерференция немонахроматического света (315). Интерференция случайной световой волны (317). Многолучевая интерференция (323). Интерферометр Фабри–Перо (326). Собственные моды и добротность лазерного резонатора (329). Литература (331).

<b>Лекция 12. Когерентность света .....</b>	<b>332</b>
---	------------

Временная когерентность света. Время когерентности. Длина когерентности (332). Пространственная когерентность света и радиус когерентности (335). Модель случайного светового поля (335). Расчет интерференционной картины в интерферометре Юнга (337). Измерение когерентности. Когерентность излучения реальных источников света (340). Литература (346).

<b>Лекция 13. Дифракция света .....</b>	<b>347</b>
---	------------

Дифракция как проявление волновой природы света. Основные опытные факты (347). Опыт Гримальди (348). Принцип Гюйгенса (349). Принцип Гюйгенса–Френеля (349). Дифракционный интеграл Френеля (350). Зоны Френеля (353). Построение дифракционных картин графическим способом (356). Дифракция на краю экрана (360). Дифракционная длина светового пучка. Ближняя и дальняя зоны дифракции (366). Дифракционная расходимость пучка в дальней зоне (368). Фокусировка света как дифракционное явление (370). Теория дифракции Кирхгофа (371). Литература (377).

<b>Лекция 14. Дифракция слаборасходящихся пучков .....</b>	<b>378</b>
--	------------

Приближение Френеля в теории дифракции (378). Интегралы Френеля и спираль Корню (380). Дифракция Френеля на одномерных структурах (380). Дифракция на краю экрана (380). Дифракция на щели (382). Дифракция Френеля на двумерных структурах (385). Дифракция на квадратном отверстии (385). Дифракция на круглом отверстии (386). Дифракция гауссова пучка (389). Литература (390).

<b>Лекция 15. Дифракция в дальней зоне .....</b>	<b>391</b>
--	------------

Формирование устойчивой картины дифракции в дальней зоне (391). Дифракция Фраунгофера как пространственное преобразование Фурье (393). Дифракция Фраунгофера на одномерных структурах. Дифракция на щели (395). Дифракция Фраунгофера на двумерных структурах (397). Дифракция на прямоугольном отверстии (399). Дифракция на круглом отверстии (400). Дифракция гауссова пучка (403). Литература (404).

<b>Лекция 16. Дифракция на периодических структурах .....</b>	<b>405</b>
---	------------

Дифракционные решетки (405). Физика дифракции света на решетке (405). Уравнение дифракционной решетки (406). Математическое описание дифракции плоской волны на решетке (413). Синусоидальная решетка (414).

Ограниченная синусоидальная решетка (414). Прямоугольная амплитудная решетка (415). Дифракция на двумерных периодических структурах (418). Дифракция на трехмерных периодических структурах. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах (421). Рентгеновский структурный анализ (423). Литература (424).	
<b>Лекция 17. Анализ, преобразование и синтез световых полей</b> . . . . .	426
Спектральное описание пространственной структуры поля (426). Линза как элемент, выполняющий пространственное преобразование Фурье (430). Формирование оптического изображения. Теория Аббе (434). Опыты Аббе-Портера (436). Метод темного поля (438). Метод фазового контраста (439). Разрешающая способность микроскопа и телескопа (441). Голография. Запись и восстановление светового поля (444). Дифракционная решетка и интерферометр Фабри-Перо как спектральные приборы. Разрешающая способность и область дисперсии (446). Фурье-спектроскопия (452). Спектроскопия оптического смещения (452). Литература (454).	
<b>Дополнение 12. Зонная пластинка Френеля и линза</b> . . . . .	456
Зонная пластинка Френеля (456). Растровая фокусирующая оптика (458). Тонкая сферическая линза (459).	
<b>Дополнение 13. Дифракция и фокусировка гауссова пучка</b> . . . . .	462
Параболическое уравнение. Приближение квазиоптики (462). Решение параболического уравнения (463). Распространение и дифракция гауссова пучка (464). Фокусировка гауссова пучка (467). Размеры фокальной области линзы (468). Критерий применимости приближения квазиоптики (469). Литература (470).	
<b>Дополнение 14. Из истории физической оптики</b> . . . . .	471
Цитаты из оригинальных работ Габора, Лейта и Упатниекса (471). Литература (473).	
<b>Часть IV</b>	
<b>СВЕТ И ВЕЩЕСТВО</b> . . . . .	475
<b>Лекция 18. Физика взаимодействия света с веществом</b> . . . . .	476
Модель сплошной среды. Уравнения Максвелла (476). Материальные уравнения (476). Классификация сред (479). Плоская монохроматическая световая волна в линейной однородной изотропной среде (480). Комплексная диэлектрическая проницаемость, линейная оптическая восприимчивость и комплексный показатель преломления среды (481). Классическая осцилляционная модель среды (485). Литература (487).	
<b>Лекция 19. Световые волны в линейной изотропной среде</b> . . . . .	488
Дисперсия и поглощение света в линейной изотропной среде (488). Факты, подтверждающие теорию дисперсии Лоренца (493). Методы изучения дисперсии и поглощения света. Оптическая спектроскопия (498). Распространение светового импульса в диспергирующей среде (501). Литература (510).	
<b>Лекция 20. Оптические явления на границе раздела сред</b> . . . . .	511
Отражение и преломление света на границе раздела (511). Граничные условия для электромагнитного поля (512). Геометрия отражения и преломления. Закон Снеллиуса (513). Полное внутреннее отражение (514). Энергетика отражения и преломления. Формулы Френеля (515). Эффект Брюстера (519). Изменение фазы световой волны при отражении и преломлении (521). Отражение света при нормальном падении (521). Просветление	

оптики (522). Отражение света при наклонном падении (523). Отражение света от поверхности металла (524). Литература (526).	
<b>Лекция 21. Оптика анизотропных сред</b> .....	<b>527</b>
Анизотропные материалы. Основные эффекты кристаллооптики (527). Структура световой волны в анизотропном кристалле (529). Материальное уравнение анизотропной среды (531). Классификация кристаллов (535). Собственные состояния поляризации световой волны в анизотропном кристалле (536). Обыкновенная и необыкновенная волны (541). Двойное лучепреломление света на границе с анизотропной средой (545). Получение и анализ поляризованного света (549). Интерференция поляризованных лучей (556). Наведенная анизотропия (557). Литература (559).	
<b>Лекция 22. Нелинейная оптика</b> .....	<b>560</b>
Основные эффекты нелинейной оптики. Механизмы оптической нелинейности (560). Нарушение принципа суперпозиции для сильных световых волн в среде (565). Материальное уравнение нелинейной среды (566). Нелинейная поляризация (568). Нелинейная восприимчивость (569). Классическая модель нелинейной среды — ансамбль нелинейных осцилляторов (572). Оптическое детектирование (578). Литература (578).	
<b>Лекция 23. Теоретическая нелинейная оптика</b> .....	<b>581</b>
Генерация второй оптической гармоники (581). Вынужденное комбинационное рассеяние света (591). Самофокусировка света (598). Литература (601).	
<b>Дополнение 15. Параметрический генератор света</b> .....	<b>602</b>
Литература (604).	
<b>Дополнение 16. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов</b> .....	<b>605</b>
Предельно короткие импульсы света и сверхсильные световые поля (605). Генерация фемтосекундных световых импульсов (606). Новое поколение твердотельных фемтосекундных лазеров (611). Фемтосекундные технологии (611). Фемтосекундные лазерные импульсы в спектроскопии (612). Управление амплитудой и фазой молекулярных колебаний с помощью фемтосекундных лазерных импульсов (616). Новые направления исследований (625). Литература (630).	
<b>Дополнение 17. Нелинейная динамика световых полей</b> .....	<b>633</b>
Самоорганизация светового поля в нелинейных системах с обратной связью (633). Оптическая синергетика (637). Оптическое моделирование нейронных сетей (638). Литература (640).	
<b>Дополнение 18. Из истории физической оптики</b> .....	<b>641</b>
Цитаты из оригинальных работ Франкена, Бломбергера, Ахманова, Хохлова (641). Литература (646).	
<b>Предметный указатель</b> .....	<b>647</b>