

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ	7
1.1. Определения	7
1.2. Свойства вероятностей	8
1.2.1. Совместные вероятности	9
1.2.2. Условные вероятности	10
1.2.3. Теорема Байеса для апостериорных вероятностей	11
1.3. Случайные переменные и распределение вероятностей	11
1.3.1. Преобразования случайных переменных	13
1.3.2. Математические ожидания и моменты	14
1.3.3. Неравенство Чебышева	17
1.4. Производящие функции	18
1.4.1. Производящая функция моментов	18
1.4.2. Характеристическая функция	19
1.4.3. Кумулянты	20
1.5. Некоторые примеры распределений вероятности	22
1.5.1. Распределение Бернулли или биномиальное распределение	22
1.5.2. Пуассоновское распределение	23
1.5.3. Распределение Бозе — Эйнштейна	25
1.5.4. Закон больших чисел	25
1.5.5. Нормальное, или гауссовское распределение	26
1.5.6. Центральная предельная теорема	28
1.5.7. Гамма-распределение	29
1.6. Многомерное гауссовское распределение	31
1.6.1. Теорема о гауссовском моменте	33
1.6.2. Производящая функция моментов и характеристическая функция	33
1.6.3. Многократные комплексные гауссовские случайные переменные	34
Задачи	35
2 СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ	37
2.1. Введение в статистические ансамбли	37
2.1.1. Среднее по ансамблю	37
2.1.2. Совместные вероятности и корреляции	38
2.1.3. Функционал вероятности	39
2.2. Стационарность и эргодичность	40
2.2.1. Среднее по времени стационарного процесса	41
2.2.2. Эргодичность	42
2.2.3. Примеры случайных процессов	43
2.3. Свойства автокорреляционной функции	45
2.4. Спектральные свойства стационарного случайного процесса	48

2.4.1.	Спектральная плотность и теорема Винера — Хинчина	48
2.4.2.	Сингулярности спектральной плотности	51
2.4.3.	Нормированные корреляции и нормированные спектральные плотности	52
2.4.4.	Взаимные корреляции и взаимные спектральные плотности	53
2.5.	Ортогональное представление случайного процесса	56
2.5.1.	Разложение Карунена — Луева	56
2.5.2.	Предел $T \rightarrow \infty$. Другой подход к теореме Винера — Хинчина	58
2.6.	Временная эволюция и классификация случайных процессов	60
2.6.1.	Плотности условной вероятности	60
2.6.2.	Абсолютно случайные или сепарабельные процессы	61
2.6.3.	Марковский процесс первого порядка	61
2.6.4.	Марковский процесс высшего порядка	62
2.7.	Основные уравнения в интегро-дифференциальной форме	63
2.8.	Основные уравнения в дифференциальной форме	64
2.8.1.	Дифференциальное уравнение Крамерса — Мойля	64
2.8.2.	Векторный случайный процесс	66
2.8.3.	Порядок дифференциального уравнения Крамерса — Мойля	67
2.9.	Уравнение Ланжевена и уравнение Фоккера — Планка	67
2.9.1.	Моменты перехода для процесса Ланжевена	68
2.9.2.	Стационарное решение уравнения Фоккера — Планка	69
2.9.3.	Зависящее от времени решение уравнения Фоккера — Планка	70
2.10.	Процесс Винера (или одномерное случайное блуждание)	71
2.10.1.	Одномерное случайное блуждание	71
2.10.2.	Совместные вероятности и автокорреляция	73
2.10.3.	Уравнения движения для процесса Винера	73
Задачи	. . . . .	75
3	МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	77
3.1.	Комплексный аналитический сигнал	77
3.1.1.	Определение и основные свойства аналитических сигналов	77
3.1.2.	Квази-монокроматические сигналы и их огибающие	81
3.1.3.	Соотношения между корреляционными функциями действительного и связанного с ним комплексного аналитических случайных процессов	85
3.1.4.	Статистические свойства аналитического сигнала, связанного с действительным гауссовским случайным процессом	88
3.2.	Представление углового спектра волновых полей	90
3.2.1.	Угловой спектр волнового поля в плоско-параллельном слое	90
3.2.2.	Угловой спектр волнового поля в полупространстве	92
3.2.3.	Пример: дифракция на полупрозрачном объекте	96
3.2.4.	Представление Вейля для сферической волны	98
3.2.5.	Дифракционные формулы Рэля	102
3.3.	Метод стационарной фазы	104
3.3.1.	Определение асимптотического разложения	104
3.3.2.	Метод стационарной фазы для однократных интегралов	105
3.3.3.	Метод стационарной фазы для двойных интегралов	108
3.3.4.	Пример: поведение представления углового спектра для волновых полей в дальней зоне	114
Задачи	. . . . .	117
4	ТЕОРИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА СКАЛЯРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ	119
4.1.	Введение	119
4.2.	Некоторые элементарные представления и определения	120
4.2.1.	Временная когерентность и время когерентности	120
4.2.2.	Пространственная когерентность и площадь когерентности	121
4.2.3.	Объем когерентности и параметр вырождения	124

4.3.	Интерференция двух стационарных световых пучков как проявление корреляции второго порядка	127
4.3.1.	Законы интерференции. Функция взаимной когерентности и комплексная степень когерентности	128
4.3.2.	Корреляции второго порядка в пространственно-частотной области. Взаимная спектральная плотность и спектральная степень когерентности	135
4.3.3.	Время когерентности и ширина спектра	139
4.4.	Распространение корреляций	142
4.4.1.	Дифференциальные уравнения распространения взаимной когерентности и взаимной спектральной плотности в свободном пространстве	143
4.4.2.	Распространение корреляций от плоскости	145
4.4.3.	Распространение корреляций от ограниченных поверхностей	147
4.4.4.	Теорема Ван Циттерта — Цернике	148
4.4.5.	Распространение корреляций от первичных источников	151
4.5.	Специальные типы полей	154
4.5.1.	Взаимно спектрально чистый свет	154
4.5.2.	Когерентный свет в пространственно-временной области	157
4.5.3.	Когерентный свет в пространственно-частотной области	160
4.6.	Свободные поля с произвольной степенью когерентности	162
4.6.1.	Уравнения Сударшана для распространения корреляционных функций второго порядка свободных полей	163
4.6.2.	Временная эволюция корреляционных функций второго порядка свободных полей	166
4.6.3.	Взаимосвязь между свойствами временной и пространственной когерентности свободных полей	166
4.6.4.	Взаимосвязь спектральных свойств и свойств пространственной когерентности свободных полей	167
4.7.	Представление по когерентным модам и представление по ансамблю для источников и полей в пространственно-частотной области	168
4.7.1.	Представление по когерентным модам частично когерентных полей в свободном пространстве	168
4.7.2.	Строгое представление взаимной спектральной плотности в виде корреляционной функции	171
4.7.3.	Нормальные моды колебаний частично когерентных первичных источников и представление их взаимной спектральной плотности в виде корреляционной функции	173
	Приложение 4.1	175
	Приложение 4.2	176
	Задачи	177
5	ИЗЛУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ЛЮБОЙ СТЕПЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ	180
5.1.	Введение	180
5.2.	Излучение трехмерных первичных источников	180
5.2.1.	Основные формулы	180
5.2.2.	Излучение от некоторых модельных источников	184
5.3.	Излучение плоских вторичных источников	188
5.3.1.	Общие формулы	188
5.3.2.	Излучение плоских, вторичных, квазиоднородных источников	190
5.3.3.	Обратная задача для плоских, вторичных, квазиоднородных источников	193
5.4.	Теоремы эквивалентности для плоских источников, генерирующих одинаковую интенсивность излучения	196
5.4.1.	Теорема эквивалентности для плоских источников	197
5.4.2.	Пример: эквивалентные гауссовские источники модели Шелла	198
5.4.3.	Экспериментальная проверка теоремы эквивалентности	201
5.5.	Представление по когерентным модам для гауссовских источников модели Шелла	203
5.6.	Оптические лучи	205
5.6.1.	Монохроматические лучи	206

5.6.2.	Пример: монохроматические гауссовские лучи	209
5.6.3.	Частично когерентные лучи	212
5.6.4.	Гауссовские лучи модели Шелла	215
5.7.	Основы радиометрии	224
5.7.1.	Плотность энергии, поток энергии и закон сохранения энергии в скалярных волновых полях	224
5.7.2.	Основные понятия радиометрии	228
5.7.3.	Функция энергетической яркости от плоских, вторичных, квазиоднородных источников	232
5.7.4.	Модель переноса энергии излучения	235
5.7.5.	Радиометрия как коротковолновый предел статистической волновой теории с квазиоднородными источниками	237
5.8.	Влияние пространственной когерентности источника на спектр излучаемых полей	241
5.8.1.	Спектр поля, создаваемого двумя частично коррелированными источниками	242
5.8.2.	Спектр дальнего поля, образуемого плоскими вторичными квазиоднородными источниками	248
5.8.3.	Условие для спектральной инвариантности: закон скейлинга для плоских, вторичных, квазиоднородных источников	254
	Приложение 5.1	258
	Приложение 5.2	260
	Задачи	261
6	ТЕОРИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА ВЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	264
6.1.	Введение	264
6.2.	Равновременная 2×2 -матрица когерентности хорошо коллимированного, однородного, квазимонохроматического светового луча	265
6.3.	Полностью неполяризованный и полностью поляризованный свет. Степень поляризации	271
6.3.1.	Неполяризованный свет (естественный свет)	272
6.3.2.	Полностью поляризованный свет	272
6.3.3.	Степень поляризации	273
6.4.	Прохождение квазимонохроматического луча через линейные, не формирующие изображения устройства	276
6.4.1.	Компенсатор	277
6.4.2.	Поглотитель	278
6.4.3.	Ротатор	278
6.4.4.	Поляризатор	279
6.4.5.	Каскадная система	279
6.5.	Обобщенные матрицы когерентности второго порядка и тензоры когерентности стационарного электромагнитного поля	281
6.5.1.	Электрические, магнитные и смешанные матрицы когерентности (тензоры)	281
6.5.2.	Дифференциальные уравнения первого порядка для распространения тензоров когерентности	283
6.5.3.	Волновые уравнения для распространения тензоров когерентности	285
6.6.	Тензоры взаимной спектральной плотности второго порядка стационарного электромагнитного поля	286
6.6.1.	Электрический, магнитный и смешанный тензоры взаимной спектральной плотности	286
6.6.2.	Дифференциальные уравнения первого порядка для распространения тензоров взаимной спектральной плотности	289
6.6.3.	Уравнения Гельмгольца для распространения тензоров взаимной спектральной плотности	289
	Задачи	290

7	ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ КОГЕРЕНТНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА	292
7.1.	Введение	292
7.2.	Звездная интерферометрия	292
7.3.	Интерференционная спектроскопия	296
7.3.1.	Общие принципы	296
7.3.2.	Проблема фазы	298
7.4.	Когерентность поперечных мод лазерного резонатора	302
7.4.1.	Условия устойчивости для взаимной спектральной плотности света на зеркале резонатора	302
7.4.2.	Природа решений интегрального уравнения (7.4.7)	304
7.5.	Диэлектрический отклик и спектр индуцированной поляризации во флуктуирующей среде	308
7.5.1.	Среда, макроскопические свойства которой не изменяются со временем	308
7.5.2.	Среда, макроскопические свойства которой зависят от времени детерминированным образом	309
7.5.3.	Среда, макроскопические свойства которой случайным образом меняются во времени	310
7.6.	Рассеяние от случайных сред	312
7.6.1.	Основные уравнения для детерминированного рассеяния	312
7.6.2.	Рассеяние на детерминированной среде в приближении Борна первого порядка	313
7.6.3.	Рассеяние случайной средой в приближении Борна первого порядка	316
7.6.4.	Некоторые частные случаи	318
7.6.5.	Рассеяние от простой жидкости	322
	Приложение 7.1	325
	Задачи	326
8	КОРРЕЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА	328
8.1.	Введение	328
8.2.	Пространственно-временные корреляционные функции произвольного порядка	328
8.3.	Пространственно-частотные корреляционные функции произвольного порядка	330
8.4.	Корреляционные функции полей, подчиняющихся гауссовской статистике	333
8.4.1.	Пространственно-временная область	333
8.4.2.	Пространственно-частотная область	336
8.5.	Представление по когерентным модам взаимных спектральных плотностей произвольного порядка	336
8.5.1.	Общие выражения	336
8.5.2.	Одномодовое поле	339
8.5.3.	Поля, подчиняющиеся гауссовской статистике	339
	Задачи	339
9	ПОЛУКЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЯ	341
9.1.	Введение	341
9.2.	Обзор элементарной квантовой механики	342
9.3.	Дифференциальная вероятность фотодетектирования	343
9.4.	Совместные вероятности многократного фотодетектирования	346
9.5.	Интегральные вероятности детектирования	347
9.6.	Фотоэлектрическое детектирование во флуктуирующих полях	347
9.6.1.	Фотоэлектрическая группировка	349
9.7.	Статистика фотоэлектрических отсчетов флуктуирующего поля	349
9.8.	Флуктуации фотоэлектрического тока	352
9.8.1.	Частные случаи	355
9.8.2.	Свет от теплового источника	355
9.8.3.	Спектральная плотность фототока	356
9.9.	Эффект Хэнбери Брауна — Твисса (полуклассическое рассмотрение)	356
9.10.	Звездная интерферометрия интенсивностей	358
9.11.	Спектроскопия флуктуаций	359
	Задачи	360

10 КВАНТОВАНИЕ СВОБОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	361
10.1. Введение	361
10.2. Гамильтониан классического поля и канонические уравнения движения	362
10.2.1. Разложение по плоским волнам	362
10.2.2. Единичные векторы поляризации	363
10.2.3. Энергия электромагнитного поля	366
10.3. Каноническое квантование поперечного поля	367
10.4. Энергетический спектр; фотоны	370
10.4.1. Фоковские состояния	371
10.4.2. Псевдолокализованные фотоны	372
10.4.3. Базис фоковских состояний	373
10.4.4. q -представление фоковских состояний	374
10.4.5. Зависимость операторов поля от времени	375
10.5. Импульс квантованного поля	376
10.6. Момент количества движения квантованного поля	377
10.6.1. Момент количества движения как интеграл движения	377
10.6.2. Разложение полного момента количества движения	379
10.6.3. Собственный (спиновый) момент количества движения	380
10.6.4. Орбитальный момент количества движения	381
10.7. Операторы фазы квантованного поля	382
10.7.1. Первые попытки построения оператора фазы	382
10.7.2. Операторы косинуса и синуса	384
10.7.3. Оператор фазы на основе проекционного оператора на фазовые состояния	385
10.7.4. Операционно определенные фазовые операторы	386
10.8. Пространственно-временные коммутационные соотношения	388
10.8.1. Уравнения движения для \hat{E} и \hat{B}	390
10.9. Вакуумные флуктуации	390
10.9.1. Флуктуации локально усредненных полей	392
10.9.2. Порядок величины вакуумных флуктуаций	393
10.9.3. Сила Казимира между проводниками	394
10.9.4. Лэмбовский сдвиг	395
10.9.5. Вакуумные эффекты в делителе пучка	396
10.10. Непрерывное фоковское пространство	397
10.11. Некоторые теоремы операторной алгебры	398
10.11.1. Теорема об операторном разложении	399
10.11.2. Теоремы о преобразовании подобия	400
10.11.3. Теоремы о производных	400
10.11.4. Нормальный и антинормальный порядок	401
10.11.5. Теорема Кемпбелла — Бейкера — Хаусдорфа	401
Задачи	402
11 КОГЕРЕНТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	404
11.1. Введение	404
11.2. Фоковское представление когерентных состояний	404
11.3. Когерентное состояние как смещенное вакуумное состояние. Оператор смещения	406
11.3.1. Свойства оператора смещения	407
11.4. q -представление когерентных состояний	408
11.5. Эволюция во времени и соотношения неопределенностей	409
11.5.1. Произведение канонических неопределенностей	410
11.5.2. Более общие состояния с минимальной неопределенностью	411
11.6. Когерентные состояния как базис. Неортогональность и переполненность	412
11.6.1. Линейная зависимость когерентных состояний	413
11.6.2. Переполненность	414
11.6.3. Представление операторов по когерентным состояниям	415
11.6.4. Вычисление матричных элементов нормально упорядоченных операторов	416
11.7. Представление состояний и операторов целыми функциями	416

11.8.	Диагональное представление оператора плотности по когерентным состояниям (P -представление Глаубера — Сударшана)	418
11.8.1.	Плотности квазивероятности. Распределение Вигнера	419
11.8.2.	Два достоинства диагонального представления	420
11.8.3.	Диагональное представление $\hat{\rho}$ с помощью последовательности функций	420
11.8.4.	Диагональное представление антинормально упорядоченного оператора плотности	421
11.8.5.	Интегральное представление функции $\phi(v)$	422
11.8.6.	Примеры $\phi(v)$	422
11.9.	Оптическая теорема эквивалентности для нормально упорядоченных операторов	429
11.9.1.	Квантовые характеристические функции	431
11.10.	Более общие представления в фазовом пространстве	432
11.10.1.	Введение	432
11.10.2.	Упорядочение операторов	433
11.10.3.	Приложение к квантовым средним и диагональному представлению по когерентным состояниям	434
11.11.	Многомодовые поля	435
11.11.1.	Когерентные состояния в непрерывном представлении	437
11.12.	Положительно- и отрицательно-частотные операторы поля	437
11.12.1.	Коммутационные соотношения	438
11.12.2.	Нормально упорядоченные корреляционные функции	439
11.13.	Поле, создаваемое классическим током	440
	Задачи	441
12	КВАНТОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ И ФОТОННАЯ СТАТИСТИКА	443
12.1.	Введение	443
12.2.	Фотоэлектрическое измерение оптического поля; нормальное упорядочение	443
12.2.1.	Детектирование нескольких фотонов; корреляционные функции высшего порядка	446
12.2.2.	Символы и операторы упорядочения	447
12.3.	Оператор фотонной плотности	448
12.4.	Интерференционные эксперименты; корреляционные функции второго порядка	449
12.5.	Корреляционные функции и взаимные спектральные плотности произвольного порядка	451
12.5.1.	Свойства корреляционных функций	452
12.5.2.	Взаимные спектральные плотности произвольного порядка	454
12.5.3.	Независящие от фазы весовые функции	455
12.6.	Степень и порядок когерентности	456
12.7.	Значение когерентности второго порядка	458
12.7.1.	Факторизация корреляционных функций	459
12.7.2.	Корреляции произвольного порядка	460
12.7.3.	Оператор плотности для поля	461
12.7.4.	Волновые пакеты в качестве мод	462
12.8.	Стационарность, однородность, изотропность	465
12.8.1.	Стационарность	465
12.8.2.	Условие для оператора плотности	467
12.8.3.	Свойства взаимных спектральных плотностей в случае стационарных полей	468
12.8.4.	Однородность	470
12.8.5.	Изотропность	472
12.9.	Антинормально упорядоченные корреляционные функции	473
12.9.1.	Квантовый счетчик	473
12.9.2.	Замена дифференциальными операторами	477
12.9.3.	Весовой функционал для антинормально упорядоченных корреляционных функций	478
12.10.	Фотонная статистика	481
12.10.1.	Вероятности	482
12.10.2.	Условия для неклассических состояний	484
12.10.3.	Моменты \hat{n}	484

12.10.4. Производящие функции для числа фотонов при нормальном и антинормальном порядке	485
12.11. Проблема локализации фотонов	486
12.11.1. Оператор числа фотонов, определяемый в конфигурационном пространстве	487
12.11.2. Коммутационные соотношения	488
12.11.3. Собственные состояния $\hat{n}(\mathcal{V}, t)$	490
12.11.4. Статистика фотона в конечном объеме	491
12.11.5. Полихроматические фотоны и нелокальность	491
12.12. Влияние аттенюатора или делителя пучка на квантовое поле	494
12.12.1. Операторные соотношения	495
12.12.2. Корреляции фотонов	495
12.12.3. Интерферометр Майкельсона	497
12.12.4. Связь между входными и выходными состояниями для делителя пучка	497
12.13. Влияние поляризатора на поле	499
12.14. Локальность Эйнштейна и корреляции фотонов	500
12.14.1. Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена для перепутанного двухфотонного состояния	501
12.14.2. Неравенства Белла	503
12.14.3. Форма Клаузера — Хорна неравенства Белла	504
12.14.4. Экспериментальное подтверждение	505
12.14.5. Неклассические состояния и неравенства Белла	506
Задачи	507
13 ИЗЛУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В СОСТОЯНИИ ТЕПЛООВОГО РАВНОВЕСИЯ	508
13.1. Излучение черного тела	508
13.1.1. Оператор плотности	508
13.1.2. Статистика фотонов	509
13.1.3. Поляризация	511
13.1.4. Спектральные распределения	512
13.1.5. Диагональное представление $\hat{\rho}$ по когерентным состояниям	513
13.1.6. Корреляционные функции излучения черного тела	514
13.1.7. Функции корреляции высокого порядка	516
13.1.8. Изотропность излучения черного тела	517
13.1.9. Флуктуации интенсивности излучения черного тела	517
13.2. Свет от теплового источника	519
13.3. Пучки стационарного света от теплового источника	520
13.3.1. Флуктуации интенсивности пучка света от теплового источника	521
13.3.2. Статистика фотонов при одинаковых средних числах заполнения	523
Задачи	525
14 КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЯ	526
14.1. Взаимодействия квантованного электромагнитного поля	526
14.1.1. Решение по теории возмущений в картине взаимодействия	527
14.1.2. Электромагнитное взаимодействие между полями и зарядами	529
14.1.3. Многополюсный гамильтониан	531
14.2. Вероятность одноэлектронного фотодетектирования	532
14.2.1. Применение к чистому когерентному состоянию	536
14.2.2. Вычисление вероятности в квазимонохроматическом приближении	537
14.2.3. Вычисление электронного матричного элемента	538
14.2.4. Вычисление вероятности детектирования для аксиально симметричного детектора	539
14.3. N -электронный фотодетектор	540
14.4. Вероятность многократного фотоэлектрического детектирования	541
14.5. Вероятность многократного детектирования при произвольном начальном состоянии поля	542
14.6. Фотоэлектрические корреляции	544
14.6.1. Эффект Хэнбери Брауна — Твисса (квантовая трактовка)	545

14.6.2.	Корреляции фототоков	546
14.7.	Группировка и антигруппировка	548
14.7.1.	Детектирование совпадений	549
14.7.2.	Двухвременные импульсные корреляционные измерения	550
14.7.3.	Антигруппировка	554
14.7.4.	Распределение временного интервала фотоэлектрических импульсов	555
14.8.	Статистика фотоэлектрического счета	557
14.8.1.	Интегральная вероятность детектирования	558
14.8.2.	Примеры вероятности детектирования	561
14.8.3.	Естественная мера времени когерентности	565
14.9.	Свойства вероятности детектирования $p(n, t, t + T)$	565
14.9.1.	Производящие функции и проблема обратного преобразования	565
14.9.2.	Второй момент и субпуассоновская статистика счета	567
14.9.3.	Получение корреляционных функций из статистики счета	568
Задачи	. . . . .	569
15	ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА И ДВУХУРОВНЕВОГО АТОМА	571
15.1.	Динамические переменные для двухуровневого атома	571
15.1.1.	Атомная энергия и атомный дипольный момент	573
15.2.	Блоховское представление	574
15.2.1.	Средние значения спиновых операторов	576
15.3.	Взаимодействие атома с классическим полем	577
15.3.1.	Уравнения Блоха	578
15.3.2.	Уравнения Блоха во вращающейся системе координат	580
15.3.3.	Задача Раби	581
15.3.4.	Отклик атома на воздействие лазерного импульса	582
15.3.5.	2π -импульс в форме гиперболического секанса	583
15.4.	Взаимодействие атома с квантовым полем: подход теории возмущений	585
15.4.1.	Поглощение и излучение фотонов	586
15.5.	Взаимодействие атома с квантовым полем: общее рассмотрение	589
15.5.1.	Гейзенберговские уравнения движения	589
15.5.2.	Приближенное решение — коэффициент Эйнштейна A и лэмбовский сдвиг	592
15.5.3.	Интегральные уравнения движения	594
15.5.4.	Спонтанное излучение	594
15.6.	Резонансная флуоресценция	596
15.6.1.	Зависимость интенсивности света от времени	596
15.6.2.	Сечение рассеяния атомов	600
15.6.3.	Спектр флуоресценции	601
15.6.4.	Корреляция интенсивности флуоресценции	604
15.6.5.	Измерения антигруппировки фотонов	605
15.6.6.	Субпуассоновская статистика фотонов	607
15.7.	Отклонение атомов светом	608
15.7.1.	Передача импульса после n спонтанных испусканий	609
15.7.2.	Передача импульса при вынужденном излучении или градиентные силы в сильном поле	612
15.8.	Охлаждение и пленение атомов	615
15.8.1.	Оптическая меласса	616
15.8.2.	Оценка наименьшей достижимой температуры, основанная на балансе энергии	616
Задачи	. . . . .	618
16	КОЛЛЕКТИВНЫЕ АТОМНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	619
16.1.	Затухание оптической свободной индукции	619
16.1.1.	Эксперименты	621
16.2.	Фотонное эхо	622
16.2.1.	Эхо-эксперименты	625
16.3.	Самоиондуцированная прозрачность	625

16.3.1.	Уравнение движения для огибающей импульса	626
16.3.2.	Теорема площадей Мак-Колла и Хана	627
16.3.3.	Форма импульса	630
16.3.4.	Скорость импульса	631
16.4.	Оптическая бистабильность	632
16.4.1.	Абсорбционная бистабильность в кольцевом резонаторе	633
16.4.2.	Дисперсионная бистабильность	638
16.4.3.	Хаос в оптической бистабильности	638
16.5.	Коллективные атомные состояния и коллективные динамические переменные	639
16.5.1.	Состояния Дике	640
16.5.2.	Вырождение состояний Дике	644
16.6.	Кооперативное атомное излучение	644
16.6.1.	Сверхизлучение Дике	644
16.6.2.	Кооперативное излучение атомов, находящихся в факторизованном состоянии	646
16.6.3.	Временная эволюция сверхизлучения	647
16.6.4.	Некоторые дополнительные усложнения	650
16.6.5.	Более общее кооперативное излучение	650
16.6.6.	Сверхизлучательные классические осцилляции	652
16.7.	Атомные когерентные состояния	653
16.7.1.	Блоховское представление атомного когерентного состояния	655
16.7.2.	Неортогональность и переполненность	656
16.7.3.	Атомные состояния, создаваемые классическим полем	657
Задачи		658
17	ОБЩИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ	659
17.1.	Квантовая теорема регрессии	659
17.1.1.	Одновременные средние значения	660
17.1.2.	Многовременные средние значения	661
17.1.3.	Спонтанное излучение атома	662
17.1.4.	Резонансная флуоресценция двухуровневого атома	662
17.1.5.	Квантовая теорема регрессии для нормально упорядоченных операторов поля	663
17.2.	Флуктуационно-диссипационная теорема	664
17.2.1.	Простая классическая линейная диссипативная система	665
17.2.2.	Квантово-механическая линейная диссипативная система	667
17.2.3.	Мощность рассеяния	668
17.2.4.	Флуктуации тока в состоянии теплового равновесия	669
17.2.5.	Спектральная плотность флуктуаций	670
17.2.6.	Броуновское движение частицы	671
17.2.7.	Флуктуации поля в излучении черного тела	671
17.3.	Основные кинетические уравнения	672
17.3.1.	Основное кинетическое уравнение Паули	673
17.3.2.	Обобщенное основное кинетическое уравнение Цванцига	674
17.3.3.	Применение к кинетическому уравнению Паули	676
17.3.4.	Применение к задаче Дике	677
17.3.5.	Линейное затухание недиагональных матричных элементов	680
17.4.	Источники квантового шума и квантовые уравнения Ланжевена	680
17.4.1.	Введение	680
17.4.2.	Уравнения движения квантовой системы	681
17.4.3.	Коммутационные соотношения	683
17.4.4.	Двухвременные корреляционные функции	685
17.4.5.	Уравнение Ланжевена для возбужденной системы осцилляторов	687
17.4.6.	Необратимость и стрела времени	688
Задачи		689

18 ОДНОМОДОВЫЙ ЛАЗЕР	690
18.1. Введение	690
18.1.1. Условие лазерной генерации	691
18.2. Полуклассическая теория лазера	692
18.2.1. Нормальные моды резонатора	693
18.2.2. Уравнение движения для лазерного поля	695
18.2.3. Аналогия с фазовым переходом	699
18.3. Полуклассическая теория лазера с учетом шума спонтанного излучения	701
18.3.1. Уравнение Фоккера — Планка	702
18.3.2. Стационарное решение	703
18.3.3. Аналогия с фазовым переходом для флуктуирующего лазерного поля	706
18.3.4. Моменты интенсивности света	707
18.4. Квантовая теория лазера	711
18.4.1. Основное кинетическое уравнение для лазерного поля	712
18.4.2. Статистика фотонов	716
18.4.3. Стационарная вероятность	717
18.5. Взаимосвязь между квантовой и полуклассической теориями лазера	720
18.5.1. Представление лазерного поля по когерентным состояниям	720
18.5.2. Стационарное решение основного кинетического уравнения	722
18.6. Решение зависящего от времени уравнения движения	723
18.6.1. Развитие лазерного поля из вакуумного состояния	726
18.6.2. Экспериментальные исследования	728
18.7. Корреляционные функции	731
18.7.1. Функции Грина	731
18.7.2. Корреляция интенсивности	731
18.7.3. Функция корреляции амплитуды поля и спектральная плотность	733
18.7.4. Корреляции высшего порядка	735
18.8. Нестабильности лазера и хаос	736
18.8.1. Связь с моделью Лоренца	739
18.8.2. Линейный анализ устойчивости	739
18.8.3. Примеры неустойчивостей лазера	741
18.8.4. Тест на детерминированный хаос	742
Задачи	744
19 ДВУХМОДОВЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЛАЗЕР	745
19.1. Уравнения движения	746
19.1.1. Учет флуктуаций спонтанного излучения	748
19.2. Стационарное решение	749
19.2.1. Моменты интенсивности света	751
19.2.2. Сравнение с экспериментом	753
19.3. Аналогия с фазовым переходом	755
19.3.1. Минимумы потенциалов	756
19.3.2. Случай константы связи $\xi < 1$: фазовый переход второго рода	757
19.3.3. Случай константы связи $\xi > 1$: фазовый переход первого рода	758
19.3.4. Скрытая теплота фазового перехода	762
19.4. Зависящее от времени решение в случае константы связи $\xi = 1$	763
19.4.1. Решение методом разделения переменных для случая $\xi = 1$, $a_1 = a_2$	763
19.4.2. Функция Грина	767
19.4.3. Корреляционные функции	767
19.5. Зависящее от времени решение в более общем случае взаимодействия между модами $\xi \neq 1$	770
19.5.1. Переключение мод и времена первого прохождения	770
19.5.2. Распределения времен первого прохождения	774
Задачи	775

20	ЛИНЕЙНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СВЕТА	777
20.1.	Введение	777
20.2.	Основное кинетическое уравнения для поля усилителя	778
20.3.	Решение основного кинетического уравнения	778
20.3.1.	Корреляции входа — выхода	780
20.4.	Статистика фотонов	780
20.4.1.	Распределения вероятностей	781
20.4.2.	Полностью инвертированный усилитель света	783
20.5.	Сжатый свет	783
20.6.	Условие, при котором поле на выходе усилителя является классическим	784
	Задачи	785
21	СЖАТЫЕ СОСТОЯНИЯ СВЕТА	786
21.1.	Определение квадратурного сжатия	786
21.2.	Квантовая природа сжатого состояния	788
21.3.	Унитарный оператор сжатия	789
21.3.1.	Сжатие двухфотонного когерентного состояния	790
21.3.2.	Действие оператора сжатия на произвольное состояние	790
21.4.	Идеальное сжатое состояние	791
21.4.1.	Фотонная статистика	793
21.5.	Двухфотонное когерентное состояние	794
21.5.1.	Преобразованные фоковские состояния	795
21.5.2.	Представление по когерентным состояниям двухфотонного когерентного состояния	797
21.5.3.	Фотонная статистика двухфотонного когерентного состояния	797
21.6.	Детектирование сжатия гомодинированием с когерентным светом	799
21.7.	Сжатие, реализованное на практике: вырожденная параметрическая вниз-конверсия	800
21.7.1.	Создание сжатого состояния при вырожденной параметрической вниз-конверсии	802
21.8.	Широкополосный сжатый свет	803
21.8.1.	Гомодинирование и корреляционные функции	804
21.8.2.	Квадратурные корреляции	806
21.8.3.	Спектральные корреляции	807
21.8.4.	Спектрально-компонентное сжатие и степень сжатия	808
21.8.5.	Примеры степени сжатия $Q(\omega)$	808
21.9.	Сжатие высшего порядка	809
21.9.1.	Сжатие N -го порядка двухфотонного когерентного состояния	810
21.9.2.	Амплитудно-квадратичное сжатие	811
	Задачи	812
22	НЕКОТОРЫЕ КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ	813
22.1.	Введение	813
22.2.	Энергия поля в диэлектрике	813
22.3.	Генерация оптических гармоник	814
22.3.1.	Сжатие при генерации гармоник	816
22.4.	Параметрическая вниз-конверсия	816
22.4.1.	Решение уравнений движения	817
22.4.2.	Статистика фотонов	818
22.4.3.	Доказательство неклассического поведения	820
22.4.4.	Многомодовая теория возмущений процесса параметрического распада	821
22.4.5.	Перепутанное квантовое состояние	822
22.4.6.	Скорость вниз-конверсии	823
22.4.7.	Временной интервал между сигнальным и холостым фотонами	824
22.4.8.	Интерференционные эксперименты с двумя вниз-конверторами	827
22.5.	Вырожденное четырехволновое смешение	831
22.5.1.	Уравнения движения	832
22.5.2.	Применение к когерентному состоянию	832
22.5.3.	Сжатие в четырехволновом смешении	833

22.5.4.	Фазовое сопряжение	834
22.6.	Квантовые неразрушающие измерения	836
22.6.1.	Эффект Керра — пример QND-переменной	836
22.6.2.	Анализ интерференционного эксперимента	837
22.6.3.	Вычисление видности интерференционных полос	838
22.6.4.	Фазовый сдвиг зондирующей волны	839
22.6.5.	Дополнительность	840
Задачи	. . . . .	840

ЛИТЕРАТУРА	842
-------------------	------------

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	872
-----------------------------	------------