

# 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
<b>Глава 3. Поляризация .....</b>	<b>133</b>
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

<b>Основные свойства оптических резонаторов .....</b>	<b>153</b>
<b>Глава 4. Резонатор Фабри–Перо .....</b>	<b>154</b>
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 <sub>00</sub> -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. Призмённые резонаторы.....	546
17.1. Резонаторы на призме Порро.....	546
17.2. Резонаторы на угольном 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
---------------------------	-----

# 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 обращающимися 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.

В нашей стране эти книги не поступали в розничную торговую сеть, но были известны и доступны российскому читателю, поскольку приобретались у издателя крупными библиотеками.

Определенные затруднения при переводе монографии вызывало отсутствие русскоязычных аналогов ряда английских терминов, описывающих свойства резонаторов. И до сих пор, по прошествии более 50 лет развития лазерной физики, недоработки в области терминологии не преодолены.

Стоит отметить, что работы в этом направлении ведутся. В 2004 году вышел справочник «Фотоника. Словарь терминов» (Новосибирск: Изд-во СО РАН). В Республике Беларусь издан и переведен на русский язык ГОСТ ИСО 11145—2007, Стандарт РБ «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерное оборудование. Словарь и буквенные обозначения».

Вышеупомянутая проблема хорошо знакома специалистам, и я не стану на ней задерживаться. Отмечу лишь то, что при трактовке ряда понятий приходилось прибегать к многословию в ущерб простоте изложения материала.

Работая над редактированием перевода, я часто обращался за помощью к своим коллегам — сотрудникам Института лазерной физики СО РАН. Их многолетний опыт преподавания основных разделов физики лазеров в Новосибирском государственном университете и Новосибирском государственном техническом университете пригодился при окончательном редактировании ряда крупных фрагментов текста книги.

Я благодарен к. ф.-м. н. В. С. Пивцову (редактирование глав 8–10, 12 и 22), к. ф.-м. н. А. И. Карапузикову (переработка первоначального перевода глав 17–19 и 23), к. ф.-м. н. В. Н. Бельтюгову и к. ф.-м. н. В. И. Трунову за помощь при редактировании наиболее трудных для перевода мест.

Особая благодарность — В. М. Тарасову, инициатору перевода этой книги, за внимательное прочтение первой его редакции и многочисленные поправки, улучшившие изложение материала на русском языке, а также Д. С. Бордзиловскому и А. А. Тармышовой за техническую помощь в подготовке авторского оригинала.

Я выражаю огромную признательность издательству «ДМК Пресс», профинансировавшему выпуск книги.

Надеюсь, что русский перевод книги поможет студентам, аспирантам, преподавателям вузов и специалистам-исследователям расширить свои познания в физике и технике лазерных резонаторов и облегчит поиск технических решений при разработке лазерных устройств. С благодарностью приму от читателей замечания и пожелания по качеству перевода.

*С. Г. Струц,*  
ведущий инженер лаборатории медицинских  
лазерных технологий института лазерной  
физики СО РАН, г. Новосибирск  
Ноябрь 2015 г.

# Введение

Лазерное излучение обладает свойствами, которые не обеспечиваются обычными источниками света, такими как лампы накаливания и люминесцентные лампы:

- узкая полоса частот (на уровне  $10^{-3}$  Гц) и высокая временная когерентность;
- малая расходимость пучка (порядка миллирадиан) и высокая пространственная когерентность;
- высокая интенсивность в фокальном пятне (выше  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>).

Благодаря отмеченным характеристикам пучка лазер нашел применение в таких технологиях, в которых материал должен быть удален или модифицирован в пределах определенных, часто малых, областей (например, лазерная хирургия, обработка материалов) или в таких областях, где требуется узкая спектральная полоса (например, дальнометрия и спектроскопия). Кроме того, решающим фактором в развитии оптической коммуникации и оптической обработки данных оказались уникальные свойства лазерных диодов:

- малый размер;
- высокая эффективность;
- высокая скорость модуляции.

Излучение, испускаемое лазерной средой (твердое тело, газ или раствор органического красителя), без оптического резонатора вряд ли могло использоваться в каком-либо приложении. Вследствие того, что активные атомы генерируют фотоны главным образом в процессе спонтанных переходов, излучение (суперлюминисценция) не отличается от света, излучаемого обычным тепловым источником в таких свойствах, как пространственная когерентность и фокусируемость. Это происходит потому, что фотоны излучаются без ограничений во всем диапазоне частот, характерном для материала, из которого сделан лазер. Отсутствие связи между излучающими атомами может быть преодолено путем возврата излученных фотонов в активную среду, что дает возможность генерировать лазерные пучки с поразительными свойствами. Можно сказать, что обратная связь обеспечивает выход пучка в одном направлении.

Во всех лазерных системах обратная связь осуществляется с помощью оптического резонатора. Такие свойства пучка, как распределение интенсивности по сечению, выходная мощность и минимальный размер фокального пятна, достигаемый при помощи фокусирующих линз, определяются главным образом оптическим резонатором. Чрезвычайно важная роль, которую играет резонатор в лазерных системах, является причиной того, что после тридцати пяти лет исследований

в этой области ученые продолжают работать над оптическими резонаторами, для того чтобы глубже понять и улучшить характеристики лазерного пучка.

Использование принципа обратной связи для стабилизации выходных параметров физической системы на желаемом уровне не ограничивается оптической областью, а уже в течение восьмидесяти лет используется в разных областях техники. Этот принцип применялся в различных инженерных решениях с начала XX века. Лучшим из известных примеров является изобретенный в 1913 году физиком Александром Мейснером (Alexander Meissner) контур Мейснера, который генерирует незатухающие электромагнитные колебания (рис. 1). Потери, вызывающие затухание в колебательном  $LC$ -контуре, компенсируются при возвращении в него необходимого количества электронов с помощью триода. Без такой обратной связи выходное напряжение  $U$  должно было бы совершать синусоидальные колебания с экспоненциальным затуханием амплитуды. Для осуществления обратной связи колебательный  $LC$ -контур индуктивно связывался с управляющей сеткой триода. При положительном напряжении на сетке электроны переходят в контур, для того чтобы компенсировать потери на сопротивление. Этот процесс поддерживает постоянную во времени амплитуду колебаний выходного напряжения. В таком контуре могут генерироваться колебания с частотой до  $10^9$  Гц. Получение более высоких частот ограничивается конечным временем пролета электронов в триоде.

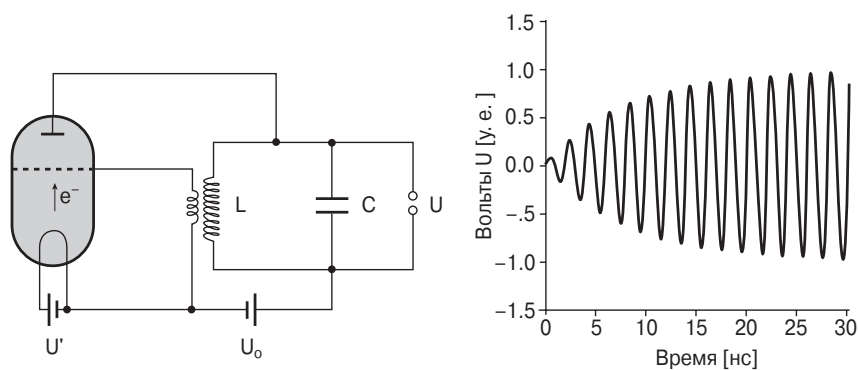


Рис. 1. Контур Мейснера для генерирования незатухающих электрических колебаний как пример принципа обратной связи. График показывает зависимость нормированного выходного напряжения  $U$  от времени для случая, когда начальный коэффициент усиления превышает потери в  $LC$ -контуре

В стационарном состоянии триод, характеризуемый коэффициентом усиления напряжения за период  $G$  ( $G > 1$ ), точно компенсирует потери, описываемые коэффициентом потерь  $V$  ( $V < 1$ ). Условие стационарности колебаний:

$$GV = 1.$$

Коэффициент усиления  $G$  является функцией ускоряющего напряжения на сетке триода и поэтому определяется характеристиками триода и индуктивной связью между контурами. Характеризуемый в целом высоким значением, коэффициент усиления растет с увеличением напряжения, однако при больших значениях напряжения наступает насыщение. Только в том случае, когда коэффициент усиления  $G$  больше, чем коэффициент потерь  $V$ , что означает  $GV > 1$ , амплитуда осцилляций будет расти, как это показано на рис. 1. С увеличением выходного напряжения коэффициент усиления выходит на насыщение. Стационарное значение амплитуды на выходе достигается при выполнении условия  $GV = 1$ . Так как коэффициент усиления  $G$  может быть выражен как функция напряжения на выходе  $U$  (ускоряющее напряжение на сетке пропорционально выходному напряжению), то величина стационарного напряжения на выходе  $U_s$  определяется из следующего уравнения:

$$G(U_s) = \frac{1}{V}.$$

Это уравнение может быть использовано для вычисления амплитуды стационарного выходного напряжения, поскольку легко получить выражения для коэффициентов усиления и потерь как функций напряжения на выходе  $U$ .

Лазер представляет собой прибор с положительной обратной связью, но при этом он работает в области частот ультрафиолетового, видимого и инфракрасного света ( $10^{15}$  Гц.). Существует сходство между лазером и контуром Мейснера, поскольку в основе их действия лежит один и тот же принцип. Роль триода в случае лазера играет активная среда, а осцилляции электронов в  $LC$ -контуре подобны осцилляциям света между зеркалами резонатора лазера (рис. 2). Свет, первоначально испущенный в результате спонтанного излучения активной среды, поочередно отражается от зеркал внутри резонатора. Интенсивность света уменьшается при отражении от выходного зеркала  $1$  в  $R_1$  раз, где  $R_1$  — коэффициент отражения, и увеличивается в  $G$  раз, где  $G$  — коэффициент усиления, когда свет проходит через активную среду. Подобно случаю с триодом коэффициент усиления является функцией интенсивности и уменьшается с ростом интенсивности. В лазере достигается такое стационарное значение интенсивности  $I_0$  внутри резонатора, при котором величина усиления и потерь для одного акта отражения света сбалансированы. Поскольку свет проходит дважды через активную среду до того, как испытает одно отражение, связанное с потерей интенсивности, то для стационарного состояния можно записать

$$G(I_0)G(I_0)R_1 = 1 \Rightarrow G(I_0) = \frac{1}{\sqrt{R_1}}.$$

Величина коэффициента усиления  $G$  определяется внешним процессом накачки, в котором энергия передается в активную среду, для того чтобы создать инверсию населенностей между атомными или молекулярными энергетическими уровнями. В твердотельных лазерах это осуществляется при использовании

мощных ламп-вспышек или диодов, газовые лазеры обычно накачиваются посредством высоковольтного газового разряда, а диодные лазеры — с помощью электрического тока.

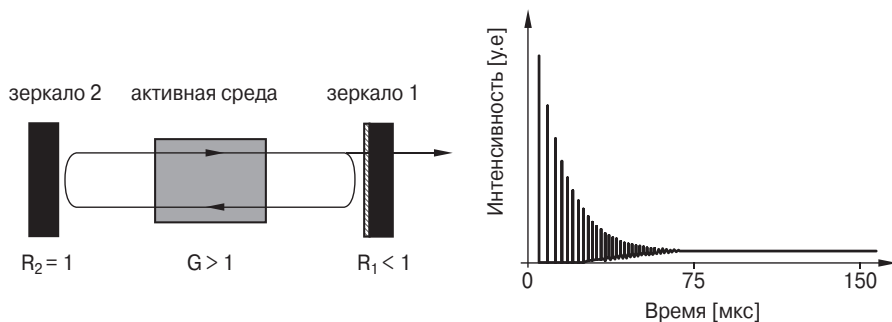


Рис. 2. Принцип действия оптического резонатора.

Для достижения лазерных осцилляций необходимо, чтобы коэффициент усиления активной среды  $G$  был больше, чем коэффициент потерь, обусловленный взаимодействием с зеркалом 1 на выходе. После колебания с некоторой начальной интенсивностью устанавливается стационарная интенсивность, для которой усиление точно компенсирует потери при выходе. В дальнейшем свет излучается в непрерывном режиме работы лазера

Лазер начинает генерировать, как только коэффициент усиления становится больше, чем  $1 / (V\sqrt{R_1})$ , причем все остальные потери, обусловленные дифракцией, рассеянием и поглощением, включаются в коэффициент  $V$  потерь за обход резонатора. Интенсивность света усиливается в каждом цикле прохождения и отражения внутри резонатора. Однако с увеличением интенсивности коэффициент усиления  $G$  начинает уменьшаться, и интенсивность достигает такого значения  $I_0$ , для которого выполняется указанное выше условие стационарности. Более высокие значения интенсивности могут быть достигнуты только в случае увеличения мощности накачки путем повышения мощности лампы-вспышки или разрядного напряжения. Читатель должен иметь в виду, что мы всегда подразумеваем в оптическом резонаторе наличие активной среды. Это означает, что предметом нашего исследования служит лазер. Однако лазер является только частью более широкого рассмотрения, так как оптические резонаторы могут быть использованы и без активной среды. Примером такого использования могут служить интерферометры, многопроходные оптические линии задержки и оптические покрытия.

Таким образом, расчет свойств оптического резонатора, по-видимому, является далеко не столь однозначным, как расчет контура Мейнера. Используя полученные знания, мы можем определить стационарную интенсивность  $I_0$  внутри резонатора. Последнее означает также, что нам известна выходная мощность, излучаемая лазером. К сожалению, эта модель слишком упрощена, чтобы быть полезной



для описания оптических резонаторов. В противоположность контуру Мейснера, в котором мы имеем дело только с одним параметром — амплитудой напряжения, электромагнитное излучение характеризуется бóльшим количеством параметров, а не только амплитудой электрического поля или его интенсивностью. Существуют также стационарные решения для электрического поля, имеющего определенную пространственную структуру, поляризацию и распределение фазы. Более того, сильное влияние на свойства светового пучка оказывают форма зеркал резонатора, размер внутренних апертур, а также свойства поляризационной оптики внутри резонатора. Нелинейное взаимодействие колеблющегося электрического поля с атомами активной среды является еще более серьезной проблемой для трактовки работы резонатора.

Ввиду сложности оптических резонаторов необходимо вначале обсудить физические свойства света и создать методы для расчета этих свойств. В части I «Электромагнитное поле» выводятся уравнения для расчета распространения световых пучков, поперечной структуры и поляризации пучка и рассматривается применение этих уравнений к оптическим резонаторам. В этой части авторы не придерживаются математической строгости, ограничиваясь переводом точных математических выкладок на интуитивный физический язык. Все уравнения, приведенные в этой книге, могут быть выведены с использованием математического аппарата, представленного в части I. Части II–V, в которых рассматриваются оптические резонаторы и их проектирование, содержат только краткие выводы результатов, а не полное описание всех выкладок.

В части II изложение начинается с описания самого распространенного оптического резонатора — интерферометра Фабри–Перо — и имеет целью ознакомить читателя с основными свойствами оптических резонаторов, если он новичок в этой области. После обсуждения линейных резонаторов без учета влияния активной среды (часть III) будут рассмотрены свойства лазерной среды и ее влияние на характеристики лазера (часть IV). В части V собраны некоторые специальные концепции в области резонаторов, которые демонстрируют дополнительные преимущества, такие как низкая чувствительность к расстройке, узкая спектральная ширина линии или отличное качество пучка. Эти резонаторы имеют либо ограниченную область применения, либо иллюстрируют новые идеи, которые могут войти в практику в недалеком будущем. Читатели, интересующиеся конструированием и оптимизацией лазерных резонаторов, могут найти для себя полезными сведения по измерительной технике, которые представлены в части VI. Подробный список ссылок на литературные источники призван помочь читателям в поисках более точной информации по выбранному ими предмету исследования.