

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 перекос.....	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 Колинза	87
2.3.1. Одномерные оптические системы	87
2.3.2. Двухмерные оптические системы	89
2.4. Интеграл Колинза и исчезающие элементы лучевой матрицы	91

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. Деполяризаторы	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 $g_1g_2 = 1$	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. Внутрирезонаторная генерация второй гармоники.....	507
16.2.1. Основные свойства генерации второй гармоники	507
16.2.2. Эффективность внутрирезонаторной 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. Призменные 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
---------------------------	-----

Список сокращений и символов

Сокращения

AD*P	дейтерированный дигидрофосфат аммония
ADP	дигидрофосфат аммония
AIP	(American Institute of Physics) Американский институт физики
Al	алюминий
Al ₂ O ₃	окись алюминия
Ar	аргон
Au	золото
BBO	бета-борат бария
BeO	окись бериллия,
C ₂ Cl ₃ F ₃	фреон 113
C ₂ F ₆	гексафторэтан
CCl ₄	четырёххлористый углерод
CD*A	дидейтероарсенат цезия
CDA	дигидроарсенат цезия
CO ₂	двуокись углерода, углекислый газ
Cr	хром
CS ₂	дисульфид углерода
Cu	медь
FR	вращатель Фарадея, ячейка Фарадея
FWHM	(Full Width Half Maximum) ширина пика по полувысоте, ширина по половине высоты максимума
GGG	(gadolinium gallium garnet) галлий-гадолиниевый гранат
GSGG	(gadolinium scandium gallium garnet) галлий-скандий-гадолиниевый гранат
H ₂ O	вода
He-Ne	гелий-неон
HfO ₂	двуокись гафния
HSURIA	(half symmetric unstable resonator with intracavity axicon) полусимметричный неустойчивый резонатор с внутррезонаторным аксиконом
IEEE	(The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) Институт инженеров по электронной технике

ISO	(International Standardization Organization) Международная организация по стандартизации
KD*P	дидейтерофосфат калия
KDA	дигидроарсенат калия
KDP	дигидрофосфат калия
KrF	фторид криптона
KTP	титанил-фосфат калия
LAP	моногидрат фосфата L-аргинина
LBO	триборат лития
LiNbO ₃	ниобат лития
LiSAF	литий-стронциевый фторид
LSB	литий-скандиевый борат
MgF ₂	фтористый магний
Na ₃ AlF ₆	криолит
NCUR	(near concentric unstable resonator) близкий к концентрическому неустойчивый резонатор
Nd	неодим
OSA	(Optical Society of America) Американское оптическое общество
POM	3-метил-4-нитропиридин-1-оксид
QR	гиротропная пластинка из кристаллического кварца
SF ₆	гексафторид серы
SiO ₂	диоксид кремния
SPIE	(Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) Общество инженеров по оптическим приборам
Ta ₂ O ₅	пентооксид тантала
TFR	(tightly folded resonator) компактный сложенный резонатор
TiO ₂	диоксид титана
VRM	(variable reflectivity mirrors) зеркало с переменной отражательной способностью
XeCl	хлорид ксенона
XeF	фторид ксенона
YAG	иттрий-алюминиевый гранат, ИАГ
YAP	алюминат иттрия, АИ
YLF	тетрафторид иттрия-лития, ИЛФ
YVO ₄	ванадат иттрия
ZnS	сульфид цинка
ZrO ₂	диоксид циркония
АОМ	акустооптический модулятор
Банан	ниобат бария-натрия
ВРГВГ	внутрирезонаторная генерация второй гармоники
ВРМБ	вынужденное рассеяние Манделъштама—Бриллюэна
ВРР	вынужденное рамановское рассеяние
ГВГ	генерация второй гармоники

НРСФ	неустойчивый резонатор с самофильтрацией
ОВФ	обращение волнового фронта
ОВФЗ	обращающее волновой фронт зеркало
ППП	произведение параметров пучка
ИФП	интерферометр Фабри—Перо

Символы

a, a_1, a_2	ширина апертуры, радиус апертуры
a	боковой сдвиг пробного луча
a	внутренний радиус усиливающей среды с сечением в виде кольца
A	площадь поперечного сечения
A	элемент лучевой матрицы
\mathbf{A}	лучевая субматрица 2×2
A_b	площадь поперечного сечения лазерного пучка
A_b^*	площадь поперечного сечения пучка в активной среде
A_{mn}	константа нормировки мод волновода
b	высота апертуры
b	радиус лазерного стержня
b	внешний радиус усиливающей среды с сечением в виде кольца
b	коэффициент пропорциональности
b_i	коэффициенты нормировки
B	элемент лучевой матрицы
\mathbf{B}	лучевая субматрица 2×2
B_{mn}	константа нормировки мод волновода
c	скорость света в однородной среде
c_0	скорость света в вакууме (3×10^8 м/с)
c_{pm}	коэффициент разложения по модам
C	константа пропорциональности
C	элемент лучевой матрицы
\mathbf{C}	лучевая субматрица 2×2
\mathbf{C}_p	вектор разложения по модам волновода
$d, d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_L$	диаметр пучка
d	толщина стенок среды с сечением в виде кольца
d_0	толщина в центре радиального двулучепреломляющего элемента
d, d_1, d_2	расстояния
d_{pm}	коэффициент разложения по модам
D	элемент лучевой матрицы
D	оптическая сила
D_r	оптическая сила для радиально поляризованного света
D_ϕ	оптическая сила для азимутально поляризованного света
\mathbf{D}	лучевая субматрица 2×2
e	единичный вектор направления распространения
$E, E_0, E(x, y), E(r, \Phi)$	напряженность электрического поля (скаляр)

E_F	поле в дальней зоне
$\mathbf{E}, \mathbf{E}(x, y)$	напряженность электрического поля (вектор)
f, f_1, f_2	фокусное расстояние
f	частота повторения
$f(v)$	функция формы линии
F	резкость интерферометра Фабри—Перо
g_1, g_2	g -параметры резонатора с зеркалами 1, 2
g	g -параметр зеркала резонатора
g_1^*, g_2^*	g -параметры резонатора с внутренними линзами
$g_0, g_0(v)$	коэффициент усиления слабого сигнала
$g_0 \ell$	усиление слабого сигнала
$g_0 \ell_{th}$	коэффициент усиления слабого сигнала на пороге генерации
G_B	коэффициент усиления при ВРМБ
G	степень усиления
G	эквивалентный g -параметр
G_0	степень усиления слабого сигнала
h	постоянная Планка ($6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с)
h, h_1, h_2	расстояние от поверхности линзы до главной плоскости
H	напряженность магнитного поля (амплитуда)
H_m	полином Эрмита порядка m
\mathbf{H}	напряженность магнитного поля (вектор)
I, I^+, I^-, I_0	интенсивность электромагнитного поля
$I(z)$	интенсивность электромагнитного поля для координаты z
I_S	интенсивность насыщения
I_{SE}	интенсивность спонтанного излучения
\mathbf{I}	единичная матрица
J_ℓ	функция Бесселя порядка ℓ
k	действительное число
k	постоянная Больцмана ($1,381 \times 10^{-23}$ Дж/К)
k, k_0	волновое число
\mathbf{k}	волновой вектор
K	фактор качества пучка
\mathbf{K}	дифракционный интегральный оператор
l, ℓ	длина
ℓ	длина активной среды
ℓ	азимутальный индекс мод круговой симметрии
ℓ_{zz}	геометрическая длина зигзагообразной траектории в слэбе
L	длина
L_{eff}	эффективная длина резонатора
L_i	расстояние
L_0	геометрическая длина резонатора
L_{01}, L_{02}	расстояние от зеркала до перетяжки пучка
L_{opt}	оптическая длина резонатора

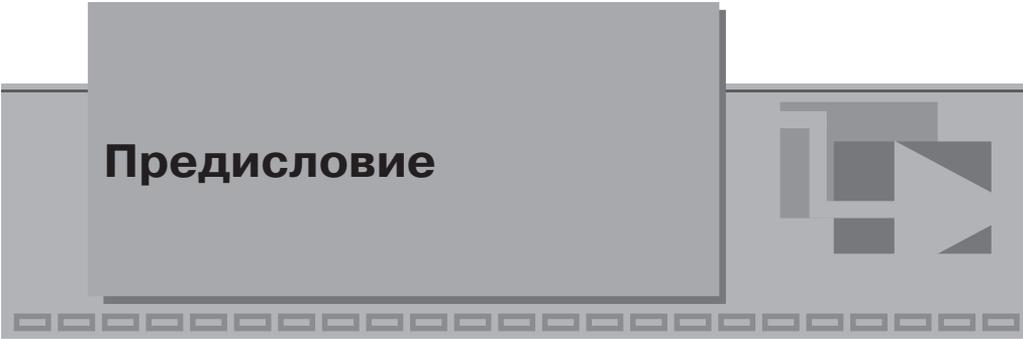
L^*	эффективная длина резонатора с внутренними линзами
L'	эффективная длина волновода
$L_{p\ell}$	полиномы Лагерра порядка p , ℓ
m	номер моды (целое число)
m	масса
m	наклон диаграммы Финдлэя—Клэя
M, M_0, M_1, M_2	увеличение
M^2, M_x^2, M_y^2	параметр качества пучка
\mathbf{M}	лучевая матрица
\mathbf{M}^P	матрица Джонса
n	номер моды (целое число)
n, n_0, n_1, n_2	показатель преломления
n_A	показатель преломления воздуха
n_i	показатель преломления i -го слоя покрытия
n_S	показатель преломления подложки
$n_r(r)$	показатель преломления для радиальной поляризации
$n_\theta(r)$	показатель преломления для азимутальной поляризации
N	число проходов в сложенных резонаторах
N_0	плотность атомов/ионов/молекул
N_{eff}	эффективное число Френеля
N_{eq}	эквивалентное число Френеля
p	целое
p	радиальный индекс для мод с круговой симметрией
p	давление газа
P, P_1, P_2	мощность
P	степень поляризации
\mathbf{P}	матричный момент второго порядка
\mathbf{P}_j	лучевая матрица для покрытия
P_{th}	пороговая мощность для ОВФ с ВРМБ
P_{electr}	электрическая мощность накачки
P_{pump}	мощность оптической накачки
P_{out}	выходная мощность лазерных резонаторов
$P_{\text{out, max}}$	максимальная выходная мощность лазерных резонаторов
q	номер моды (целое число)
q	число фотонов
q, q_1, q_2	лучевой параметр гауссова пучка
Q	добротность резонатора
\mathbf{Q}^{-1}	комплексная лучевая матрица
r, r_1, r_2	радиальная координата
r_0	радиус вершины зеркала
r, r_x, r_y	амплитудный коэффициент отражения
R	коэффициент отражения, отражательная способность
R_{max}	максимум отражения интерферометра Фабри—Перо

R_{opt}	оптимальный коэффициент отражение для максимальной мощности генерации
R_1, R_2	коэффициент отражения зеркал 1, 2
$R, R_1, R_2, R_t, R_1^*, R_2^*$	радиус кривизны волнового фронта
R_0	коэффициент отражение в центре зеркала с переменной отражательной способностью
R	радиус кривизны (электрическое поле)
$R_{xx}, R_{xy}, R_{yx}, R_{yy}$	матричный элемент матрицы кривизны 2×2 (электрическое поле)
R	матрица кривизны 2×2 (электрическое поле)
s	длина
S	чувствительность сдвига
S	матрица набора слоев для оптического покрытия
t	амплитудное пропускание (электрическое поле)
t	время
t_D	время задержки
$T, T(v)$	пропускание по интенсивности
T	температура
T_{ij}	лучевая матрица от покрытия i к покрытию j
T_{max}	максимум пропускания
U	электрическое напряжение
$U_{1/4}$	четвертьволновое напряжение (для ячейки Погкельса)
\mathbf{v}	лучевой вектор
V	постоянная Верде
V, V_1, V_2, V_3, V_4	фактор потерь (единица минус потери)
V_S	фактор потерь за счет рассеяния
V_D	фактор потерь за счет дифракции
V_{00}	объем моды TEM_{00}
V_{ol}	модовый объем в среде с перекрытием луча
V_{tot}	общий модовый объем в среде
w	радиус луча, радиус профиля
w_g	радиус профиля усиления
w_0	радиус перетяжки
W	скорость накачки
x, x_1, x_2	декартовы координаты
x, x_1, x_2	расстояние в направлении x
x	фактор уширения линии
y, y_1, y_2	декартовы координаты
z, z'	декартовы координаты
z_0	рэлеевская длина
z_M, z'_M	рэлеевская длина для многомодового пучка
α_0	коэффициент потерь активной среды
$\alpha_0 \ell$	потери активной среды

$\alpha, \alpha_1, \alpha_2$	наклон луча в направлении x
α	термооптический коэффициент
α	угол вращения
α_{mn}	амплитуда коэффициента поглощения
β, β_1, β_2	наклон луча в направлении y
β	угол поворота во вращателе Фарадея
β	увеличение пучка при фазовом согласовании
β_{mn}	константа распространения волноводной моды
γ	собственное значение дифракционного интеграла
γ	фактор заполнения
γ	относительная разность порога генерации для кольцевого и линейного резонаторов
γ	корректирующий фактор в теневом методе
$\gamma, \gamma_1, \gamma_2$	факторы коррекции для мощности сложенного резонатора
$\Gamma, \Gamma_1, \Gamma_2$	выходные энергетические потери моды EH_{11}
$\Delta, \Delta_x, \Delta_y$	изменение оптической длины
$\Delta\alpha$	угловой размер светового источника
$\Delta\phi$	фазовый сдвиг
$\Delta\nu$	ширина линии, область свободной дисперсии
ΔD	разность оптических сил
ΔL	расстояние
Δn	разность показателей преломления
ΔN	плотность инверсии населенности
ΔP_{electr}	диапазон электрической мощности накачки
ΔP_{out}	диапазон мощностей генерации
Δt	длительность импульса
ΔV	потери
Δx	пространственный размер источника
δ	фаза
δ	форм-фактор контура усиления
$\delta\nu$	частотный сдвиг, полоса
ε	диэлектрическая проницаемость однородной среды
ε_0	электрическая постоянная (8.854×10^{-12} А·с/(В·м))
η	КПД
η_{excit}	эффективность возбуждения
η_{extr}	эффективность использования накачки
$\eta_{\text{extr, max}}$	максимальная эффективность использования накачки
η_{tot}	суммарная лазерная эффективность
θ	угол вращения
$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$	отклонение луча в наклоненной оптике
θ	угол расходимости (половинный угол)
θ_0	угол расходимости гауссова пучка (половинный угол)
λ	длина волны

λ_0	центральное значение длины волны
λ_q	длина волны аксиальной моды порядка q
Λ_p	собственное значение p -й моды волноводного резонатора
μ	собственное значение матрицы
μ_0	магнитная постоянная (1.257×10^{-6} В·с/(А·м))
ν	частота света
ν_0	центральная частота атомного перехода
ν_{hom}	однородная ширина линии
ν_{inhom}	неоднородная ширина линии
ν_q	частота аксиальной моды резонатора порядка q
ν_q^*	частота аксиальной моды в резонаторах с усиливающей средой
π	3.141592...
ρ, ρ_1, ρ_2	радиусы кривизны поверхности
σ	поперечное сечение вынужденного излучения
σ_{eff}	эффе́ктивное поперечное сечение вынужденного излучения
σ_0	поперечное сечение вынужденного излучения в центре линии
σ^*	поперечное сечение столкновения
τ	время жизни
τ^*	время затухания за счет атомных столкновений
τ_B	время жизни фонона (рассеяние Бриллюэна)
Φ	сферическая координата (угол)
Φ	угол полной расходимости (по уровню 86.5%-го содержания энергии)
Φ	фаза
Φ_n	поле собственной моды волновода порядка n
ϕ, ϕ_1, ϕ_2	фазовая задержка
χ	атомная восприимчивость
χ_1	действительная часть атомной восприимчивости
χ_2	мнимая часть атомной восприимчивости
ψ	фаза
Ψ_m	поле собственной моды свободного пространства порядка m
Ω	угловая частота биений
ω	угловая частота

Предисловие



Со времени своей первой демонстрации в 1960 году лазер получил широкое распространение в различных областях, таких как медицина, обработка материалов, оптическая связь и информационные технологии. Число инженеров и ученых, работающих непосредственно с лазерами или в областях, имеющих отношение к лазерам, постоянно растет, поскольку появляются все новые приложения для этой уникальной технологии. Это означает, что все большему числу людей требуются детальное знания о лазерах.

В основе понимания свойств лазеров и лазерного излучения лежат знания физики оптических резонаторов. Такие характеристики лазера, как эффективность и чувствительность к разъюстировке, во многом определяются резонатором. Несмотря на то что резонаторы играют весьма важную роль в лазерной технике, в большинстве публикаций их представляют либо в слишком общем и неполном виде, либо в виде теоретической презентации, имеющей скорее академический интерес. В итоге инженер или физик, столкнувшись с лазерными резонаторами, зачастую испытывает затруднения до тех пор, пока не выведет свои собственные уравнения или не научится использовать опубликованные в научных трудах результаты применительно к своей собственной проблеме.

По этой причине мы решили написать настоящий обзор по оптическим резонаторам, включающий как основы, так и последние научные достижения. Хотя акценты были сделаны на проблемах приложений и лазерной техники, книга дает и более глубокие познания в данной области. Первая часть книги, озаглавленная «Электромагнитное поле», знакомит читателя с теоретическими основами, необходимыми для математического описания резонаторов. Мы пытались использовать наиболее простой математический аппарат, например интеграл Кирхгофа введен эмпирическим путем вместо традиционно используемого приближения с применением теоремы Грина к волновому уравнению. Лучевые матрицы в геометрической оптике представлены здесь как основная современная концепция теории дифракции и распространения луча. Однако нет необходимости знакомиться с этой частью для того, чтобы пользоваться остальным содержанием книги. Со всеми последующими частями можно ознакомиться и без изучения теоретического раздела. Но читатель, ищущий лучшего понимания выводов и применимости представленных уравнений, может обратиться к данному разделу. Любой же новичок в области лазеров и лазерных резонаторов должен обязательно ознакомиться

с теоретической частью для получения общего представления относительно современных математических концепций оптики.

Структура книги была составлена таким образом, что рассматриваемый предмет становится более специализированным в последующих главах. Мы начинаем в части II с резонатора Фабри—Перо, чтобы обсудить основные свойства резонаторов, такие как потери, усиление, порог и ширина линии. В части III рассматриваются пассивные (без активной среды) резонаторы. Здесь мы имеем дело с линейными устойчивыми и неустойчивыми резонаторами, которые, вероятно, составляют 95% от всех резонаторов, используемых в настоящее время в лазерах. Исключение активной среды из рассмотрения является классическим приближением с целью упрощения изучения объекта, поскольку усиление в общем случае лишь вносит возмущение в физические свойства резонатора, не меняя их полностью. Влияние активной среды на свойства резонатора обсуждается в части IV. В этой же части дается обзор физики генерации лазерного излучения, представлены расчетные модели для оценки мощности генерации и рассматривается влияние усиления на модовую структуру.

Некоторые типы специальных резонаторов представлены в части V. Такие резонаторы либо применяются в ограниченном числе приложений или конструкций лазеров, либо могут сыграть важную роль в ближайшем будущем. В эту категорию попадают такие типы резонаторов, как призмные, резонаторы с преобразованием Фурье, гибридные резонаторы и резонаторы для усиливающей среды с сечением в виде кольца. Мы также включили в эту часть кольцевой резонатор, хотя некоторые читатели могут возразить, заметив, что подобные резонаторы заслуживают своей собственной части, поскольку это широко используемая схема и, вероятно, более важная, по сравнению с любыми другими представленными там типами резонаторов.

Основная измерительная техника рассматривается в части VI. Сведения, содержащиеся в ней, помогут инженеру-практику провести детальный анализ своей лазерной системы. Среди прочего представлена техника для измерения усиления, потерь и качества пучка, что крайне важно для разработчиков и пользователей лазерных систем.

Детальный список литературы поможет получить более подробную информацию по интересующей теме. Мы включили в него публикации, которые дают хороший обзор или являются ссылками, желательными для прочтения. Мы, конечно, не претендуем на полноту, но по возможности включили все лучшее, что нам известно. Ссылки приведены в хронологическом порядке, чтобы читатель увидел историю развития интересующей его темы.

Мы надеемся, что эта монография позволит вам получить больше информации по оптическим резонаторам и окажет помощь в решении проблем, с которыми вы столкнулись как инженер, имеющий дело с лазерами, или физик. Мы также надеемся, что после работы с этой книгой у вас зародится интерес к резонаторам и лазерам.

Мы весьма признательны Дугласу Д. Голдингу из Cogent Light Technologies, Inc. и доктору Кристоферу Л. Петерсену из Carl Zeiss, Inc. за помощь в улучшении

качества всех частей книги и за проверку выводов и уравнений. Мы искренне благодарим доктора Уильяма Л. Нигана из Spectra Physics и доктора Ральфа Мензеля профессора университета Потсдама, Германия, за многочисленные полезные дискуссии относительно внутриврезонаторной генерации второй гармоники и резонаторов с обращаемыми волновой фронт зеркалами, а также Герберта Гросса из Carl Zeiss Oberkochen, Германия, за предоставленные знания по волноводным резонаторам. Мы также хотели бы поблагодарить Ингеборгу Вольшейд за оформление большинства рисунков и Кэтлин М. Миллар из Humphrey Instruments, Inc. за то, что она нашла время в своем плотном графике для редактирования финального варианта рукописи.

Наши особые благодарности мы выражаем Имке Моубрей, Кристоферу Гринвеллу и Николасу Пинфилду из Springer-Verlag London Ltd. за их поддержку и помощь в подготовке этой книги.

доктор *Норман Ходгсон*, Окленд, Центральная Америка
профессор, доктор *Хорст Вебер*, Берлин, Германия
Сентябрь 1996 г.

Предисловие научного редактора

Предлагаемый читателю фундаментальный труд Н. Ходгсона и Х. Вебера, всемирно признанных специалистов в области физики лазерных резонаторов, на русском языке издается впервые.

Резонатор наряду с усиливающей средой – один из двух главных компонентов лазера. Роль резонатора заключается в формировании основных характеристик генерируемого излучения и обеспечении их стабильности. Успешное внедрение лазеров в промышленность, приборостроение, научные исследования и медицину в решающей степени обязано развитию физики и техники лазерных резонаторов. На долю резонаторов приходится значительная часть научных и технических статей, опубликованных со времени зарождения лазерной физики. По мере накопления и систематизации материала физика резонаторов сформировалась в отдельный раздел физической оптики.

До настоящего времени русскоязычный читатель имел возможность знакомиться с теорией и прикладными аспектами лазерных резонаторов по следующим монографиям отечественных авторов:

- Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. Радио, 1966;
- Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979;
- Ищенко Е. Ф. Открытые оптические резонаторы: некоторые вопросы теории и расчета. М.: Сов. Радио, 1980;
- Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990;
- Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. М.: Физматлит, 2004.

Предлагаемая читателю книга по широте охвата материала, последовательности изложения и глубине проработки вопросов является следующим важным шагом в развитии науки о лазерных резонаторах. Именно это обстоятельство явилось побудительным мотивом для её перевода.

Книга выдержала за рубежом два издания. В качестве основы для первого издания авторы взяли свою книгу «Optische Resonatoren: Grundlagen, Eigenschaften, Optimierung», изданную в 1992 г. на немецком языке. Первое издание было выпущено в 1997 г. под заглавием «Optical Resonators: Fundamentals Advanced Concepts and Applications». Второе, существенно расширенное («Laser Resonator and Beam Propagation: Fundamentals Advanced Concepts and Applications»), вышло из печати в 2005 г.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru