

А. Ф. Иванов

ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



**ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ
И ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

А. Ф. Иванов

Снежинск
2022

УДК 621.375.826
И20

Иванов, А. Ф.

И20 Физика лазеров и лазерное излучение. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2022. – 400 с.: табл., ил.

ISBN 978-5-6047962-1-4

В центре внимания данной работы физические явления, определяющие работу лазеров и свойства лазерного излучения. Более детально рассматриваются данные вопросы применительно к полупроводниковым, оптоволоконным и твердотельным лазерам. Книга ориентирована, прежде всего, на разработчиков оптоволоконных и твердотельных лазеров с диодной накачкой и может рассматриваться в качестве своеобразного теорминимума для данного круга специалистов: как физиков, так и инженеров.

УДК 621.375.826

Ответственный за выпуск	Т. Б. Пряхина
Подготовка оригинал-макета	О. В. Завьялова
Компьютерная подготовка обложки	О. Ю. Брылеева
Корректор	Н. И. Потеряхина

Подписано в печать 22.08.2022.
Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 32,25.
Тираж 150 экз. Заказ № 713.

Отпечатано в соответствии с оригинал-макетом,
подготовленным информационно-издательской группой РФЯЦ – ВНИИТФ,
в АО «ИПП «Уральский рабочий»
620990, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 13
<http://www.uralprint.ru>, e-mail: sales@uralprint.ru

ISBN 978-5-6047962-1-4

© ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»
им. академ. Е. И. Забабахина, 2022

Оглавление

Введение	11
Глава 1. Уравнения Максвелла и электромагнитные волны	13
1.1. Уравнения Максвелла в среде	13
1.2. Электромагнитные волны. Оптический диапазон. Приближение волнового уравнения	14
1.3. Волны и волновая модель движения	16
Глава 2. Распространение оптического излучения в диэлектрических структурах. Интерференция и интерферометры	32
2.1. Отражение и преломление световых волн	32
2.2. Изменение фазы на границе раздела	37
2.3. Интерференционные явления при многократном отражении	38
2.4. Интерферометр Фабри-Перо	40
2.5. Открытые резонаторы	41
2.6. Интерференция в слоистых диэлектрических структурах	49
2.7. Однопроходные интерферометры Майкельсона, Твимана-Грина, Маха-Цендера	50
Глава 3. Дифракция электромагнитных волн. Фурье оптика	56
3.1. Принцип Гюйгенса-Френеля для электромагнитных волн	56
3.2. Приближение Кирхгофа	57
3.3. Зоны Френеля	57
3.4. Фурье оптика. Примеры Фурье преобразований периодических и непериодических функций	61
3.5. Двумерное Фурье преобразование	64
3.6. Распространение и дифракция лазерного излучения	64
3.7. Дифракция на транспаранте	64
3.8. Разложение по плоским волнам и двумерное преобразование Фурье	65
3.9. Соотношение неопределенности	67
3.10. Преобразование Фурье, осуществляемое тонкой идеальной линзой	67
3.11. Транслятор (оптическая схема Катрона)	68
3.12. Пространственная фильтрация излучения. Транслятор в качестве пространственного фильтра	69
3.13. Физико-математическое моделирование распространения когерентного излучения в оптических схемах с трансляцией и пространственной фильтрацией	70

Глава 4. Матричный метод расчета многокомпонентных оптических систем и гауссовские пучки	74
4.1. Основные определения	74
4.2. Матрицы передачи типичных оптических элементов	77
4.3. Матрица передачи открытого резонатора со сферическими зеркалами	78
4.4. Закон ABCD. Расчет параметров гауссовского пучка в многокомпонентной оптической системе	79
4.5. Критерий устойчивости открытого резонатора	84
Глава 5. Расходимость и качество лазерного излучения. Коррекция искажений волнового фронта в многокомпонентных лазерах	89
5.1. Параметры для оценки искажения волнового фронта	89
5.2. Методы исправления деформаций волнового фронта	94
Глава 6. Оптические волноводы. Моды оптических волноводов	101
6.1. Оптические волноводы. Основные понятия	101
6.2. Моды планарного оптического волновода	105
6.3. Моды прямоугольного цилиндрического оптического волновода	108
6.4. Моды круглого цилиндрического оптического волновода	108
6.5. Число мод в оптическом волноводе	109
6.6. Одномодовые волноводы	109
Глава 7. Лучевая теория оптических волноводов.	111
7.1. Планарные оптические волноводы.	112
7.2. Круговые цилиндрические ОВ со ступенчатым профилем	125
7.3. Круговые цилиндрические ОВ с градиентным профилем	129
7.4. ОВ с некруглым сечением	135
7.5. Нецилиндрические ОВ, конические переходы.	141
Глава 8. Компоненты оптических волноводов.	146
8.1. Потери при стыке одномодовых оптических волноводов.	146
8.2. Ввод излучения в оптические волноводы	148
8.3. Волоконные и дискретные компоненты оптических волноводов.	162
Глава 9. Оптические волокна с сохранением поляризации и микроструктурированные оптоволокна	168
9.1. Оптические волокна с сохранением поляризации	168
9.2. Микроструктурированные оптические волноводы (МВ)	171

Глава 10. Источники электромагнитного излучения.	
Оптические генераторы и усилители	182
10.1. Источники электромагнитного излучения	182
10.2. Излучение абсолютно черного тела. Квантование электромагнитного излучения	183
10.3. Энергетические и световые параметры электромагнитного излучения	185
10.4. Вынужденное излучение и инверсная населенность. Принцип работы лазера и оптического усилителя	188
10.5. Особенности усиления и генерации лазерных импульсов в твердотельных лазерах	192
10.6. Однородное и неоднородное уширение лазерных переходов	192
10.7. Система скоростных уравнений, насыщение усиления	194
10.8. Приближенные формулы учета насыщения при усилении	197
10.9. Порог генерации лазеров	198
10.10. Режимы генерации твердотельных лазеров	199
10.11. Фемтосекундные лазеры	202
Глава 11. Твердотельные лазеры и усилители.	211
11.1. Типы активных элементов твердотельных лазеров и усилителей.	211
11.2. Оптическая накачка твердотельных лазеров.	212
11.3. Учет суперлюминесценции	215
11.4. Эффективность съема энергии инверсии АЭ	216
11.5. Физико-математическое моделирование твердотельных лазеров и связь с экспериментом	219
11.6. Формирование дифракционно-ограниченных лазерных пучков с помощью пространственных фильтров. Примеры	223
11.7. Ограничение апертуры гауссовских пучков. Расходимость ограниченных гауссовских пучков.	234
11.8. Учет самофокусировки в каскадах с трансляцией и пространственной фильтрацией лазерного излучения. Примеры	240
11.9. Пространственная фильтрация	245
Глава 12. Оптоволоконные лазеры	248
12.1. Активные среды	249
12.2. Способы накачки волоконных лазеров	252
12.3. Мощные волоконные лазеры	254
Глава 13. Волновая модель движения и квантовая механика.	
Слоистые квантово-размерные структуры	261
13.1. Движение по траектории и волновое движение	261

13.2. Волна как модель движения	265
13.3. Гипотеза де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц	266
13.4. Волновая функция свободного электрона. Статистический смысл волновой функции	267
13.5. Соотношения неопределенностей Гейзенберга	269
13.6. Уравнение Шредингера	271
13.7. Бесконечный энергетический барьер	273
13.8. Энергетический барьер конечной толщины. Туннельный эффект	277
13.9. Квантовая яма конечной и бесконечной глубины, квантовый осциллятор, квантовая яма сложной формы	281
13.10. Физические явления при объединении квантовых ям	291
13.11. Интерференционные явления в слоистых квантово-размерных периодических структурах. Зоны и минизоны	293
Глава 14. Основы зонной теории кристаллов и физики полупроводниковых приборов	297
14.1. Основные типы квазичастиц	297
14.2. Физика примесной проводимости в полупроводниковых кристаллах. Эффективная масса электрона.	298
14.3. Распределение квантовых состояний электронов внутри энергетической зоны	306
14.4. Контактные явления на границах проводящих сред. Контактная разность потенциалов	310
Глава 15. Полупроводниковые лазеры и усилители	312
15.1. Принцип действия полупроводниковых лазеров	312
15.2. Технологии изготовления мощных инжекционных лазерных диодов для накачки твердотельных и оптоволоконных лазеров	327
15.3. Приборные характеристики инжекционных лазеров	331
15.4. Конструктивные особенности и использование ЛД, ЛЛД и МЛД	336
15.5. Схемы ввода излучения полупроводниковых лазеров в оптические волокна. Модули с оптоволоконным выходом	344
Глава 16. Когерентность и корреляционные функции	347
16.1. Синхронность, когерентность, коррелированность	347
16.2. Интерференция излучения частично коррелированных источников	350

16.3. Общие свойства функций когерентности. Временная и пространственная когерентности	354
16.4. Временная когерентность. Временная когерентность люминесцентных источников излучения .	356
16.5. Пространственная когерентность	358
16.6. Когерентность излучения лазеров и функции когерентности	362
Список использованной литературы	365
Список рекомендуемой литературы	369
Приложение 1. Фокусировка линзой. Символьный расчет. Программа в MATLAB	371
Приложение 2. Численное моделирование многокомпонентного лазерного усилительного канала с трансляцией и пространственной фильтрацией. Программы в MATLAB	377
Предметный указатель	389