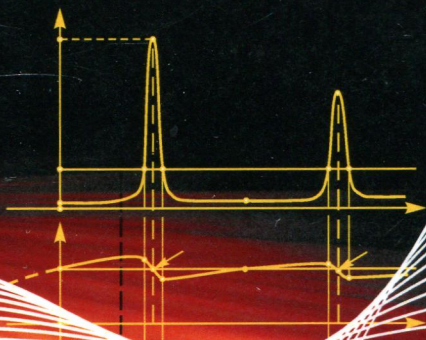


Л. В. Тарасов



ФИЗИКА ЛАЗЕРА



URSS

Л. В. Тарасов

ФИЗИКА ЛАЗЕРА

Издание стереотипное



URSS
МОСКВА

Тарасов Лев Васильевич

Физика лазера. Изд. стереотип. — М.: ЛЕНАНД, 2015. — 456 с.

Настоящая книга посвящена физике процессов в лазерах. Автор рассматривает три группы вопросов: способы получения инвертированных активных сред, формирование поля излучения в резонаторе, а также динамику процессов в лазерах. В работе отражены такие направления в развитии лазеров, как лазеры на красителях, на сжатых газах, на рекомбинирующей плазме; неустойчивые резонаторы; синхронизация продольных и поперечных мод и др. Дано систематизированное рассмотрение методов, используемых в теории лазеров, различных подходов и приближений. В начале книги содержится популярная статья «Что такое лазер и чем замечательно лазерное излучение».

Книга предназначена для научных работников и инженеров, работающих в области лазерной техники, а также преподавателей и студентов физических факультетов вузов.

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук В. Н. Морозов;
канд. физ.-мат. наук В. Г. Дмитриев;
канд. физ.-мат. наук Е. А. Шалаев

Формат 60×90/16. Печ. л. 28,5. Доп. тираж. Зак. № ИР-50.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-9710-2284-8

© ЛЕНАНД, 2014, 2015

18268 ID 201675



9 785971 022848



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Оглавление

Что такое лазер и чем замечательно лазерное излучение	III
Предисловие	3
<i>Глава I</i>	
СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНВЕРТИРОВАННЫХ АКТИВНЫХ СРЕД	
1.1 Некоторые общие вопросы	7
Инверсия активной среды как необходимое условие генерации лазера (7). Квантовый выход и КПД лазера (8). Условие инверсии для четырехуровневой модели (10). Общие принципы создания инверсии (11). Механизмы заселения уровней (12). Механизмы очищения уровней (13). Классификация лазеров с учетом методов накачки (15). Некоторые проблемы, возникающие при непрерывной генерации; столкновительные лазеры (15). Преимущества импульсной накачки; генерация на самоограниченных переходах (18). Лазеры на разлетных молекулах (20).	
1.2 Оптическая накачка. Твердотельные лазеры	21
Специфические свойства оптической накачки (21). Условия реализации стационарной инверсии при оптической накачке (23). Твердотельные лазеры; вопросы практической реализации оптической накачки, рабочие схемы лазеров (26). Лазер на рубине (28). Лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (30). Оптическая накачка полупроводниковым лазером или светодиодом (33).	
1.3 Лазеры на органических красителях	34
Органические красители (34). Оптическая накачка лазеров на красителях (36). Схема уровней и основные переходы (37). Перестройка длины волны генерации; селективные резонаторы (38). Проблема расширения диапазона перестройки длины волны генерации (40).	
1.4 Газовые лазеры с широкополосной оптической накачкой	41
Проблема оптической накачки газовых активных сред (41). Фотодиссоционные лазеры (42). Фотодиссоционный йодный лазер (43). Проблема прямого преобразования солнечной энергии в лазерное излучение (44).	
1.5 Накачка с использованием самостоятельного электрического разряда в разреженных газах	44
Типы газоразрядных лазеров (44). Электрические разряды, применяемые в газоразрядных лазерах (46). Аргоновый лазер (47). Механизм возникновения инверсии в аргоновом лазере (48). Лазер на гелий-неоне (51). Лазер на парах меди (52). Молекулярный лазер на двуокиси углерода (53). Механизм возникновения инверсии в CO ₂ -лазере (54).	
1.6 Электроионизационные лазеры	57
Проблема повышения давления в газовом лазере (57). Электроионизационный метод накачки (58). Электроионизационный CO ₂ -лазер (60). Использование различных активных сред (60). Способы ионизации (61).	
1.7 Газодинамические лазеры (тепловая накачка)	62
Тепловые методы создания инверсии (62). Газодинамический CO ₂ -лазер (64). Механизм возникновения инверсии в газодинамическом CO ₂ -лазере (64). Пути повышения КПД газодинамических лазеров (67).	

1.8 Химические лазеры	68
Химические реакции; иницирование и ускорение реакций (68). Химическая и лазерная длина цепи (70). Лазеры с прямым и непрямым образованием инверсии (72). Химический лазер на фтор-водородной смеси (73). Химические лазеры на сероуглероде (74). Химические лазеры на электронных переходах молекул (75).	
1.9 Плазменные лазеры (рекомбинационная накачка)	75
Рекомбинирующая плазма как активная среда лазера (75). Принципиальные вопросы создания лазера на рекомбинирующей плазме (77). «Открытая» двухуровневая модель плазменного лазера (78). Проблема очищения нижнего рабочего уровня (79). Импульсные плазменные лазеры (81). Плазменные лазеры с использованием жестких ионизаторов; реактор-лазер (82). Плазмодинамические лазеры (83). Плазмохимические лазеры (84).	
Список литературы	85
<i>Глава 2</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЗОНАТОРЕ ЛАЗЕРА	
2.1 Условие обеспечения генерации	90
Необходимость превышения начального коэффициента усиления над коэффициентом потерь (90). Начальный коэффициент усиления для оптически разрешенных и запрещенных переходов (93). Зависимость начального коэффициента усиления от скорости накачки (94). Зависимость от частоты (96).	
2.2 Оптический резонатор и лазерное излучение	97
Оптимальный коэффициент полезных потерь (97). Резонансные частоты (99). Моды оптического резонатора (101). Роль оптического резонатора в лазере (103). Пассивные и активные резонаторы (106).	
2.3 Общие замечания об открытых резонаторах	109
Невозможность использования объемных резонаторов в оптическом диапазоне (109). Открытый резонатор (111). Добротность резонатора (112). Добротность, обусловленная пропусканием выходного зеркала (114). Добротность и моды открытого резонатора (116). Дифракционные потери; число Френеля (116). Основные параметры пассивного резонатора, образованного двумя зеркалами (119). Геометрическое приближение (120).	
2.4 Линзовые волноводы и открытые резонаторы (приближение геометрической оптики)	123
Линзовый волновод и открытый резонатор (123). Условие устойчивости для линзового волновода (125). Устойчивые и неустойчивые открытые резонаторы; диаграмма устойчивости (127). Матрица передачи светового луча (130). Матрица передачи луча для двойного прохода резонатора (135).	
2.5 Расстройка открытого резонатора	137
Разъюстировка оптического элемента (137). Резонатор с разъюстированным оптическим элементом (139).	
2.6 Рассмотрение открытых резонаторов на основе итерационного метода Фокса — Ли. Эквивалентные резонаторы	141
Дифракционный интеграл Кирхгофа—Гюйгенса (141). Интегральное уравнение Фокса — Ли (143). Поперечные моды открытого резонатора (144).	

Резонатор, образованный двумя сферическими зеркалами (145). Конфокальный резонатор (149). Учет величины апертуры зеркал резонатора (151). Эквивалентные резонаторы (154). Резонатор, эквивалентный резонатору с внутренней линзой (155). Резонатор с диафрагмой (159).

2.7 Гауссовы пучки 162

Пространственная форма гауссова пучка (162). Распространение гауссова пучка в свободном пространстве (164). Радиус кривизны поверхности постоянной фазы (166). Основные соотношения (168). Комплексные параметры гауссова пучка (168). Гауссов пучок как решение параболического уравнения (169). Обобщение на моды высоких порядков (170).

2.8 Преобразование и согласование гауссовых пучков . . 171

Преобразование гауссова пучка в свободном пространстве (172). Линза как фазовый корректор (172). Преобразование гауссова пучка в линзе (173). Преобразование в линзовой системе (175). Закон *ABCD* (175). Преобразование гауссова пучка в квадратичной среде (178). Согласование гауссовых пучков (180).

2.9 Гауссовы пучки в устойчивых резонаторах 182

Самовоспроизведение гауссова пучка при отражении от сферического зеркала (182). Гауссов пучок в резонаторе (большие апертуры зеркал) (183). Замечания, связанные с учетом апертуры зеркал (186). Фазовый сдвиг для гауссова пучка и спектр резонансных частот (189). Применение закона *ABCD* к рассмотрению поля в резонаторе (190). Неопределенность каустики конфокального резонатора с неограниченными апертурами зеркал (192). Конфокальный резонатор с конечными апертурами зеркал (194). Конфокальный резонатор с диафрагмой (195).

2.10 Неустойчивые резонаторы 197

Гомоцентричность пучка, выводимого из неустойчивого резонатора (197). Потери в неустойчивом резонаторе по геометрической теории (199). Применение закона *ABCD* к неустойчивым резонаторам (203). Лазер с неустойчивым резонатором телескопического типа (206). Учет дифракции на крае зеркала (208). Преимущества неустойчивых резонаторов (210).

2.11 Принципы частотной селекции 212

Различные типы частотной селекции (213). Применение широкополосных поглощающих фильтров и дисперсионных элементов (214). Общие замечания о селекции продольных мод (216). Интерференционные методы селекции (217). Резонаторы с анизотропными элементами (219). Нелинейно-оптический метод частотной селекции (221).

2.12 Эффекты «выгорания дыр» и затягивания частот . 222

Однородное и неоднородное уширение спектральных линий (222). Насыщение усиления при однородном и неоднородном уширении линий; эффект «выгорания дыр» (224). Специфика рассмотрения насыщения усиления при неоднородном уширении линии перехода (226). Эффект затягивания частот (227). Эффект затягивания частот для случаев однородного и неоднородного уширения (228).

2.13 Тепловая линза 230

Эффект тепловой линзы (230). Термоупругие напряжения; термические искажения резонатора (232). Фокусное расстояние и главные плоскости тепловой линзы (234). Учет тепловой линзы в лазерных системах (236).

2.14 Волноводные резонаторы 238

Волноводный резонатор; волноводные моды (238). Число волноводных мод в резонаторе (240). Волноводный резонатор половинного типа (241). Преимущества волноводных резонаторов (242).

2.15	Оптическое излучение в тонкопленочном волноводе. Распределенная обратная связь	244
	Волноводные моды в тонкой пленке (245). Число волноводных мод в пленке (249). Распределение поля в волноводных модах (249). Методы ввода и вывода излучения для тонкопленочного волновода (252). Принцип действия элемента связи призма — пленка (254). Распределенная обратная связь (255). Пленочные РОС-лазеры (257). Пленочные лазеры с периодической структурой в качестве зеркала резонатора (259).	
	<i>Список литературы</i>	259
	<i>Глава 3</i>	
	ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРЕ	
3.1	Общие сведения о режимах работы лазеров	266
	Причины нестационарности лазерной генерации (266). Режим свободной генерации (268). Режим генерации гигантских импульсов при активной модуляции добротности резонатора (270). Режим генерации гигантских импульсов при пассивной модуляции добротности резонатора (273). Режим синхронизации продольных мод (275). Режим синхронизации поперечных мод (277). Режим разгрузки резонатора (279). Генерация последовательности импульсов в лазерах с непрерывной накачкой (281). Использование отрицательной обратной связи для получения импульсов микросекундной длительности (283).	
3.2	Приближенные уравнения для описания динамики процессов в лазерах (балансные уравнения)	286
	Дифференциальное уравнение для плотности светового потока (286). Дифференциальные уравнения для плотности инверсной заселенности (287). Полная система балансных уравнений в частных производных (290). Усредненные балансные уравнения (скоростные уравнения) (291). Уравнения Статца — Де Марса (293). Сопоставление уравнений Статца — Де Марса и системы усредненных балансных уравнений (295). Пороговая плотность инверсной заселенности и условие генерации (297). Безразмерная форма записи уравнений Статца — Де Марса (298). Учет вклада спонтанного излучения в интенсивность поля (299). Общие замечания о методе балансных уравнений (300). Лазер как распределенная автоколебательная система (302).	
3.3	Режим свободной генерации. Регулярные затухающие пульсации мощности излучения	304
	Предгенерационный этап (304). Переходные процессы, сопровождающие возникновение генерации (306). Фазовый портрет свободно генерирующего твердотельного лазера (310). Выявление структуры фазового портрета лазера (313). Анализ картины пульсаций на основе балансных уравнений (314). Замечания о свободной генерации в многомодовом лазере (316).	
3.4	Лазер с нестационарным резонатором. Незатухающие пульсации мощности излучения	317
	Балансные уравнения для лазера с периодически изменяющейся добротностью резонатора (317). Пульсации малой амплитуды (319). Замечания о возможности реализации незатухающих пульсаций большой амплитуды (321). Периодическая модуляция добротности при равномерном движении отражающей плоскости (322). Периодическая модуляция добротности при нагреве активного элемента (323). Природа незатухающих пульсаций в режиме свободной генерации (324).	
3.5	Активная модуляция добротности резонатора	325
	Оптико-механическая модуляция добротности (325). Электрооптическая модуляция добротности (326). Акустооптическая модуляция добротности	

(330). Акустооптическая и электрооптическая модуляция добротности (сопоставление) (333). Модуляция полезных потерь (335).

3.6 Режим генерации гигантских импульсов при активной модуляции добротности резонатора 335

Основные временные этапы (335). Балансные уравнения; мгновенное включение добротности (338). Фазовый портрет лазера при мгновенном включении добротности (339). Анализ этапа линейного развития генерации (342). Энергетические характеристики гигантского импульса (343). Длительность и форма гигантского импульса (345). Режим генерации гигантских импульсов при различных временах включения добротности (346). Замечания о развитии импульса в поперечном к оси резонатора направлении (349).

3.7 Лазеры с просветляющимся фильтром 350

Просветляющийся фильтр (350). Дифференциальное уравнение для усредненной плотности светового потока (353). Полная система балансных уравнений для лазера с просветляющимся фильтром (355). Стационарные решения системы балансных уравнений (357). Неустойчивость исходного стационарного состояния и условие самовозбуждения генерации в лазере с просветляющимся фильтром (359). Мягкое и жесткое возбуждение генерации (360). Устойчивость (неустойчивость) стационарных состояний в случае мягкого возбуждения генерации (362). Режимы генерации лазера с просветляющимся фильтром (364).

3.8 Режим генерации гигантских импульсов при пассивной модуляции добротности резонатора 365

Условия обеспечения режима генерации гигантских импульсов в лазере с просветляющимся фильтром (365). Развитие гигантского импульса (367). Балансные уравнения; аналогия со случаем мгновенного включения добротности (369). Сопоставление режимов комбинированная модуляция добротности (371). Естественная селекция продольных мод при пассивной модуляции добротности (374).

3.9 Синхронизация продольных мод (генерация сверхкоротких световых импульсов) 375

Сущность идеи синхронизации продольных мод (376). Неселективный резонатор (378). Активная синхронизация мод (380). Пассивная синхронизация мод (самосинхронизация мод) (381). Комбинированный метод синхронизации мод (383). Способы уменьшения времени релаксации просветляющихся фильтров (384). Влияние эффекта самофокусировки света (385).

3.10 Измерение длительности сверхкоротких импульсов . 387

Основные направления в развитии методов исследования структуры импульсов (387). Метод, использующий генерацию второй гармоники (388). Двухфотонная методика (389). Полная и неполная синхронизация мод и проблема временных измерений (391). Методика, основанная на измерении структуры спектра сигнала (393).

3.11 Рассмотрение самосинхронизации продольных мод в лазере с просветляющимся фильтром на основе флуктуационных представлений 394

Качественное описание физической картины (394). О спектральном и временном описании синхронизации мод (397). Исходный профиль поля излучения (399). Показатель нелинейности (402). Преобразование профиля поля при взаимодействии излучения с фильтром на этапе просветления (402). О возможности синхронизации мод в случае генерации второй гармоники (404). Условия полной самосинхронизации мод (405).

3.12 Временное описание активной синхронизации продольных мод в лазере с однородно уширенной линией усиления	406
Постановка задачи; основные предположения (406). Изменение светового импульса при его прохождении через активный элемент и модулятор (408). Система дифференциальных уравнений, описывающая процесс установления режима синхронизации мод (409). Замечания о фазовых (электрооптических) и амплитудных (акустооптических) синхронизаторах мод (411).	
<i>Список литературы</i>	413
<i>Приложение 1. Полиномы Эрмита</i>	422
<i>Приложение 2. Гауссов пучок в свободном пространстве</i>	426
<i>Приложение 3. Устойчивая и неустойчивая сферические волны в неустойчивом резонаторе</i>	427
<i>Приложение 4. Матрицы Джонса</i>	428
<i>Приложение 5. Особые точки двумерной динамической системы</i>	430
<i>Предметный указатель</i>	432