

УДК 621.375.8:535.374
ББК 32.86-53
Х69

Ходгсон Н., Вебер Х.
Х69 Лазерные резонаторы и распространение пучков. Основы, современные понятия и прикладные аспекты / пер. с англ. к.ф.-м.н. С. А. Бордзиловского; под науч. ред. С. Г. Струц. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 744 с.

ISBN 978-5-97060-176-1

В книге изложены методы анализа лазерных резонаторов – матричный, геометрической оптики и интегрального уравнения. Рассмотрены резонаторы различных типов, обсуждены вопросы построения их схем, обеспечивающих требуемые свойства лазерного излучения. Описаны методы измерений параметров лазерных излучателей и пучков.

Издание предназначено для специалистов, занимающихся разработкой, конструированием и применением лазеров, а также для преподавателей и студентов соответствующих специальностей технических вузов.

УДК 621.375.8:535.374
ББК 32.86-53

All rights reserved. This work may not be translated or copied in whole or in part without the written permission of the publisher (Springer Science+Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA), except for brief excerpts in connection with reviews or scholarly analysis. Use in connection with any form of information storage and retrieval, electronic adaptation, computer software, or by similar or dissimilar methodology now known or hereafter developed is forbidden.

The use in this publication of trade names, trademarks, service marks, and similar terms, even if they are not identified as such, is not to be taken as an expression of opinion as to whether or not they are subject to proprietary rights.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-0387-40078-5 (анг.)

ISBN 978-5-97060-176-1 (рус.)

© Springer Science+Business Media, Inc., 2005

© Перевод, Издательский дом «Додэка-XXI», 2012

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2017

Содержание

Список сокращений и символов.....	12
Предисловие	20
Предисловие научного редактора	23
Введение	25

▼ Часть I

Электромагнитное поле	30
Глава 1. Геометрическая оптика	31
1.1. Общие аспекты.....	31
1.2. Лучевые матрицы	33
1.2.1. Одномерные оптические системы.....	33
1.2.2. Элементы матрицы и теорема Лиувилля	42
1.2.3. Нарушение ориентации оптических элементов	51
1.2.4. Двухмерные оптические системы	53
1.2.5. Вращение и перекося.....	56
1.2.6. Закон ABCD в геометрической оптике	64
1.2.7. Собственные решения и собственные значения.....	67
1.3. Оптические резонаторы и лучевые матрицы	69
Глава 2. Волновая оптика	74
2.1. Принцип Гюйгенса и интеграл Кирхгофа.....	74
2.2. Дифракция	78
2.2.1. Прямоугольное отверстие	78
2.2.2. Круглое отверстие	84
2.3. Интеграл Коллинза	87
2.3.1. Одномерные оптические системы	87
2.3.2. Двухмерные оптические системы	89
2.4. Интеграл Коллинза и исчезающие элементы лучевой матрицы	91

6 Содержание

2.4.1. Условие построения изображения, $B = 0$	91
2.4.2. Преобразование Фурье при $A = 0$	92
2.4.3. Свойства Фурье-образов	93
2.5. Гауссовы пучки	96
2.5.1. Гауссовы пучки в одномерных оптических системах	96
2.5.2. Эллиптические гауссовы пучки	106
2.6. Моменты интенсивности и распространение пучка	111
2.6.1. Стигматические и простые астигматические пучки	111
2.6.2. Обобщенные астигматические пучки	117
2.6.3. Качество пучка	121
2.7. Дифракционная теория оптических резонаторов	123
2.7.1. Интегральное уравнение для распределения электрического поля	123
2.7.2. Гауссов пучок как основная мода резонатора	125
2.8. Пучки, свободные от дифракции	128
Глава 3. Поляризация	133
3.1. Общие аспекты	133
3.2. Матрицы Джонса	136
3.2.1. Определение	136
3.2.2. Матрицы для поляризационной оптики, повернутой вокруг оси распространения луча	141
3.2.3. Комбинирование нескольких поляризационных оптических систем	142
3.3. Собственные состояния поляризации	146
3.4. Поляризация в оптических резонаторах	147
3.4.1. Собственные состояния матрицы Джонса для кругового обхода пучка	147
3.4.2. Поляризационные и дифракционные интегралы	149
3.5. Деполаризаторы	150

▼ Часть II

Основные свойства оптических резонаторов	153
Глава 4. Резонатор Фабри–Перо	154
4.1. Общие аспекты	154
4.2. Интерферометр Фабри–Перо	156
4.2.1. Пассивный интерферометр Фабри–Перо	156
4.2.2. Применения ИФП	162
4.2.3. ИФП с усиливающей средой – лазерный резонатор	165
4.3. Оптические покрытия	171
4.3.1. Матричный метод проектирования покрытия	171
4.3.2. Четвертьволновые системы	176
4.3.3. Материалы покрытий и методы их нанесения	180

▼ Часть III

Пассивные открытые резонаторы	183
Глава 5. Устойчивые резонаторы	184
5.1. Общие аспекты.....	184
5.2. Неограниченные устойчивые резонаторы	185
5.2.1. Поперечная структура мод	187
5.2.2. Резонансные частоты	198
5.2.3. TEM ₀₀ -мода	200
5.2.4. Моды высоких порядков	207
5.2.5. Фокусируемость и качество пучка	215
5.3. Устойчивые резонаторы с апертурным ограничением	224
5.3.1. Зеркало, ограниченное одной апертурой	226
5.3.2. Апертурное ограничение обоих зеркал	230
5.4. Чувствительность к разъюстировке	235
5.4.1. Зеркало, ограниченное одной апертурой	238
5.4.2. Два апертурно ограниченных зеркала	241
Глава 6. Резонаторы на границах устойчивости	245
6.1. Резонаторы с $g_1 g_2 = 1$	245
6.2. Резонаторы с одним нулевым g-параметром	248
6.3. Конфокальный резонатор	250
Глава 7. Неустойчивые резонаторы	259
7.1. Общие аспекты.....	259
7.2. Описание неустойчивых резонаторов в рамках геометрической оптики	261
7.2.1. Распространение пучка	261
7.2.2. Фокусируемость	267
7.3. Дифракционная теория неустойчивых резонаторов	276
7.3.1. Модовая структура, качество пучка и потери	276
7.3.2. Применения неустойчивых резонаторов	282
7.4. Чувствительность к разъюстировке	283
7.5. Неустойчивые резонаторы в случае внеосевой геометрии	289
7.6. Неустойчивые резонаторы с однородным выходом	294
7.7. Неустойчивые резонаторы на зеркалах с переменной отражательной способностью	296
7.7.1. Свойства резонатора	296
7.7.2. Изготовление VRM-зеркал	300
7.7.3. Лазерные свойства неустойчивых резонаторов на VRM-зеркалах	303
Глава 8. Резонаторы с внутренними оптическими элементами	308
8.1. Резонаторы с внутренними линзами	308
8.2. Резонаторы с поляризующими элементами	311
8.2.1. Резонатор с «твистующей» модой	313
8.2.2. Резонаторы с регулируемым выходом	314
8.2.3. Резонатор с ячейкой Поккельса	315
8.2.4. Резонаторы с радиальными двулучепреломляющими элементами	319
8.2.5. Резонаторы с азимутальными двулучепреломляющими элементами	320

8.2.6. Резонаторы с радиально-азимутальными двулучепреломляющими элементами	322
8.2.7. Компенсация радиально-азимутального двулучепреломления	325

▼ Часть IV

Открытые резонаторы с усилением	330
---------------------------------------	-----

Глава 9. Активная среда	331
-------------------------------	-----

9.1. Общие аспекты	331
9.2. Эффективная длина резонатора	332
9.3. Усиление и эффективность использования накачки	334
9.4. Балансные уравнения	339
9.5. Уширение линии и выгорание провалов в контуре усиления	345
9.5.1. Однородное и неоднородное уширение линии	345
9.5.2. Пространственное выгорание провалов усиления	350
9.6. Спектральное распределение усиления и затягивание частоты	352
9.7. Ширина спектральной линии лазерных мод	355

Глава 10. Выходная мощность лазерных резонаторов	357
--	-----

10.1. Выходная мощность устойчивых резонаторов	357
10.1.1. Линейные резонаторы	357
10.1.2. Оптимальный выход и максимальная выходная мощность	362
10.1.3. Сложенные резонаторы без перекрытия пучка	367
10.1.4. Сложенные резонаторы с перекрытием пучка	368
10.1.5. Кольцевые резонаторы	372
10.2. Выходная мощность неустойчивых резонаторов	373

Глава 11. Влияние усиления на модовую структуру и потери	378
--	-----

11.1. Общие аспекты	378
11.2. Устойчивые резонаторы	379
11.2.1. Режим основной моды	379
11.2.2. Режим нескольких поперечных мод	389
11.3. Неустойчивые резонаторы	391
11.3.1. Модовая структура и потери	391
11.3.2. Оптимальная эффективность использования накачки	392
11.4. Модовая структура и условие стационарности	398

Глава 12. Лазерные резонаторы с модуляцией добротности	400
--	-----

12.1. Общие аспекты	400
12.2. Балансные уравнения для режима модуляции добротности	404
12.2.1. Плотности инверсной населенности	404
12.2.2. Энергия, длительность импульса и пиковая мощность	406
12.3. Оптимизация выходного зеркала резонатора	409
12.4. Режим периодической модуляции добротности	411
12.5. Оптимальное пропускание выходного зеркала	413

Глава 13. Резонаторы с изменяющимися внутренними линзами	421
13.1. Общие сведения	421
13.1.1. Термическая линза в твердотельных лазерах.....	421
13.1.2. Лучевые матрицы	423
13.2. Устойчивые резонаторы	426
13.2.1. Работа в режиме основной моды.....	426
13.2.2. Режим нескольких поперечных мод	429
13.2.3. Радиусы пучка, расходимости и фокусировка.....	433
13.2.4. Выходная мощность и качество пучка	437
13.2.5. Выходная мощность в режиме основной моды.....	444
13.2.6. Сферическая абберация	446
13.3. Неустойчивые резонаторы	454
13.3.1. Распространение пучка	454
13.3.2. Конфокальные неустойчивые резонаторы положительной ветви.....	456
13.3.3. Неустойчивые резонаторы с отображением стержня	461
13.3.4. Близкие к концентрическим неустойчивые резонаторы	465
13.3.5. Качество пучка и фокусировка	467
Глава 14. Резонаторы с несколькими активными элементами.....	473
14.1. Общие аспекты	473
14.2. Выходная мощность и эффективность	475
14.2.1. Устройство излучателя.....	475
14.2.2. Устройство усилителя	476
14.3. Многостержневые твердотельные лазеры.....	477
14.3.1. Эквивалентная g-диаграмма	477
14.3.2. Качество пучка и выходная мощность	479
14.3.3. Многостержневые резонаторы с зеркалами с переменной отражательной способностью.....	482
Глава 15. Чувствительность выходной мощности к разъюстировке	484
15.1. Общие свойства.....	484
15.2. Устойчивые резонаторы в многомодовом режиме.....	486
15.2.1. В отсутствие термической линзы	486
15.2.2. С термической линзой.....	489
15.2.3. Разъюстировка симметричных многостержневых резонаторов	492
15.3. Устойчивые резонаторы в режиме основной моды	496
15.4. Неустойчивые резонаторы	499
15.4.1. Без термической линзы.....	499
15.4.2. С термической линзой.....	502
Глава 16. Резонаторы с внутренними нелинейными элементами.....	506
16.1. Общие аспекты	506
16.2. Внутррезонаторная генерация второй гармоники.....	507
16.2.1. Основные свойства генерации второй гармоники	507
16.2.2. Эффективность внутррезонаторной генерации второй гармоники	515

16.2.3. Рассогласование фазы, аксиальные моды и эффективность преобразования	518
16.2.4. Конфигурации резонатора	520
16.3. Резонаторы с зеркалами, обращающими волновой фронт	523
16.3.1. Общие свойства зеркал, обращающих волновой фронт	523
16.3.2. Оптические резонаторы с обращающим волновой фронт зеркалом	526
16.3.3. Резонаторы с обращением волнового фронта, использующие ВРМБ	533

▼ Часть V

Резонаторы специальных типов	545
------------------------------------	-----

Глава 17. Призмённые резонаторы	546
---------------------------------------	-----

17.1. Резонаторы на призме Порро	546
17.2. Резонаторы на угловом отражателе	553

Глава 18. Резонаторы с преобразованием Фурье	558
--	-----

18.1. Неустойчивые резонаторы с самофильтрацией	558
18.2. Устойчивые резонаторы с преобразованием Фурье	563

Глава 19. Гибридные резонаторы	569
--------------------------------------	-----

19.1. Общие аспекты	569
19.2. Неустойчиво-устойчивые резонаторы	570
19.3. Волноводные резонаторы	572
19.3.1. Мотивация	572
19.3.2. Собственные моды полых волноводов прямоугольного сечения	574
19.3.3. Поперечные собственные моды полых волноводов кругового сечения	582
19.3.4. Свойства волноводных резонаторов	587
19.3.5. Свойства лазеров с волноводом щелевой конфигурации	604

Глава 20. Резонаторы для усиливающих сред с сечением	
--	--

в виде кольца	611
---------------------	-----

20.1. Характеристики лазеров с усиливающими кольцеобразными средами	611
20.2. Устойчивые резонаторы с тороидальными зеркалами	614
20.2.1. Структура поперечной моды	614
20.2.2. Качество пучка	616
20.3. Резонаторы на основе ячейки Херриота	620
20.4. Неустойчивые резонаторы	623
20.4.1. Тороидальные неустойчивые резонаторы	623
20.4.2. Азимутально-неустойчивые резонаторы	625
20.4.3. Сферические неустойчивые резонаторы	628

Глава 21. Кольцевые резонаторы	632
--------------------------------------	-----

21.1. Общие свойства кольцевых резонаторов	632
21.2. Неустойчивые кольцевые резонаторы	638
21.3. Неплоские кольцевые резонаторы	641

Глава 22. Одночастотные резонаторы.....	643
22.1. Спектр лазерных аксиальных мод.....	643
22.2. Выделение аксиальной моды внутрирезонаторными элементами.....	645
22.3. Выделение аксиальной моды в связанных резонаторах.....	648
22.4. Резонаторы для лазеров с однородным уширением линии.....	650

▼ Часть VI

Измерительная техника.....	653
----------------------------	-----

Глава 23. Измерение параметров излучателя.....	654
--	-----

23.1. Измерение потерь, усиления и эффективности.....	654
23.1.1. Анализ Финдлэя–Клэя.....	654
23.1.2. Анализ временной задержки.....	663
23.1.3. Измерение дифракционных потерь.....	667
23.1.4. Измерение интенсивности насыщения.....	668
23.2. Измерение параметров термической линзы.....	671
23.2.1. Фокусирование коллимированного зондирующего пучка.....	672
23.2.2. Отклонение коллимированного зондирующего пучка.....	674
23.2.3. Изменение в свойствах лазера.....	675

Глава 24. Измерение параметров лазерного пучка.....	679
---	-----

24.1. Измерение качества пучка.....	679
24.1.1. Параметр качества пучка.....	679
24.1.2. Методы, стандартизованные ISO.....	680
24.1.3. Измерение перетяжки пучка и расходимости в дальней зоне.....	682
24.1.4. Анализаторы качества пучка.....	683
24.1.5. Определение диаметров пучка.....	685
24.1.6. Ослабление пучка.....	687
24.2. Измерение поляризации.....	688

Литература.....	692
-----------------	-----

Предметный указатель.....	739
---------------------------	-----