

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К 7-му ИЗДАНИЮ	21
Глава 1. СВЕТ, АТОМЫ, МОЛЕКУЛЫ, ТВЕРДЫЕ ТЕЛА	23
1.1. Свойства видимого излучения	23
Световые волны, электромагнитное излучение	24
Фотоны	26
Поляризация	26
Цвет видимого излучения	27
1.2. Атомы: орбиты электронов, уровни энергии	28
1.3. Многоэлектронные атомы	31
Связь электронов	32
Правила отбора	33
1.4. Молекулы	33
Электронные состояния	33
Колебания и вращения	35
1.5. Энергетические уровни в твердотельных лазерах	37
Полупроводники	38
Примесные атомы в изоляторах	38
Центры окраски	39
1.6. Энергетические зоны в полупроводниках	40
Энергия электронов и дырок	42
Плотности состояний	42
Вероятность заселения (распределение Ферми)	43
Легирование	44
Инжекция носителей заряда, электронная плотность и энергия Ферми	44
Электронные волны в полупроводниках	45
Потенциальный барьер	46
ЗАДАЧИ	47
Глава 2. ПОГЛОЩЕНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА	48
2.1. Поглощение	48
Атомистическая интерпретация поглощения	49
2.2. Спонтанное испускание	50
2.3. Усиление света за счет индуцированного испускания	51
Коэффициент усиления	52
Распределение Больцмана, отрицательная температура	53
2.4. Ширина линий	54
Естественная ширина линии	55
Столкновительное уширение	55
Доплеровское уширение	56
Прочие механизмы уширения	57
2.5. Создание и уменьшение инверсной населенности	58
Насыщение усиления	58
2.6. Световое излучение, генерированное ускоренными электронами	60
2.7. Конструктивное исполнение лазеров	61
Сверхизлучение	61

Лазер: пороговое условие генерации	62
Стационарная генерация лазерного излучения	63
2.8. Характеристика излучения в зависимости от времени	64
Стационарное решение скоростных уравнений	67
Слабые релаксационные колебания	68
Сильные релаксационные колебания	69
Появление релаксационных колебаний	70
ЗАДАЧИ	70
Глава 3. ТИПЫ ЛАЗЕРОВ	72
Обзорная характеристика разных типов лазеров	73
3.1. Длины волн и выходные мощности	74
3.2. Перестраиваемые лазеры	78
3.3. Лазеры, стабильные по частоте	80
3.4. Высокомощные лазеры	81
3.5. Сверхкороткие световые импульсы	82
3.6. Параметры лазеров	83
ЗАДАЧИ	84
Глава 4. ЛАЗЕРНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ	85
4.1. Гелий-неоновые лазеры	85
Схема энергетических уровней	86
Возбуждение	87
Длины волн	87
Конструктивное исполнение	89
Свойства пучка	90
4.2. Лазеры на парах металла (Cu, Au)	91
Схема энергетических уровней	91
Конструктивное исполнение	93
Области применения	94
Извлечение меди из соединений	95
4.3. Йодные лазеры, COIL	95
ЗАДАЧИ	97
Глава 5. ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ	98
5.1. Лазеры для коротковолновой области	98
5.2. Ионные лазеры на инертном газе	100
Ионные аргоновые лазеры	100
Конструктивное исполнение	103
Ионные криптоновые лазеры	104
Области применения	105
5.3. Ионные лазеры на парах металла (Cd, Se, Cu)	105
He-Cd- и He-Se-лазеры	105
Прочие лазеры на парах металла	108
ЗАДАЧИ	108
Глава 6. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ЛАЗЕРЫ (ИРАЗЕРЫ)	109
6.1. Лазеры дальнего ИК-диапазона	109
Лазеры с оптической накачкой	109
Лазеры дальнего ИК-диапазона с электрической накачкой	111

6.2. CO ₂ -лазеры	111
Процессы возбуждения в газовых разрядах	112
Возбуждение	114
Схема энергетических уровней	114
Линии лазерного излучения	116
Непрерывный и импульсный режимы генерации	117
Лазер с медленным аксиальным газовым потоком	118
Лазер в герметичном корпусе (англ. sealed-off-laser)	120
Волноводные лазеры (англ. waveguide laser)	120
Лазеры с быстрым газовым потоком	121
Лазеры с высокочастотным возбуждением	122
Лазеры атмосферного давления с поперечной накачкой (TEA-laser)	122
Газодинамические CO ₂ -лазеры	123
Перестраиваемые CO ₂ -лазеры высокого давления	124
6.3. СО-лазеры	124
6.4. Фтороводородные (HF)-лазеры	127
Схема энергетических уровней и процессы возбуждения	127
Конструктивное исполнение	129
DF-лазеры	130
ЗАДАЧИ	130
Глава 7. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ УФ-ЛАЗЕРЫ	131
7.1. Азотные лазеры	131
Схема энергетических уровней	132
Конструктивное исполнение	133
7.2. Лазеры на эксимере	134
Энергетические уровни	135
Конструктивное исполнение	137
Частотная селекция для литографских лазеров	140
Преобразование частоты	140
ЗАДАЧИ	141
Глава 8. ЛАЗЕРЫ на КРАСИТЕЛЯХ	143
8.1. Свойства лазеров на красителях	143
Оптическая накачка	145
8.2. Возбуждение с помощью ламп-вспышек	145
8.3. Возбуждение с помощью лазера	146
Импульсные лазеры (нс)	146
Непрерывные лазеры	148
Сверхкороткие импульсы	150
ЗАДАЧИ	151
Глава 9. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ	152
9.1. Рубиновые лазеры	153
Схема энергетических уровней	153
Излучение рубиновых лазеров	155
Конструктивное исполнение рубиновых лазеров	156
9.2. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом и альтернативные варианты	157
Схема энергетических уровней лазеров Nd: ИАГ	158
Лазерное излучение	160

Лазеры на Nd: Сг: ГСГГ (гадолиний-скандий-галлиевый гранат)	162
Лазеры на Nd: ИЛФ (иттрий-литий-фторид)	163
Кристаллы, сохраняющие поляризацию	163
Лазерные кристаллы с диодным возбуждением	164
Исполнение неодимовых лазеров с накачкой лампой-вспышкой	164
9.3. Лазеры на стекле	165
Лазеры на стекле с неодимом	166
Сравнительная характеристика лазерных веществ	167
9.4. Эрбиевые и гольмиевые лазеры	167
Лазеры на эрбии	167
Лазеры на гольмии	169
9.5. Перестраиваемые твердотельные лазеры	170
Лазеры на александрите	171
Лазеры на сапфире с титаном	173
Лазеры на Yb: ИАГ	175
Лазеры на Yb: КГВ (калий-гадолиний-вольфрам)	176
9.6. Лазеры на центрах окраски	177
Схема энергетических уровней	177
Конструктивное исполнение	179
9.7. Дискные и волоконные лазеры с диодной накачкой	180
Лазеры с диодной накачкой	180
Дискный лазер	183
Волоконные лазеры	183
ЗАДАЧИ	185
Глава 10. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ	187
10.1. Усиление света в диодах <i>p-n</i> -структуры	189
10.2. Лазеры на основе GaAlAs и InGaAsP	191
10.3. Конструктивное исполнение диодных лазеров	193
Двойная гетероструктура	194
Полосковые лазеры	195
Волноводные лазеры ребристой структуры (англ. ridge waveguide laser)	196
Лазеры с горизонтальным резонатором и поверхностным излучением (HCSEL = англ. horizontal-cavity surface-emitting)	197
Трапецеидальный усилитель	197
Лазерные матрицы и пакеты для высоких выходных мощностей	198
Монтаж и отвод тепла у высокоомощных диодных лазеров	199
Формирование пучка и ввод в волокнах	200
Лазеры с потенциальной ямой и потенциальной точкой	202
10.4. Излучательные свойства диодных лазеров	203
Характеристики излучения	204
10.5. Подстройка частоты диодных лазеров	207
Частотно-зависимое усиление света в полупроводниках: теория	207
Частотная зависимость усиления	210
Конструктивное исполнение диодных лазеров с подстраиваемой частотой (external cavity laser, ECL)	211
Перестраиваемые лазеры DFB (distributed feedback) или DBR (distributed Bragg reflector)	212

10.6. Диодные лазеры с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (VCSEL)	214
10.7. Полупроводниковые лазеры для нижнего ИК-диапазона и ТГц-излучения	217
Лазеры на соли свинца	217
Квантовые каскадные лазеры	218
10.8. Лазеры на GaN в фиолетовой, синей и зеленой областях спектра	219
Лазеры на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^{VI}$	219
Лазеры на нитридах $A^{III}B^V$	220
Области применения	220
10.9. Полупроводниковые лазеры для дальней связи	221
ЗАДАЧИ	222
Глава 11. ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ, КОГЕРЕНТНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ И АТОМНЫЕ ПУЧКИ	223
11.1. Электронно-лучевые лазеры (FEL)	224
Конструктивное исполнение	224
Спонтанное излучение	225
Усиление света	227
Самоусиливающееся спонтанное излучение, SASE-FEL	228
11.2. Рентгеновские и вакуумные УФ-лазеры с высокоионизированными атомами	228
Ударное электронное возбуждение	230
Рекомбинационное возбуждение	232
Системы с электрической накачкой	233
Перспективы развития	233
11.3. Когерентные атомные лучи	233
ЗАДАЧИ	234
Глава 12. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН	236
12.1. Плоские и сферические волны, дифракция	236
Плоские волны	236
Сферические волны	237
Ограниченные волны, дифракция	237
12.2. Гауссовы пучки	238
Сферические волны с мнимым центром	239
Радиусы лучей	240
Угол расходимости	241
Радиус кривизны фазовых поверхностей	241
Параметр q	242
Высшие моды Эрмита — Гаусса	242
Радиусы и расходимость высших мод	243
12.3. Прохождение гауссовых пучков через линзы	243
Геометрическая оптика	244
Преобразование гауссовых пучков	245
Фокусировка гауссова пучка	246
12.4. Телескопы и фильтры пространственных частот	246
Телескоп Кеплера	246
Зрительная труба Галилея	248
Фильтры пространственных частот	248

12.5. Распространение реальных лазерных лучей	249
Числовая мера дифракции M^2	250
Определение M^2	251
Определение радиусов лучей	251
Лазерные лучи с $M^2 > 1$	252
Измерение с помощью электронной камеры	253
Измерение с подвижными диафрагмами	253
Измерение с подвижным срезом	253
Плотность энергии излучения	254
12.6. Оптические материалы	255
Ультрафиолетовая область спектра	256
Видимая область спектра	257
Инфракрасная область спектра	257
12.7. Оптические волокна	257
Моды в плоских световодах	258
Моды в стекловолокнах	259
Волокно со ступенчатым изменением показателя преломления	261
Градиентные волокна	261
Одномодовое волокно (single-mode fiber).	262
Затухание	262
Материалы для изготовления волокон	263
Фотонные кристаллические волокна	264
ЗАДАЧИ	265
Глава 13. ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ.	267
13.1. Резонатор с плоскими зеркалами	267
Аксиальные моды	267
Потери резонатора	269
13.2. Резонатор с вогнутыми зеркалами	269
Высшие поперечные моды	271
13.3. Типы резонаторов	274
Диаграмма устойчивости	276
13.4. Неустойчивые резонаторы.	277
13.5. Лазер с основной модой.	278
ЗАДАЧИ	280
Глава 14. ЗЕРКАЛА	281
14.1. Отражение и преломление	281
Коэффициент отражения	282
Полное отражение	283
Дисперсия	285
14.2. Металлические зеркала	285
14.3. Диэлектрические многослойные зеркала	286
Противоотражение (просветление).	286
Лазерные зеркала	288
14.4. Устройство для расщепления пучка (светоделитель)	289
14.5. Фазосопрягающие элементы	292
Комбинация из четырех волн	293

Индуцированное рассеяние	294
Области применения	295
ЗАДАЧИ	296
Глава 15. ПОЛЯРИЗАЦИЯ	298
15.1. Виды поляризации	298
Линейная поляризация	298
Круговая поляризация	298
Эллиптическая поляризация	299
15.2. Двойное лучепреломление	299
15.3. Поляризаторы	301
Дихроичные поляризационные фильтры	301
Поляризационные призмы	302
Брюстеровские пластинки, тонкослойные поляризаторы	303
Четвертьволновые и полуволновые пластинки	303
ЗАДАЧИ	304
Глава 16. МОДУЛЯЦИЯ И ОТКЛОНЕНИЕ ЛУЧА	306
16.1. Механические модуляторы	306
16.2. Акустооптические модуляторы	307
Схема Брэгга	308
Бегущие и стоячие ультразвуковые волны	308
Модуляторы	309
Дефлекторы	309
Акустооптические материалы	310
16.3. Электрооптические модуляторы	310
Ячейки Поккельса	310
Ячейки Керра	312
16.4. Оптические развязки	313
Эффект Фарадея	313
Фарадеевский вращатель плоскости поляризации	313
16.5. Насыщающиеся поглотители	314
ЗАДАЧИ	315
Глава 17. ИМПУЛЬСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	316
17.1. Релаксационные колебания	316
17.2. Модуляция добротности	319
Электрооптические затворы	321
Прочие затворы	322
17.3. Выход импульса (опустошение резонатора)	323
17.4. Синхронизация мод	323
Синхронизация мод в насыщающемся поглотителе (пассивная)	326
Синхронизация мод на основе столкновения импульсов (пассивная)	327
Синхронизация мод с использованием модулятора (активная)	327
Синхронная накачка (активная)	329
Синхронизация мод с помощью линзы Керра (пассивная)	329
Области применения: излучение в ТГц-диапазоне	330
17.5. Усиление и сжатие импульсов	330
ЗАДАЧИ	333

Глава 18. ЧАСТОТНАЯ СЕЛЕКЦИЯ И ПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ	335
18.1. Подстройка частоты	335
18.2. Селекция продольных мод	336
Спектральное выгорание провалов	336
Пространственное выгорание провалов	337
Лазеры небольшой длины для одночастотной генерации излучения	337
Лазеры с частотно-селективными элементами	337
18.3. Призма	339
18.4. Решетки	340
18.5. Эталон Фабри — Перо	341
18.6. Двоycopеломляющие фильтры	343
ЗАДАЧИ	344
Глава 19. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ	345
19.1. Эффект Доплера	345
19.2. Нелинейные оптические эффекты	346
Смещение частот	346
19.3. Удвоение и умножение частоты	347
Кристаллы	349
Высшие гармоники	350
19.4. Параметрические усилители и генераторы	350
19.5. Вынужденное комбинационное рассеяние	352
19.6. Создание непрерывного спектра (континуума)	355
19.7. Генерация высших гармоник в газах	356
ЗАДАЧИ	359
Глава 20. СТАБИЛЬНОСТЬ И КОГЕРЕНТНОСТЬ	360
20.1. Стабильность мощности лазера	360
Стабильность направления	361
Стабильность поляризации	361
20.2. Стабильность частоты	362
Лэмбовский провал	363
Активная стабилизация	364
Фазовые флуктуации	365
20.3. Дробовой шум, «заглушенные состояния»	365
«Заглушенные состояния»	366
20.4. Когерентность	367
Временная когерентность	367
Пространственная когерентность	369
ЗАДАЧИ	370
Глава 21. ФОТОДЕТЕКТОРЫ И УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ	371
21.1. Основные понятия из области измерительной техники	371
21.2. Тепловые детекторы	372
Термоэлементы	372
Пирозлектрические детекторы	373
Области применения	373
21.3. Вакуумные фотодетекторы	374
Вакуумный диод	375
Фотоэлектронный умножитель	375

Канальная плата (channel plate)	376
Электронно-оптический преобразователь (ЭОП)	376
Камера с щелевой разверткой	377
21.4. Полупроводниковые детекторы	377
Фоторезистор	378
Фотодиод	378
ПЗС-камера	379
Формирователь видеосигнала с КМОП-структурой	381
21.5. Измерение сверхкоротких световых импульсов с помощью автокоррелятора и техники FROG	381
ЗАДАЧИ	382
Глава 22. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ	384
22.1. Призмный спектрометр	384
22.2. Дифракционный спектрометр	385
Отражательные решетки	386
22.3. Двухлучевой интерферометр	386
22.4. Интерферометр Фабри — Перо	388
Интерференционные фильтры	389
22.5. Техника оптического гетеродинирования	389
ЗАДАЧИ	390
Глава 23. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРОВ ...	391
23.1. Передача информации по стекловолоконкам	391
23.2. Лазерная обработка материалов	393
Лазеры для обработки материалов	397
Области применения	398
23.3. Лазеры в медицине и биофотонике	404
Лазерная хирургия	404
Биофотоника и медицинская диагностика	407
23.4. Термоядерная реакция с применением лазеров	413
Ракетное оружие на основе лазерного излучения	415
23.5. Использование лазеров в области научных исследований	415
23.6. Голография и интерферометрия	416
Голографическая интерферометрия	418
23.7. Светорассеяние для измерения скорости потока	419
23.8. Лазеры в приборах и оборудовании	420
Устройства считывания штриховых кодов	421
Audio-CD, CD-ROM, DVD, Blu-ray Disc	422
Лазерные принтеры	425
Лазерные пико-проекторы	426
23.9. Перспективы развития лазеров	427
Перспективы применения лазеров в научных целях	428
Перспективы использования лазеров в технике	429
Экономические аспекты	430
Резюме	431
ЗАДАЧИ	431
Глава 24. БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ УСТРОЙСТВ	433
24.1. Предельные показатели безопасности для глаз	434

24.2. Лазерные защитные очки	435
24.3. Классы лазеров и потенциал опасности	436
24.4. Правила техники безопасности	437
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ	438
Глава 1	438
Глава 2	439
Глава 3	443
Глава 4	444
Глава 5	445
Глава 6	446
Глава 7	447
Глава 8	448
Глава 9	448
Глава 10	450
Глава 11	452
Глава 12	452
Глава 13	454
Глава 14	455
Глава 15	455
Глава 16	456
Глава 17	456
Глава 18	458
Глава 19	459
Глава 20	461
Глава 21	461
Глава 22	461
Глава 23	462
Дополнение 1. ОСОБЕННОСТИ ГАЗОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ «ЛИНДЕ ГАЗ РУС»	463
Резонаторные газы	463
Состав газов для лазеров	463
Чистота газов для лазеров	464
Соединители для трубной разводки	466
Рабочие газы	467
Дополнение 2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИХ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	473
Введение	473
Заключение	488
Литература	489
Предметный указатель	490