

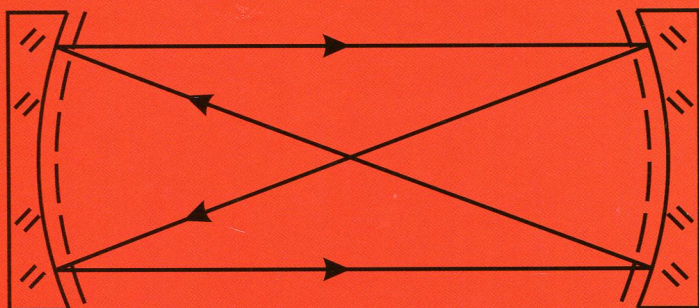
МФТИ

СЕРИЯ «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА»

Л. Н. КУРБАТОВ

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО
ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА



Л. Н. КУРБАТОВ

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

видимого и инфракрасного диапазонов спектра

Издание 2-е, исправленное и дополненное

Рекомендовано в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200400 — «Оптотехника», 200500 — Лазерная техника и лазерные технологии, 200700 — «Фотоника и оптоинформатика», 010900 — «Прикладные математика и физика»



Москва

ФИЗМАТКНИГА

2013

ББК 32.86
К93
УДК 681.782.743

КУРБАТОВ Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Физматкнига, 2013. — 400 с. ISBN 978-5-89155-221-0.

Учебное пособие написано на основе курса лекций, многие годы читавшихся автором студентам Московского физико-технического института (государственного университета), и посвящено рассмотрению вопросов, связанных с основами работы фотоэлектронных устройств, описанию и применению различных оптических эффектов, а также рассмотрению вопросов нелинейной оптики и оптической гироскопии. В ней суммированы сведения по применению электромагнитного излучения оптического диапазона к проблемам регистрации оптических сигналов, тепловидению и волоконно-оптической связи. Значительное внимание уделяется проблеме флуктуаций, определяющих предел обнаружительной способности. Рассматриваются применения дифракции для оптической фильтрации изображений, электрооптические модуляторы света и применения магнитооптического эффекта, а также лазерная гироскопия на основе эффекта Саньяка.

Для студентов и аспирантов физических, физико-технических и оптических специальностей вузов, а также специалистов, занимающихся разработкой различных оптико-электронных и оптико-волоконных систем, систем наблюдения в условиях темноты (ночное видение) и многих других.

Табл. 4. Ил. 185.

Интернет-магазин специализированной литературы www.fizmatkniga.ru

ISBN 978-5-89155-221-0



© Физматкнига, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ ИЗДАТЕЛЯ	8
Л.Н.КУРБАТОВ	9
ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА	17
ГЛАВА 1	
ПРИРОДА СВЕТА. РАВНОВЕСНОЕ ТЕПЛОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ФОРМУЛА ПЛАНКА. ФЛУКТУАЦИИ ТЕПЛОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ТЕПЛОЙ ШУМ. ПОНЯТИЕ О ТЕПЛОВИДЕНИИ.	18
§ 1.1. Введение	18
§ 1.2. Равновесное тепловое излучение. Фотоны	19
§ 1.3. Формула Планка	21
§ 1.4. Флуктуации теплового излучения	25
§ 1.5. Тепловой шум	27
§ 1.6. Понятие о тепловидении (термографии)	30
ГЛАВА 2	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СВЕТОВОДЕ.	38
§ 2.1. Плоские электромагнитные волны. Формула Максвелла	38
§ 2.2. Электромагнитные волны в световодах	41
§ 2.3. Волоконно-оптические линии связи и другие применения световодов.	44
ГЛАВА 3	
КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИЙ СВЕТ.	49
§ 3.1. Определение термина «квазимонохроматический свет»	49
§ 3.2. Естественная ширина спектральной линии	51
§ 3.3. Доплеровское уширение	53

§ 3.4. Спектры цугов волн	54
§ 3.5. Уширение спектральных линий при столкновениях атомов в газах	55
§ 3.6. Спонтанное и стимулированное излучение	57
§ 3.7. Коэффициенты поглощения и усиления	59
§ 3.8. Квантовый усилитель бегущей волны	61

ГЛАВА 4

ЛАЗЕРЫ (КРАТКИЙ ОБЗОР) 63

§ 4.1. Принцип действия лазера	63
§ 4.2. Краткий обзор некоторых типов лазеров	66

ГЛАВА 5

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ..... 73

§ 5.1. Энергетические зоны в твердом теле. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетическая диаграмма полупроводника	73
§ 5.2. Легированные полупроводники. Формула для произведения концентраций (плотностей) носителей заряда	75
§ 5.3. Эффективная масса носителей заряда. Подвижность и коэффициент диффузии. Процессы рекомбинации и время жизни неравновесных носителей заряда	77
§ 5.4. Распределение Ферми. Энергия (уровень) Ферми. Условие равновесия	82
§ 5.5. Кристалл полупроводника с p - n -переходом. Контактная разность потенциалов. Толщина области пространственного заряда	88
§ 5.6. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) кристалла с p - n -переходом (полупроводникового диода)	92
§ 5.7. Флуктуации в полупроводниках	97
§ 5.8. Излучательная рекомбинация. Спектр рекомбинационного излучения	102

ГЛАВА 6

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ 107

§ 6.1. Общие сведения о полупроводниковых лазерах	107
§ 6.2. Квазиуровни Ферми. Условие инверсии для полупроводников	111
§ 6.3. Условие перехода к генерации. Двойная гетероструктура	113
§ 6.4. Технология и примеры конструкции полупроводниковых лазеров	116
§ 6.5. Применение полупроводниковых лазеров	122

ГЛАВА 7

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА. ОБЩИЙ ОБЗОР	126
§ 7.1. Введение	126
§ 7.2. Краткий обзор классов и типов приемников излучения оптического диапазона. Многоэлементные фотоприемники. Фотоприемные устройства	127
§ 7.3. Материалы, используемые при изготовлении фоточувствительных элементов фоторезисторов и фотодиодов. Краткие сведения о технологии	134
§ 7.4. Конструкция фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения (ФЭПП). Методы охлаждения	141
§ 7.5. Прием модулированного оптического сигнала. Особенности электронного тракта ФП и ФПУ	147

ГЛАВА 8

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОДИОДОВ (ФД) И ФОТОРЕЗИСТОРОВ. МОЩНОСТЬ, ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ШУМУ. ОБНАРУЖИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ФОТОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ. ГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЕМ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.....	152
§ 8.1. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотодиода. Структура фотодиода. Лавинный фотодиод	152
§ 8.2. Фоторезистор с монополярной фотопроводимостью. Кoeffициент фотоэлектрического усиления	157
§ 8.3. Шумы фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения (ФЭПП). Мощность, эквивалентная шуму. Обнаружительная способность	164
§ 8.4. Гетеродинный (когерентный) прием излучения оптического диапазона	178

ГЛАВА 9

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ.....	183
§ 9.1. Электронно-оптические преобразователи	183
§ 9.2. Полупроводниковые фотоматрицы для телевидения и тепловидения ..	189
§ 9.3. Фотоматрицы для ИК-области спектра	197

ГЛАВА 10

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА. МНОГОЛУЧЕВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ	203
§ 10.1. Закон интерференции квазимонохроматического света	203
§ 10.2. Теорема Ван-Циттерта-Цернике	206
§ 10.3. Применение теоремы Ван-Циттерта-Цернике к источнику в виде равномерно светящегося круглого диска	208

§ 10.4. Звездный интерферометр Майкельсона и измерение угловых размеров звезд	212
§ 10.5. Радиointерферометр	213
§ 10.6. Фурье-спектроскопия	214
§ 10.7. Многолучевая интерференция	217
§ 10.8. Интерферометр Фабри–Перо как спектральный прибор и резонатор ..	220
§ 10.9. Волны в конфокальном резонаторе	223
§ 10.10. Антиотражающие покрытия (просветление оптики)	225
§ 10.11. Интерференционное зеркало	228
§ 10.12. Интерференционный светофильтр	232
§ 10.13. К вопросу о гетеродинном приеме излучения оптического диапазона ..	233

ГЛАВА 11

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА 235

§ 11.1. Явление дифракции	235
§ 11.2. Принцип Гюйгенса–Френеля. Зоны Френеля	236
§ 11.3. Теория Кирхгофа	239
§ 11.4. Дифракционные потери в резонаторах Фабри–Перо	242
§ 11.5. Дифракция Френеля и Фраунгофера	246
§ 11.6. Дифракция на круглом отверстии. Разрешающая способность объектива	249
§ 11.7. Функция передачи модуляции (частотно-контрастная характеристика, оптическая передаточная функция)	253
§ 11.8. Дифракционная природа изображения	255
§ 11.9. Понятие об оптической фильтрации	259
§ 11.10. Дифракция света на ультразвуковых волнах и ее применения	264

ГЛАВА 12

ПОГЛОЩЕНИЕ И ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ 270

§ 12.1. Электромагнитные волны в проводящей среде. Закон поглощения света	270
§ 12.2. Коэффициент отражения от проводящей среды	272
§ 12.3. Классическая теория дисперсии	273
§ 12.4. Частные случаи дисперсионных формул	277

ГЛАВА 13

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КРИСТАЛЛООПТИКИ. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА 290

§ 13.1. Плоские волны в анизотропной среде	290
§ 13.2. Закон Френеля. Двупреломление	291
§ 13.3. Оптические оси кристалла	292
§ 13.4. Кристалл исландского шпата. Пластинка $1/4$ длины волны	295
§ 13.5. Коэффициент пропускания системы поляризатор–кристаллическая пластинка–анализатор	298

§ 13.6. Эллипсоид Френеля	299
§ 13.7. Электрооптический эффект Поггеля	300
§ 13.8. Применения электрооптического затвора в лазерной физике и технике	305

ГЛАВА 14

ПРОДОЛЬНЫЙ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ..... 314

§ 14.1. Основные свойства эффекта	314
§ 14.2. Объяснение эффекта циркулярным магнитным дупреломлением	316
§ 14.3. Вычисление разности показателей преломления	318
§ 14.4. Практические применения эффекта Фарадея	321

ГЛАВА 15

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ..... 325

§ 15.1. Общие сведения о нелинейных оптических процессах	325
§ 15.2. Генерация второй гармоники	329
§ 15.3. Нелинейная оптическая среда в бигармоническом поле. Преобразование ИК-изображений в видимые	332
§ 15.4. Обращение волнового фронта и «волшебное зеркало»	334
§ 15.5. Применения обращения волнового фронта	336

ГЛАВА 16

ЭФФЕКТ САНЬЯКА И ОПТИЧЕСКАЯ ГИРОСКОПИЯ..... 339

§ 16.1. Эффект Саньяка	339
§ 16.2. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ)	342
§ 16.3. Квантовый (лазерный) оптический гироскоп (КОГ)	345

ПРИЛОЖЕНИЕ I..... 349

ПРИЛОЖЕНИЕ II..... 357

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 397