

СОДЕРЖАНИЕ

Авторы	14
Список участников	15
Предисловие	24
Глава 1. Обзор рынка специальных оптических волокон.	29
1.1. Обзор рынка	29
1.1.1. Зависимость производства от потребления	30
1.1.2. Стремительный рост потребности в использовании волоконно-оптических датчиков	30
1.1.3. Разработка систем вооружения	30
1.1.4. Коэффициент модернизации: 100 — 1000	31
1.1.5. Высокая стоимость специализированного исполнения	31
1.1.6. Множество свойств одних и тех же специальных оптических волокон	31
1.2. Специальные оптические волокна: несколько избранных примеров	32
1.2.1. Фторидное волокно	32
1.2.2. Теллуридовые волокна	32
1.2.3. Волокна, легированные висмутом	33
1.2.4. Поляризационные волокна	33
1.2.5. Дырчатые — фотонно-кристаллические — волокна	33
1.2.6. Волокна с компенсацией дисперсии	35
1.2.7. Волокна с высоким показателем преломления	38
1.2.8. Волокна, сохраняющие поляризацию	38
1.2.9. Фоточувствительные волокна	39
1.2.10. Волокна, легированные эрбием	40
1.3. Выводы.	44
Глава 2. Теоретические основы работы световодов и разработки оптического волокна	45
2.1. Введение.	45
2.2. Физическая структура оптического волокна, предназначенного для систем связи.	46
2.3. Линейное распространение световых волн в оптическом кабеле.	46
2.3.1. Предварительные сведения об электромагнитных волнах	46
2.3.2. Интуитивный анализ на примере пластинчатого волновода.	47
2.3.3. Оптическое волокно: цилиндрический волновод	49
2.3.4. Множество линейно поляризованных волн (мод) LP _{lm}	51
2.3.5. Расчет волновода на основе анализа методом конечных элементов	52
2.4. Рабочее определение критической длины волны	54
2.4.1. Введение	54
2.4.2. Теоретическое значение критической длины волны	54
2.4.3. Эффективные значения критической длины волны	55
2.5. Зависимость потерь на макроизгибах от структуры профиля показателя преломления.	57
2.5.1. Структура волокна с пониженным индексом преломления оболочки	57
2.5.2. Феноменология потерь на макроизгибах.	58
2.6. Потери на затухание в волокне	61
2.7. Причины хроматической дисперсии	62
2.7.1. Введение	62
2.7.2. Материальная дисперсия	63
2.7.3. Волноводная дисперсия	64

2.8. Поляризационная модовая дисперсия	68
2.8.1. Обзор состояния вопроса	68
2.8.2. Основные положения	69
2.8.3. Моделирование и имитационные эксперименты	71
2.8.4. Контроль поляризационной модовой дисперсии PMD при производстве волокна	73
2.8.5. Измерение поляризационной модовой дисперсии PMD	74
2.8.6. Установление соответствия между значениями PMD в волокне, кабеле и в условиях эксплуатации	76
2.9. Потери на микроизгибах	78
2.9.1. Микроизгибы	78
2.10. Нелинейные эффекты в волокне	82
2.10.1. Общий обзор	82
2.10.2. Основные положения	84
Литература	88
Глава 3. Обзор материалов и производственных технологий	91
3.1. Способ двойного тигля	91
3.2. Методы осаждения из газовой фазы	92
3.3. Внешнее парофазное осаждение	93
3.4. Вертикальное осевое осаждение	94
3.5. Прямое осаждение наночастиц	95
3.6. Метод химического парофазного осаждения	97
3.6.1. Химическое равновесие: внесение присадок	98
3.6.2. Очистка от гидроксильного загрязнения	100
3.6.3. Термофорез	101
3.7. Метод плазмохимического парофазного осаждения	102
3.8. Золь-гелевые процессы	102
3.8.1. Алкоксидный золь-гелевый процесс	103
3.8.2. Золь-гелевая коллоидная обработка	104
3.9. Производство золь-гелевых микроструктурных волокон	106
3.10. Вытягивание волокна	108
Литература	110
Глава 4. Покрытия оптических волокон	113
4.1. Введение	113
4.2. Первые образцы покрытий оптических волокон	113
4.3. Эволюция оптических волокон и защитных покрытий	115
4.3.1. Роль покрытия в минимизации микроизгибов	115
4.3.2. Механика разрушения стекловолокна и роль покрытия в сохранении прочности волокна	117
4.3.3. Износостойкость покрытий оптических волокон	118
4.4. Размещение оптических волокон в кабеле	119
4.5. Специализированные покрытия	120
4.6. Химические основы производства оптических волокон	120
4.6.1. Олигомеры	121
4.6.2. Мономеры	122
4.6.3. Фотоинициаторы	122
4.6.4. Активаторы склеивания	122
4.6.5. Другие добавки	123
4.7. Нанесение покрытий в установке для вытягивания	125
4.7.1. Методы измерения скорости отверждения покрытия	128
4.7.2. Характеристики отверждения покрытий, нанесенных на волокно	129

4.7.3 Методы измерения, применяемые для жидкостей и пленок с УФ-отверждением	131
4.7.4. Адгезионная способность покрытия	132
4.8. Итоги	133
Благодарности	134
Литература	134
Глава 5. Одномодовые волокна связи	138
5.1. Введение	138
5.2. Связь между параметрами волокна и систем передачи	139
5.2.1. Ограничения, накладываемые отношением сигнал—шум в оптике	139
5.2.2. Ограничения, накладываемые межсимвольной интерференцией	140
5.2.3. Ограничения, накладываемые нелинейными эффектами	141
5.2.4. Ограничения, накладываемые технологиями усиления.	142
5.2.5. Может ли структура волокон способствовать оптимизации систем передачи?	142
5.3. Обзор стандартов МСЭ-Т, посвященных волокнам	144
5.4. Оптические волокна с пониженным затуханием	146
5.4.1. Волокна с сердечником из чистого кварца	147
5.4.2. Волокна с нулевым пиком воды	147
5.5. Принципы разработки волокон для широкополосной и высокоскоростной передачи	155
5.5.1. Точная компенсация дисперсионных искажений.	155
5.5.2. Методы компенсации дисперсии в волокне.	155
5.5.3. Компенсация дисперсии во всей полосе	156
5.5.4. Требование низкой остаточной дисперсии	157
5.5.5. Факторы, влияющие на нелинейность.	158
5.5.6. Искажения, обусловленные рамановским усилением.	159
5.5.7. Системные последствия дисперсии PMD в передающем волокне Tx	160
5.5.8. Обобщение принципов проектирования	161
5.6. Разработка волокон с ненулевой дисперсией NZDF.	161
5.6.1. Согласование передаточных параметров волокна	161
5.6.2. Реализуемость, производительность и развитие	162
5.6.3. Низкодисперсионные волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDF	164
5.6.4. Среднедисперсионные волокна NZDF	167
5.7. Новые парадигмы в разработке линий передачи.	170
Литература	171
Глава 6. Специализированные одномодовые волокна	175
6.1. Введение	175
6.2. Волокна с макроотверстиями.	176
6.2.1. Микрофлюидальные устройства	178
6.3. Волокна с внутренними электродами.	179
6.3.1. Процесс введения электродов	179
6.3.2. Приложения.	182
6.4. Волокна и компоненты с несколькими сердцевинами	184
6.4.1. Связанные сердцевины	185
6.4.2. Несвязанные сердцевины	188
6.4.3. Производство волокон с несколькими сердцевинами.	191
6.5. Волокна для решеток, стойких к высоким температурам	192
6.6. Итоги	196
Литература	196

Глава 7. Волокна, легированные редкоземельными элементами	201
7.1. Введение	201
7.2. Теоретические основы	202
7.3. Базовые стекла для редкоземельных ионов	204
7.4. Производство волокон, легированных редкоземельными элементами	206
7.4.1. Краткий обзор производства оптического волокна	206
7.4.2. Включение редкоземельных элементов	208
7.4.3. Обобщение методов производства волокон, легированных редкоземельными элементами	215
7.5. Волокно, легированное эрбием	215
7.5.1. Принципы действия	216
7.5.2. Вопросы разработки конструкции волокна	218
7.5.3. Вопросы выбора состава волокна	220
7.5.4. Коротковолновые усилители	223
7.6. Системы, использующие совместное легирование эрбием/иттербием Er/Yb	225
7.7. Волокно с двойной оболочкой	226
7.7.1. Ограничения волоконных лазеров	228
7.7.2. Методы улучшения качественных показателей	229
7.8. Заключение	239
Литература	239
Глава 8. Волокна, сохраняющие поляризацию	244
8.1. Что такое волокно, сохраняющее поляризацию?	244
8.2. Применения: зачем использовать РМ-волокна?	244
8.2.1. Интерферометрия	244
8.2.2. Волоконно-оптический гироскоп	245
8.2.3. Когерентные системы связи	246
8.2.4. Интегральная оптика	247
8.2.5. Доплеровская лазерная анемометрия и велосиметрия	248
8.2.6. Блоки объединения накачки на легированных эрбием волоконных усилителях EDFA, схемы подавления отражения, считывание (по)тока и томография оптической когерентности	249
8.3. Как работают РМ-волокна?	249
8.4. Типы РМ-волокон: с двулучепреломлением, обусловленным напряжением и формой	250
8.4.1. Волокна с двулучепреломлением, обусловленным напряжением: типа «бабочка», PANDA и с эллиптической оболочкой	250
8.4.2. Elliptical Core, Form-Birefringent Fiber	253
8.4.3. Микроструктурированные («дырчатые») волокна	253
8.4.4. Поляризующее волокно	254
8.5. Методы производства волокон с РМ	255
8.5.1. Волокна типа «бабочка»	255
8.5.2. Волокно типа «панда» (PANDA)	257
8.5.3. Волокно с эллиптической оболочкой	257
8.5.4. Эллиптический сердечник, волокно с двойным лучепреломлением, создаваемым формой	259
8.5.5. Микроструктурированные («дырчатые») волокна	259
8.6. Ключевые качественные показатели	260
8.6.1. Затухание (α)	260
8.6.2. Числовая апертура (NA)	261
8.6.3. Есть ли связь между сохранением поляризации и затуханием?	262
8.6.4. Длина волны отсечки (λ_c)	263

8.6.5. Диаметр модового поля (MFD)	263
8.6.6. Длина биений (L_p)	265
8.6.7. Коэффициент гашения (ER)	267
8.6.8. Параметр Н	267
8.6.9. Влияние условий испытаний и окружающей среды на характеристики сохранения поляризации	268
8.7. Механические свойства и параметры срока службы	270
8.7.1. Парадокс прочности I: хрупкие заготовки создают исключительно прочные волокна	270
8.7.2. Парадокс прочности II: тонкие волокна могут быть прочнее толстых	272
Литература	273
Глава 9. Светочувствительные волокна	275
9.1. Введение	275
9.2. Конструкция и производство	276
9.3. Волокна со стандартными числовыми апертурами	278
9.3.1. Стандартные одномодовые волокна	278
9.3.2. Германиево-силикатные волокна, легированные бором	279
9.3.3. Волокна, легированные сурьмой	282
9.3.4. Волокна, легированные оловом	282
9.4. Волокна с высокими значениями числовой апертуры	282
9.4.1. Высоколегированные германием Ge кварцевые оптические волокна	283
9.4.2. Легированные оловом германиево-силикатные волокна	285
9.4.3. Легированные индием германиево-силикатные волокна	286
9.5. Подавление оболочечных мод	286
9.6. Светочувствительные волокна, легированные редкоземельными элементами	288
9.6.1. Сердечник на основе германиево-алюмосиликатного базового стекла	290
9.6.2. Ограниченный сердечник	291
9.6.3. Светочувствительная оболочка	295
9.6.4. Ограниченный сердечник и светочувствительная оболочка	296
9.6.5. Легированное сурьмой алюмосиликатное волокно	296
9.7. Сохранение поляризации	297
9.8. Другие типы светочувствительных волокон	299
9.8.1. Полимерные оптические волокна	299
9.8.2. Фторидное стекло	302
9.8.3. Высоколегированные фосфором кварцевые волокна	303
9.9. Выводы	304
Благодарности	305
Литература	305
Глава 10. Волокна с полыми сердечниками	308
10.1. Введение	308
10.1.1. Распространение волн с помощью полного внутреннего отражения	309
10.1.2. Волноводы с отражением от границ проводимости	310
10.1.3. Волновод с фотонной запрещенной зоной	310
10.2. Передача света в волокне с полым сердечником	312
10.2.1. Полые металлические волноводы	315
10.2.2. Волноводы в брэгговских волокнах и волокнах компании OmniGuide	316

10.2.3. Механизмы ослабления в волокнах OmniGuide	319
10.2.4. Распространение волны в двухмерном (2D) фотоннокристаллическом волокне.	332
10.3. Области применения волокон с полой сердцевиной.	336
10.3.1. Волокна с полой сердцевиной в медицинских приложениях.	336
10.3.2. Потенциальные возможности применения в связи.	338
10.3.3. Волокна с полой сердцевиной как газовые ячейки.	339
10.3.4. Применения волокон с полой сердцевиной в дистанционных датчиках	340
10.3.5. Промышленные применения.	340
10.4. Производство волокон с полой сердцевиной	341
10.4.1. Производство OmniGuide-волокна.	341
10.4.2. Методы, используемые в производстве других волокон с полой сердцевиной.	344
10.5. Заключение	345
Литература	346
Глава 11. Кварцевые нановолокна и волокна с диаметром меньше длины волны	349
11.1. Знакомство с нановолокнами.	349
11.2. Введение	349
11.3. Моделирование свойств кварцевых нановолокон при работе в режиме одномодового волновода.	350
11.3.1. Базовая модель	351
11.3.2. Распределение мощности: часть мощности внутри сердцевины и эффективный диаметр.	354
11.3.3. Групповая скорость и волноводная дисперсия	358
11.4. Изготовление кварцевых нановолокон и их исследование при помощи микроскопа	360
11.4.1. Двухступенчатое утоньшение кварцевых нановолокон в процессе вытягивания	361
11.4.2. Изучение кварцевых нановолокон при помощи электронного микроскопа	363
11.5. Свойства кварцевых нановолокон	366
11.5.1. Микрообработка и механические свойства.	366
11.5.2. Распространение волн и оптические потери.	371
11.6. Существующие и потенциальные приложения кварцевых нановолокон	373
11.6.1. Микромасштабные и наномасштабные фотонные элементы.	373
11.6.2. Нановолоконные оптические датчики	378
11.6.3. Дополнительные приложения	379
Литература	380
Глава 12. Киральные волокна	383
12.1. Введение	383
12.2. Три типа киральных решеток.	384
12.3. Короткопериодическая киральная решетка: волоконный аналог CLC	387
12.3.1. Проблемы производства	387
12.3.2. Аналогия с одномерной (1D) киральной планарной структурой	387
12.3.3. Сравнение одномерной киральной структуры с одномерной изотропной слоистой структурой.	388
12.3.4. Микроволновые эксперименты	392
12.3.5. Оптические измерения	394
12.4. Киральные среднепериодические решетки	394
12.4.1. Симметрия структур CIPG	394

12.4.2. Микроволновые эксперименты	395
12.4.3. Оптические измерения	395
12.4.4. Синхронизация преобразований оптической поляризации и рассеяния	396
12.5. Киральные длиннопериодические решетки	402
12.5.1. Оптические измерения	402
12.6. Выводы	404
Благодарности	404
Литература	404
Глава 13. Волокна инфракрасного диапазона	406
13.1. Введение	406
13.2. Стекланные оптические волокна, содержащие галоиды и окиси тяжелых металлов	410
13.2.1. Фторидные стекланные волокна	410
13.2.2. Германатные стекланные волокна	412
13.2.3. Халькогенидные стекланные волокна	413
13.3. Кристаллические волокна	416
13.4. Поликристаллические (PC) волокна	416
13.5. Монокристаллические (SC) волокна	418
13.6. Волноводы с поллой сердцевиной	420
13.6.1. Полые металлические и пластиковые волноводы	421
13.6.2. Полые стекланные волноводы	421
13.7. Выводы	425
Литература	425
Глава 14. Герметичные оптические волокна: волокна с углеродным покрытием.	428
14.1. Введение	428
14.2. Исторический обзор	430
14.3. Нанесение углеродных покрытий на волокна	434
14.4. Усталостные свойства волокон с углеродным покрытием	436
14.5. Водородные потери в оптических кабелях	440
14.5.1. Водородные потери в негерметичных волокнах	440
14.5.2. Водородные потери в герметичных волокнах с углеродным покрытием	442
14.5.3. Испытания герметичных волокон в водородной среде	442
14.5.4. Диффузия водорода в герметичных волокнах	444
14.5.5. Влияние структуры стекла на свойства герметичного волокна	449
14.6. Использование и обработка герметичных волокон с углеродным покрытием	451
14.6.1. Прочность волокна	451
14.6.2. Обработка волокна	451
14.6.3. Очистка, скалывание и оконцовка волокон	452
14.6.4. Сращивание методом сплавления	452
14.6.5. Окраска волокон	453
14.7. Технические требования к волокнам с углеродным покрытием	453
14.8. Применения герметичных волокон с углеродным покрытием	457
14.8.1. Волокна в подводных кабелях	457
14.8.2. Волокна в усилителях	457
14.8.3. Авиационное оборудование	458
14.8.4. Геофизические датчики	458
14.9. Выводы	459
Литература	459

Глава 15. Волокна с металлической оболочкой	462
15.1. Введение	462
15.2. Метод замораживания	464
15.3. Прочность и надежность	470
15.4. Ухудшение свойств при высоких температурах	473
15.5. Оптические свойства волокон с металлическим покрытием	474
15.6. Выводы	477
Литература	478
Глава 16. Волокна с эллиптической сердцевинной и D-образные волокна	480
16.1. Обзор	480
16.1.1. Оптическое волокно с эллиптической сердцевинной	480
16.1.2. D-образные волокна с эллиптической сердцевинной и варианты их исполнения	481
16.2. Производство эллиптической сердцевинной и D-образных волокон	482
16.3. Волокна с эллиптической сердцевинной: характеристики и свойства	483
16.3.1. Двойное лучепреломление	485
16.3.2. Сохранение поляризации	486
16.3.3. Эксцентриситет и моды высших порядков	487
16.4. D-образные волокна: характеристики и свойства	487
16.4.1. Доступ к оптическим полям: травление волокна	488
16.4.2. Влажное травление оболочки на основе диоксида кремния и германиево-силикатной сердцевинной	489
16.4.3. Стандартное травление (для доступа к полю исчезающей волны)	489
16.4.4. Обнажение сердцевинной	491
16.4.5. Частичное и полное удаление сердцевинной	492
16.5. Оптические компоненты на основе D-образного волокна	493
16.5.1. Ответвители	493
16.5.2. Петлевые отражатели	495
16.5.3. Поляризаторы	495
16.5.4. Соединение встык с активными устройствами	496
16.5.5. Соединение с интегральными оптическими устройствами	498
16.6. Сращивание	499
16.6.1. Сращивание D-образных волокон друг с другом	499
16.6.2. Сращивание D-образных волокон и волокон с круглой оболочкой	500
16.7. Волоконные устройства	501
16.7.1. Электрооптические модуляторы интенсивности	502
16.7.2. Фазовые модуляторы с замещенной оболочкой	503
16.7.3. Устройства с частично и полностью замещенной сердцевинной	505
16.7.4. Волоконные устройства на решетках Брэгга	507
16.7.5. Регулируемые аттенюаторы	509
16.7.6. Контроль оптического поглощения	509
16.7.7. Встроенные волоконные датчики	512
16.7.8. Оптоэлектронные устройства на D-образных волокнах	515
16.8. Волокно с эллиптической сердцевинной, легированное редкоземельными элементами	516
Глава 17. Многомодовые волокна, волокна с большим сердечником и волокна, армированные пластиком	523
17.1. Введение	523
17.2. Полностью кварцевое волокно (кварц/кварц) с крупным сердечником	525
17.3. Волокна кварц-кварц с высокими и низкими числовыми апертурами NA	528

17.4. Кварцевые волокна с оболочками из пластика и твердого полимера . . .	531
17.4.1. Кварцевые волокна с оболочками из пластика	531
17.4.2. Кварцевые волокна с оболочками из твердого полимера	531
17.5. Кварцевое волокно с нано-пористым покрытием/оболочкой	533
17.6. Неограниченный потенциал приложений	534
Литература	535
Глава 18. Конические волокна и специальные волоконные микрокомпоненты	536
18.1. Введение	536
18.2. Конические окончания	538
18.2.1. Структура конического окончания	540
18.3. Линзы	543
18.4. Рассеиватели	546
18.5. Угловые окончания	547
18.6. Оптические измерительные окна для микрофлюидальных проточных кювет	548
Благодарности	551
Литература	551
Глава 19. Оптические волокна с жидким сердечником	552
19.1. Введение	552
19.2. Распространение света в волокнах с жидкими сердечниками: модальные свойства, дисперсия и эффекты поляризации	553
19.3. Методы изготовления и контроля	555
19.4. Применения	557
19.4.1. Волноводы для специальных спектральных областей и оптико-химический анализ	557
19.4.2. Волоконные датчики	559
19.4.3. Нелинейные оптические эффекты	561
19.4.4. Применение в медицине	562
19.4.5. Специальные волноводные структуры и устройства с жидкими сердечниками	564
19.5. Выводы	565
Литература	565
Глава 20. Полимерные оптические волокна	568
20.1. Введение	568
20.2. Основы полимерных оптических волокон POF	568
20.2.1. Материалы для POF	569
20.2.2. Распространение света в POF	570
20.2.3. Ширина полосы пропускания полимерного волокна POF	572
20.3. Типы полимерных волокон	573
20.4. Стандарты POF	581
20.5. Полимерные волокна POF для систем передачи	583
20.5.1. Волокна со ступенчатым профилем SI-PMMA POF	583
20.5.2. Градиентные волокна PMMA-GI POF	584
20.5.3. Волокна PF-GI POF	584
20.6. Применения полимерных волокон	586
20.6.1. POF в автомобильной проводке	586
20.6.2. Датчики POF	587
20.6.3. Полимерные волокна в домашних сетях	589
20.7. Методы производства полимерных волокон POF	591
20.7.1. Волокна SI POF: методы вытягивания из преформ и экструзии	591
20.7.2. Изготовление волокон с градиентным профилем	593

20.7.3. Метод граничной межфазной полимеризации геля.	593
20.7.4. Экструзия волокон GI POF.	595
Литература.	595
Глава 21. Сапфировые оптические волокна.	598
21.1. Выращивание сапфировых волокон.	599
21.2. Оптические и механические характеристики монокристаллических сапфировых волокон.	602
21.3. Плакирование и покрытия сапфировых волокон.	606
21.4. Применения сапфировых волокон.	608
21.4.1. Оптоволоконные датчики.	608
21.4.2. Применение в медицине.	612
21.5. Приложение: свойства Al_2O_3	612
Литература.	614
Глава 22. Оптические волокна для производственных применений лазеров.	616
22.1. Волоконные лазеры и усилители: введение.	616
22.2. Волокна с накачкой оболочки.	617
22.3. Волокна с большой модовой площадью, легированные иттербием: революция мощности.	618
22.4. Волокна LMA с двойным покрытием, сохраняющие поляризацию.	624
22.5. Волоконные лазеры: современный технический уровень.	629
22.6. Безопасные для глаз волокна с большой модовой площадью.	632
22.7. Выводы.	638
Литература.	639
Глава 23. Оптические волокна для биомедицинских приложений.	641
23.1. Введение.	641
23.2. Медицинские лазерные манипуляторы.	642
23.3. Приложение трансэндоскопической хирургии.	645
23.3.1. Клинические испытания.	646
23.4. Абсорбционная спектроскопия.	648
23.4.1. Введение.	648
23.4.2. Медицинские приложения абсорбционной спектроскопии.	649
23.5. Спектроскопия с использованием затухающих волн.	651
23.5.1. Введение.	651
23.5.2. Экспериментальные установки.	652
23.5.3. Химическое опознание.	653
23.5.4. Биохимическое опознание.	654
23.6. Волоконно-оптические тепловые сенсоры.	656
23.6.1. Волоконно-оптический термодатчик.	657
23.6.2. Волоконно-оптическая радиометрия.	659
23.7. Тепловидение.	660
23.7.1. Инфракрасное отображение и томография в минимально инвазивных процедурах.	664
Литература.	664
Глава 24. Механическая прочность и надежность стекловолокон.	670
24.1. Введение.	670
24.2. Обзор свойств стекла.	671
24.2.1. Некристалличность, процессы стеклования (T_g) и релаксации.	671
24.2.2. Хрупкость, прочность и ломкость.	673
24.2.3. Структурные эффекты.	674
24.3. Механические свойства.	677
24.3.1. Прочность.	678

24.3.2. Усталость	688
24.3.3. Старение.	690
24.3.4. Несиликатные стекла	692
24.3.5. Фотонно-кристаллические, или «дырчатые», волокна	694
24.4. Покрытия	696
24.4.1. Общие замечания и полимерные покрытия	696
24.4.2. Металлические покрытия	696
24.4.3. Неорганические покрытия.	696
24.5. Обработка и содержание волокна после вытягивания	696
24.5.1. Зачистка волокна	698
24.5.2. Скалывание волокна	699
24.5.3. Сращивание	699
24.5.4. Полировка	701
24.5.5. Пайка/волоконные выводы — пигтейлы	702
24.5.6. Устранение дефектов обработки: травление	703
24.6. Фрактография	704
24.7. Подтверждение соответствия и надежность	705
24.7.1. Расчет на минимальную прочность	706
24.7.2. Расчет вероятности отказа.	707
Благодарности	708
Литература	708
Индекс	711

*Моей жене Шиве
За ее безграничную любовь, поддержку и терпение*
А.М.

«В тени твоих волос так сладко сердце дремлет
и, опьяненное любовью, покою внемлет»
РУМИ

*Эдельгарду
За его терпение, мудрость и любовь*
Т.Ф.М.

АВТОРЫ

Алексис Мендес (Alexis Mendez). Доктор Алексис Мендес, президент и основатель компании MCH Engineering LLC, консалтинговой фирмы, специализирующейся на сенсорных технологиях с использованием оптических волокон. Доктор Мендес имеет более чем 20-летний опыт работы в технике волоконных световодов, датчиков и контрольно-измерительных приборов. До основания компании MCH Доктор Мендес занимал различные руководящие должности в области оптической связи в Кремниевой долине. Он был руководителем группы Лаборатории по волоконно-оптическим датчикам в компании AVB Corporate Research (США), где проводил исследования и разработку датчиков для нефтяной и газовой промышленности, электроэнергетики и обработки производственных данных. Он был разработчиком датчиков давления и температуры на основе брэгговских решеток, волоконно-оптических датчиков высокого напряжения и тока и др. Он также проводил исследования по изучению влияния кислорода на волокна.

Доктор Мендес написал более 45 научных работ, является держателем четырех патентов США и лауреатом конкурса R&D 100 award. Он также является председателем Международной конференции по волоконным датчикам (OFS-18). Доктор Мендес получил степень доктора (PhD) в области электротехники в Университете Брауна.

Т.Ф. Морзе (T.F. Morse). Т.Ф. Морзе получил степень бакалавра (BA) в области литературы в 1953 году и магистра (MA) истории в 1954 году в университете Дюка. Он был членом Совета Международного Института образования в Кельнском университете, Германия, в 1954—1955 году (история, политология). В 1956—1959 годах работал в компании Pratt & Whitney Aircraft в Хартфорде, штат Коннектикут и в это время получил степень бакалавра (ScB) (механика) в университете Хартфорда и степень магистра (MSc) (механика) в Политехническом институте Ренсселаера в Хартворде. В 1961 году, после окончания аспирантуры в Университете Northwestern, он получил звание доктора (PhD) по специальности механика. С 1961 по 1963 год он был старшим научным сотрудником в компании ARAP в г. Принстон, штат Нью-Джерси, где работал над решением теоретических задач механики жидкостей. Будучи профессором технических наук в университете Брауна, г. Провиденс, штат Род-Айленд (1963—1999), он был директором лаборатории по световодной технике и в 1969—1970 году старшим научным сотрудником в исследованиях по программе Фулбрайта в Немецком исследовательском институте радиовещания. С 1999 года он служил в Бостонском университете в качестве профессора по электротехнике и вычислительной технике и был директором лаборатории по световодной технике. Он автор более 120 научных работ и имеет пять патентов. В круг его научных интересов и сферы деятельности входят обработка волокна, стекловолоконные материалы, волоконные лазеры и волоконные датчики.

СПИСОК УЧАСТНИКОВ

Моше Бен-Дэвид (Moshe Ben-David). Моше Бен-Дэвид получил степень профессора (PhD) физики в Тель-Авивском университете в Израиле в 2003 году. Он имеет более чем 10-летний опыт работы в области разработки электро-оптических систем для Вооруженных сил, связи, развлекательных мероприятий и медицины; в настоящее время сотрудничает с компанией Glucon Medical. Он автор более 20 научных работ, 4 глав книги и 4 патентов. В круг его научных интересов входят: световоды и волноводы, взаимодействие лазера с тканью, оптические диагностические методы в медицине и распространение света в ткани.

Райан Байс (Ryan Bise). Доктор Райан Байс является членом Технического совета компании OFS Laboratories в Мюррей Хил, штат Нью Джерси, бывшего подразделения по изучению волоконных световодов компании Bell Laboratories, Lucent Technologies. Область его исследования включает изготовление и проектирование микроструктурных оптических волокон. Доктор Браун изучал химию в колледже UCLA и университете UC Беркли (Berkeley).

Владимир А. Богатырев (Vladimir Bogatyrev). В 1972 году Владимир А. Богатырев закончил Московский физико-технологический институт. С 1972 по 1982 год занимался исследованиями мощных лазеров, легированных неодимом, в Физическом институте Лебедева РАН. С 1982 года круг его интересов переместился в область технологий волоконных световодов и связанных с этим вопросов (процесс вытягивания волокна, свойства полимеров и герметических покрытий, прочность и усталость волоконных световодов). В настоящее время он работает научным сотрудником Исследовательского центра по волоконной оптике РАН, Москва, Россия. Его основная научная деятельность касается изучения оптических волокон с металлическим покрытием (техника изготовления и изучение их механических и оптических свойств).

Адриан Картер (Adrian Carter). Доктор Адриан Картер, основатель и главный специалист компании Nufern. До этого он был ассистентом профессора в лаборатории по световодной технике в университете Брауна. Доктор Картер был старшим научным сотрудником Центра волоконно-оптической техники в Сиднее, Австралия, где работал над проектированием и изготовлением новых волоконных световодов, будучи также научным сотрудником Технического университета в Гамбурге-Харбурге, Германия. Он получил степень доктора (PhD) на кафедре физики и теоретической химии и бакалавра (BS) по математике и химии в университете Сиднея, в котором он в настоящее время является также почетным научным сотрудником.

Кай Х. Чанг (Kai Chang). С 2005 года Кай Х. Чанг был техническим руководителем в компании Heraeus Tenevo, США. С 1986 по 2005 год он работал в компании Bell Laboratories AT & T/Lucent Technologies/OFS в г. Норперос, штат Джорджия, и был техническим руководителем группы по MCVD-технике и заслуженным изобретателем. Кай работал над механизмами оптических потерь в кремниевых волокнах и был одним из первых, кто разработал волокно zero-OH AllWave®. Кай получил степень доктора (PhD) в области физики в университете в Торонто в 1984 году и с 1984 по 1986 год работал научным сотрудником в области физики в компании Caltech.

Аза Клэссон (Asa Claesson). Аза Клэссон получила степень магистра (MS) в области материаловедения в университете в г. Упсала, Швеция, в 1977 году и с тех пор активно участвует в разработке волоконно-оптических компонентов, а также специальных оптических волокон. Она является автором более 120 научных работ, 4 патентов и 2 глав книги. В настоящее время она работает менеджером в компании Asgeo Fiberlab в Швеции.

Джеймс П. Кларкин (James Clarkin). Джеймс П. Кларкин является вице-президентом по развитию бизнеса в компании Polymicro Technologies, LLC. Джеймс Кларкин имеет 20-летний опыт в проектировании, эксплуатации и изготовлении всех типов оптических волокон. До поступления на работу в Polymicro в 1998 году Джеймс работал в течение 12 лет в компании Ensign Bickford/Spectran Corporation в качестве технического менеджера и менеджера по производству. Работая в Spectran, Джеймс руководил разработкой и производством специальных оптических волокон и кабельной продукции. Джеймс имеет степень бакалавра (BS) химии, магистра (MS) в области материаловедения и MBA в Политехническом институте Ренессаера.

Андре Крото (Andre Croteau). Андре Крото получил степень магистра (MSc) в области физики в Королевском (Queen's) университете в г. Кингстоне, провинция Онтарио, в Канаде в 1986 году. С 1986 по 1988 год Андре занимался исследованиями в лаборатории по фундаментальным исследованиям компании NEC в Японии, где он работал над созданием электрооптических тонких пленок. В 1988 году Андре поступил на работу в INO в качестве научного сотрудника в программе специальных волоконных световодов; там же в 1998 году стал менеджером. Его основная исследовательская деятельность включает разработку активных волокон, легированных редкоземельными элементами, микроструктурированных волокон и светочувствительных волокон. Он опубликовал более 20 научных работ и получил 3 патента.

Дэвид Дж. ДиДжованни (David J. DiGiovanni). Дэвид ДиДжованни является президентом OFS Laboratories LLC, центральной исследовательской организации OFS. Дэвид начал свою карьеру с должности научного сотрудника в отделе по изучению волоконных световодов в компании Bell Laboratories и был переведен из AT&T в Lucent, а затем в OFS, которые, по существу, являются одной и той же организацией. Он работал над различными проблемами, связанными с проектированием и изготовлением оптических волокон, и внес значительный вклад в разработку легированных эрбием оптических волокон, для усилителей, мощных усилителей и лазеров, а также рамановских усилителей и оптических компонентов. Дэвид получил несколько научных степеней в университете Брауна, включая доктора по механике (PhD). Он член IEEE и член общества OSA.

Крис Эмсли (Chris Emslie). Доктор Крис Эмсли является директором компании Fibergore Limited. Он начал свою карьеру в области волоконной оптики в 1982 году на опытном производственном предприятии Корнинга в г. Уилмингтоне, штат Северная Каролина. Он получил степень доктора на кафедре волоконной оптики в Саутгемптонском университете (Великобритания). Темой его диссертации, которую он готовил под руководством профессора Алека Гэмблинга и профессора Дэвида Пэйна, было изготовление полимерного волокна с малыми потерями. Доктор Эмсли уехал из Саутгемптона в 1978 году и занялся коммерческой деятельностью в начинающей компании Йорк VSOP, занимавшейся оптическими компонентами, а в 1989 году занялся своим бизнесом по разработке оптических волокон. Впоследствии на базе этого бизнеса была создана компания Fibergore Limited.

Пьер-Ив Фоньяллаз (Pierre-Yves Fonjallaz). Пьер-Ив Фоньяллаз получил степень магистра (MSc) в области физики и степень доктора (PhD) (волоконные решетки Брэгга) в Швейцарском федеральном институте технологий в Лозанне в 1990 и 1995 годах. В 1996 году после аспирантуры в КТН он начал работу в Асгео АВ (Швеция). Он стал руководителем группы по волоконно-оптическим компонентам (2000). В 2003 году он был назначен директором компании Kista Photonics Research Centre (KPRC) и координировал сотрудничество Асгео с Королевским институтом технологии (КТН) по вопросам стекловолоконной оптики. В 2004 году был организатором ряда семинаров и конференций, таких, например, как ECOC.

Израиль Ганнот (Israel Gannot). Профессор Израиль Ганнот получил степень доктора (PhD) в области биомедицины в Тель-Авивском университете, Тель-Авив, Израиль,

в 1994 году. С 1994 по 1997 год он занимал должность старшего научного сотрудника в Национальной Академии наук. С 1977 года преподавал в Тель-Авивском университете, а с 2005 года работал профессором биомедицины в университете Джорджа Вашингтона. Профессор Ганнот — член Совета американского Института медицины и биологии. Он автор более 100 научных работ, 6 глав книги и 10 патентов. Область его исследований включает: оптические волокна и волноводы, взаимодействие лазера с тканью, методы оптической диагностики и биомедицинскую информатику.

Азриель З. Генак (Azriel Z. Genack). Азриель Генак является заслуженным профессором физики в Королевском колледже CUNY, в котором он работал с 1984 года. Он получил степень бакалавра (BA) в Колумбийском колледже и степень доктора (PhD) в области физики в Колумбийском институте. После получения степени он работал доцентом в колледже City CUNAY, а затем в исследовательской лаборатории IBM в Сан-Жозе. С 1977 по 1984 год работал научным сотрудником в Exxon Corporate Research Laboratories. Он был соучредителем компании Chiral Photonics, основанной в 1999 году. Тематика его исследований включает фотонику киральных структур и статистику распространения и локализации оптического и микроволнового излучения в случайных средах.

Джеймс Харрингтон (James A. Harrington). Джеймс А. Харрингтон, профессор Ceramic Science and Engineering в университете Рутгерса. Доктор Харрингтон имеет более чем 30-летний опыт научных исследований материалов и волокон ИК-диапазона и является изобретателем полых сапфировых и стеклянных волноводов. Он признан одним из ведущих специалистов в мире в этой постоянно развивающейся области. До работы в программе по исследованиям волоконно-оптических материалов в университете Рутгерса в 1989 году он был директором Infrared Fiber Operations for Hegaeus LaserSonics, а до этого был программным менеджером по волоконной оптике ИК-диапазона в Hughes Research Laboratories в Малибу, штат Калифорния.

Хуан Хернандес-Кордеро (Juan Hernandez-Cordero). Доктор Хуан Хернандес-Кордеро получил степень бакалавра (BsC) электротехники в Национальном автономном университете в Мехико (UNAM) в 1992 году. Ему была присуждена полная стипендия на прохождение обучения в университете Брауна, в котором он получил степень магистра (1996) и степень доктора (PhD) (1999) на факультете прикладных наук. После года работы в качестве доцента в лаборатории оптических технологий в университете Бостона он перешел в Исследовательский институт материаловедения (ИМ) при UNAM, где организовал лабораторию волоконных лазеров и волоконных датчиков. Область его интересов включает волоконные датчики, волоконные лазеры и волоконные устройства.

Михай Ибанеску (Mihai Ibanescu). Михай Ибанеску получил степень бакалавра (BS) и доктора (PhD) физики в Массачусетском технологическом институте в 2000 и 2005 годах. С 2005 по 2006 год он работал доцентом в исследовательской группе профессора Джона Йоннапоулоса при МТ. В течение 2000—2001 годов и с 2006 года он работал в компании OmniGuide Inc. в Кембридже, штат Массачусетс. Область его научных интересов включает фотонные кристаллы, волокна с фотонной запрещенной зоной и волокна с поллой сердцевиной.

Анна Клер Жакоб Пулен (Anne Claire Jacob Poulin). Анна Клер Жакоб Пулен поступила на работу в INO научным сотрудником в 2000 году после получения степени доктора (PhD) физики в Центре оптики, фотоники и лазеров Лавальского университета, Квебек, Канада, и степени магистра (MSc) физики в Центре молекулярной физики, университет I в Бордо, Франция. Вначале она работала в отрасли связи, занимаясь производством пассивных оптических компонентов со светочувствительными волокнами и разработкой волоконных усилителей с волокнами, легированными фторидом. В настоящее время она работает над изготовлением и применением фотонных устройств для датчиков в сельском хозяйстве и биомедицине.

Стивен А. Якобс (Steven A. Jacobs). Стивен Якобс возглавляет Группу системотехники в компании OmniGuide Inc., где он ведет разработку новых медицинских систем для минимально инвазивной лазерной хирургии на основе волокон с фотонной запрещенной зоной, выпускаемой компанией OmniGuide. До этого он возглавлял Группу по теории и моделированию. Он получил степень бакалавра (BS) в MIT и степень доктора (PhD) физики в университете в Висконсине. До поступления в компанию OmniGuide в 2001 году доктор Якобс был почетным членом штата технических специалистов компании Bell Laboratories. Его профессиональные интересы включают вычислительный электромагнетизм и использование вычислительных и статистических методов для повышения производительности и усовершенствования технологий.

Стивен Г. Джонсон (Steven G. Johnson). Стивен Г. Джонсон получил степень доктора (PhD) на кафедре физики в MIT (Массачусетский технологический институт). В настоящее время он работает в MIT доцентом по прикладной математике, а также консультантом в компании OmniGuide Inc. Он написал несколько широко используемых бесплатных пакетов программного обеспечения, включая пакет MPV для нахождения фотонных собственных мод и библиотеку быстрых преобразований Фурье (FFTW) (за которую он получил премию Дж. Х. Уилкинсона в 1999 году). В 2002 году Клувер издал его докторскую диссертацию как книгу «Фотонные кристаллы: Путь от теории к практике». Его научные интересы включают разработку новых полуаналитических и числовых методов решения задач электромагнетизма в системах с высоким показателем контрастности.

Джинки Ким (Jinkee Kim). Джинки Ким получил степени бакалавра (BS) и магистра (MS) в области электротехники в Сеульском национальном университете и степень доктора (PhD) в области электротехники и вычислительной техники в Технологическом институте в Джорджии. Его докторская работа была посвящена интегральной оптике, системам связи на 100 Гбит/с и обработке цифровых сигналов. Он был научным сотрудником компании CREOL в Орландо, где работал над фотонными управляющими системами для фазовых дифракционных решеток. В 1996 году он поступил на работу в компанию Bell Laboratories, Lucent Technologies (теперь — OFS) и занимается исследованиями и разработкой волоконных световодов. Он спроектировал и запустил в производство новые оптические волокна и получил несколько патентов США.

Виктор Р. Копп (Victor I. Kopp). Виктор Р. Копп является руководителем научно-исследовательских работ в компании Chiral Photonics, Inc. Он получил степень доктора (PhD) в области лазерной физики в Институте оптики имени Вавилова, Санкт-Петербург, Россия, в 1999 году. В 1999 году, работая доцентом в колледже Queens College of SUNY он, совместно с Азриелем Генаком, создал научную основу для компании Chiral Photonics, Inc. и стал соучредителем компании. Его научные интересы включают распространение волн в периодических средах, нелинейную оптику и фотонные устройства. Он автор и соавтор более 25 научных работ и имеет 20 международных патентов и патентов США по фотонным устройствам, лазерам и волоконным решеткам.

Чарльз Р. Куркьян (Charles R. Kurkjian). В настоящее время доктор Куркьян — научный консультант на факультете материаловедения и прикладных наук при университете Рутгерса, г. Пискаатауэй, штат Нью Джерси. Ранее, в течение 35 лет, он работал в компании Bell Laboratories в г. Мюррей Хил, штат Нью Джерси, а до выхода на пенсию и поступления в университет Рутгерса в 1999 году на протяжении пяти лет работал в компании Telcordia (бывшая Bellcore) в г. Мористаун, штат Нью Джерси. Он проводил научно-исследовательские работы в области неорганического стекла. В настоящее время он сосредоточился на изучении механических свойств этого стекла, а также на прочности и надежности кремниевого стекловолокна.

Пауль Дж. Лемейр (Paul J. Lemaire). Пауль Дж. Лемейр — ведущий инженер компании General Dynamics Advanced Systems в г. Флорам Парк, штат Нью Джерси. Он занимал научные и руководящие должности в компании OFS, Lucent Technologies и Bell

Laboratories. Он работал в таких областях, как изготовление оптического волокна, герметичные волокна, конструкции волокон, волоконные брэгговские решетки, светочувствительность, надежность волокон и компонентов, водородное старение и другие вопросы, связанные с фотоникой, материалами и надежностью. Он имеет много публикаций, презентаций и патентов по этой тематике. Он получил степени бакалавра (BS) и доктора (PhD) на кафедре материаловедения и прикладных наук при MIT.

Борут Ленардик (Borut Lenardic). Борут Ленардик получил степень бакалавра (BSc) в области физики твердого тела на кафедре естественных наук университета в Любляне в 1981 году и начал работу в сфере волоконной оптики в 1986 году в качестве инженера-разработчика компании Iskra, Словения. Позднее он работал инженером-технологом в компаниях Cabloptic, Швейцария, и Fotona, Словения. С 1996 по 2001 год он был консультантом в компании Nextrom Oy. В 2001 году он основал в Любляне (Словения) компанию Optacore, которая специализировалась на изготовлении заготовок и волокна методом химического парофазного осаждения CVD с использованием печи. С 2004 года он разрабатывал технологию и устройства для изготовления волокон, легированных редкоземельными элементами, с упором на аэрозоли и высокотемпературную сублимацию.

Эрик А. Линдхольм (Eric A. Lindholm). Эрик А. Линдхольм получил степень бакалавра (BSc) в области машиностроительной керамики и бакалавра (BA) английского языка в университете Рутгерса в 1991 году. Он проработал пять лет в компании Spectran Communication Fiber Technologies в качестве специалиста по вытягиванию волокна до перехода в 1996 году в компанию OFS Specialty Photonics (бывшая компания Spectran Specialty Optics) на должность специалиста по разработке волокна. С этого времени Эрик стал заниматься изучением процессов осаждения герметичных углеродных покрытий, полимерными материалами и процессами вытягивания волокон, способствующими повышению выносливости оптических волокон, в условиях отрицательного воздействия окружающей среды, а также определением характеристик волокон. Он написал и представил несколько технических презентаций по этим проблемам на различных конференциях.

Роберт Лингл-младший (Robert Lingle, Jr.). Роберт Лингл младший, получил степень бакалавра (BS) физики в университете Алабамы, доктора (PhD) химической физики в университете штата Луизиана и получил стипендию молодых ученых в университете Беркли для изучения физической химии сверхбыстрых процессов. В 1997 году он поступил на работу в отдел волоконной оптики компании Lucent Technologies, Bell Laboratories, где продолжал работать вплоть до перехода в компанию OFS. Он проводил исследования сверхбыстрых электронных и колебательных процессов в жидкости и на стыках, золь-гелевых материалов, физики и химии оптических материалов, структуры оптического волокна и нелинейных искажений при оптической передаче. Доктор Лингл возглавляет подразделение по разработке волокна и системам передачи в компании OFS.

Джон Б. МакЧесни (John B. MacChesney). Джон МакЧесни, вышедший на пенсию сотрудник Bell Labs и бывший сотрудник Отдела по исследованиям световодных материалов компании Lucent, наиболее известен своим изобретением процесса модифицированного химического осаждения из паровой фазы (MCVD), за которое он получил Премию Чарльза Старка Дрейпера Национальной технической академии. Он поступил на работу в Bell Labs в 1959 году и получил более 100 национальных и международных патентов. Доктор МакЧесни был избран в Национальную техническую академию в 1985 году и получал награды от Американского керамического общества, IEEE (Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике), Американского физического общества, Общества Sigma Xi, и других. Он получил степень бакалавра (BA) в Боудоин колледже (Bowdoin College) и степень доктора (PhD) в университете штата Пенсильвания.

Уолтер Маргулис (Walter Margulis). Уолтер Маргулис получил степень доктора (PhD) в Империи колледже, Лондон, в 1981 году. В настоящее время он занимается изготовлением, определением характеристик и применением волоконных компонентов, разработкой и изготовлением специальных волокон для выполнения активных функций, поляризацией стекла, светочувствительностью и приложениями брэгговских решеток в световодах, оптических усилителях и пассивных микроволновых компонентах. Он написал в соавторстве около 185 научных статей/вкладов на конференции, подал около 15 заявок на патенты и был руководителем 25 аспирантов. Он занимает должность старшего научного сотрудника в компании Асгео АВ в Швеции и является приглашенным профессором Королевского технологического института в Стокгольме.

М. Джон Метьюсон (M. John Matthewson). Джон Метьюсон получил степени бакалавра (BA), магистра (MA) и доктора (PhD) физики в Кембриджском университете. Он продолжал обучение в Кембридже одновременно как стипендиат стипендии молодых ученых Голсмита в колледже Черчилля и научный сотрудник SRC. Позднее он работал в отделе вычислительной техники Кембриджского университета, компании AT&T Bell Laboratories и в исследовательском центре IBM Almaden. В настоящее время он профессор по материаловедению в университете Рутгерса. Исследовательская группа под его руководством проводит исследования в области прочности и усталости оптических материалов и моделирования обработки материалов. Он опубликовал более 100 статей, многие из которых касаются надежности волокна, и был автором или соавтором шести работ, подготовленных для конференций по этой же тематике.

Эрик Мазур (Eric Mazur). Эрик Мазур является профессором колледжа в Гарварде, профессором лаборатории Гордона МакКея (Gordon McKay) по прикладной физике и профессором физики в Гарвардском университете. Область его интересов — оптическая физика. Он получил степень доктора (PhD) по экспериментальной физике в университете Лейдена в Нидерландах. Доктор Мазур является автором или соавтором 187 научных работ; он внес большой вклад в исследования в области спектроскопии, рассеивания света, а также электронных и структурных явлений в твердом теле, которые проявляются в фемтосекундном масштабе времени. В 1988 году он стал лауреатом премии Presidential Young Investigator Award и является членом и почетным лектором Американского физического общества.

Алан МакКерди (Alan McCurdy). Алан МакКерди получил степень бакалавра (BS) в области химического машиностроения и степень бакалавра физики (BS) в университете Карнеги-Меллон, а также степень доктора физики (PhD) в Йельском университете. Девять лет он проработал на факультете электротехники в университете Южной Каролины. Работу в области связи он начал в компании Lucent Technologies, затем в Avaya и в последнее время работает в OFS. Он проводил исследования мощных электронно-лучевых СВЧ устройств, изучал проблемы передачи в системах локальных сетей на медных проводах, а также статистические и нелинейные задачи в оптической связи. В настоящее время доктор МакКерди является почетным членом штаба технических специалистов Группы по разработке оптических волокон при OFS.

Томас Д. Монте (Thomas D. Monte). В 1996 году Томас Д. Монте получил степень доктора (PhD) в области электротехники в университете Иллинойс в Чикаго. Работая ведущим сотрудником в компании KVH Industries Inc., он занимался изучением сохраняющих поляризацию волоконных компонентов с эллиптической сердцевиной и сенсорных устройств. Между 1983 и 2000 гг. доктор Монте занимал различные инженерные и научные должности в компании Andrew Corporation, разрабатывающей волоконно-оптические устройства, СВЧ волноводные компоненты и антенны. Он имеет 11 патентов США и несколько международных патентов в области СВЧ и волоконно-оптических компонентов.

Стивен Монтгомери (Stephen Montgomery). Стивен Монтгомери является президентом компании ElectroniCast, которая специализируется на прогнозировании

спроса на оборудование и услуги сетей связи. Стивен также возглавляет группу волоконно-оптических компонентов и оборудования сетей связи в компании Electroni-Cast. Он представил множество презентаций и опубликовал много статей по рынкам оптических волокон, технологии, приложениям и оборудованию. Он член редколлегии журнала по световодной технике «Lightwave magazine» и консультативного совета конференции Gigabit Ethernet Conference (GEC). Стивен получил степень бакалавра (BA) и магистра (MBA) в области технического управления.

Ларс-Эрик Нилссон (Lars-Erik Nilsson). Ларс Эрик Нилсон получил диплом в Королевском технологическом институте (Royal Institute of Technology) по специальности химия в Стокгольме, 1973 г. С тех пор он активно работал в промышленности и науке, занимаясь, главным образом, разработкой оптических устройств и компонентов. Ларс-Эрик занимался проектированием и разработкой специальных оптических волокон и компонентов в течение 10 лет и в настоящее время возглавляет группу волоконно-оптических компонентов в компании Агео АВ в Швеции. Он также является соавтором 12 научных работ и изобретателем/соизобретателем шести патентов.

Дэвид У. Пекхэм (David W. Peckham). Дэвид У. Пекхэм получил степень бакалавра (BS) и магистра (MS) в области электротехники в университете Флорида. Он начал свою карьеру в 1982 году в лаборатории по средам передачи в компании Bell Labs., работая над методами измерений волоконных световодов. С 1989 года он сосредоточился на проектировании, разработке производственных процессов и налаживании серийного производства оптических волокон для систем передачи с высокой пропускной способностью в компаниях Bell Labs, Lucent и, в настоящее время, в OFS. В 2002 году он получил награду OSA Engineering Excellence, признающую его вклад в разработку и налаживание производства волокон для высокоскоростных широкополосных сетей WDM. В настоящее время он работает консультантом технического персонала компании OFS.

Дж. Рени Педрацци (J. Renee Pedrazzani). Дж. Рени Педрацци работает над докторской (PhD) диссертацией в Институте оптики при университете в Рочестере, где она занимается исследованием полупроводниковых устройств в лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии. Она получила степень бакалавра (BS) и магистра (MS) в области электротехники в Политехническом институте штата Вирджиния и в Государственном университете и выполняла свою магистерскую работу в Центре изучения волокна и электрооптики. До написания докторской диссертации она занималась оптическими волоконными решетками в компании Lucent Technologies.

Брайс Самсон (Bruce Samson). Доктор Брайс Самсон является вице-президентом компании Business Development в компании Nufern, в которую он пришел после работы в компании Corning, где занимал должность старшего научного сотрудника и занимался исследованиями легированных волокон, оптических усилителей и лазеров. До этого он работал научным сотрудником в Саутгемптонском университете, занимаясь новыми волокнами и физикой оптических устройств. Он получил степень доктора физики (PhD) в Эссекском университете в Великобритании и степень бакалавра (BS) в прикладной физике в университете Хериот-Уайт (Heriot-Watt) в Эдинбурге. Он получил несколько патентов на изобретения в области усилителей и волоконных лазеров и публиковался в двадцати отраслевых журналах.

Стивен Р. Шмид (Steven R. Schmid). Стивен Р. Шмид является менеджером по научно-исследовательской деятельности компании DSM Desotech's, где занимается изучением волоконно-оптических материалов. Он также занимал должности, связанные с управлением товарным производством, освоением рынка и управлением бизнесом. Стивен Р. Шмид имеет 30-летний опыт в сфере производства УФ покрытий. Стивен получил степень бакалавра (BS) химии (университет Иллинойса), степень магистра (MS) химии (университет Хьюстона) и степень MBA, мастера по управлению бизнесом в Технологическом институте Иллинойса (ИИТ). Стивен написал более дюжины научных работ, получил 10 патентов и сделал несколько международных презентаций.

В 1987 году он был в числе награжденных премией IR100 Award, а в 2001 — в числе награжденных премией DSM Special Inventor Award как изобретатель.

Сергей Семенов (Sergei Semjenov). Сергей Семенов закончил в 1982 году Московский физико-технологический институт. В 1997 году он получил степень доктора (PhD) физики в Институте общей физики, Российская Академия наук, Москва. В настоящее время он занимает должность заместителя директора Исследовательского центра волоконной оптики, РАН, Москва, Россия. Сфера его научных интересов включает различные аспекты современной волоконной оптики: изготовление заготовок, процесс вытягивания волокна, свойства полимерных и герметичных покрытий, прочность и усталость оптических волокон, влияние условий вытягивания на оптические свойства волокон, разработка волокон, легированных редкоземельными элементами, а также волокон, высоколегированных германием и фтором, светочувствительность оптических волокон и микроструктурированные волокна.

Роман Шубочкин (Roman Shubochkin). Роман Шубочкин получил степень бакалавра (BS) (1987 г.) и (MS) (1989 г.) в области технической оптики в Московском энергетическом институте, Москва, Россия. С 1989 по 1994 год он работал младшим научным сотрудником в отделах волоконной оптики и физики твердых тел в Институте общей физики Российской Академии наук (РАН) в Москве. Он получил степени магистра (MS) и доктора (PhD) электротехники в университете Брауна в 1997 и 2003 годах, соответственно. С 2000 года он был научным сотрудником лаборатории световодной техники в Бостонском университете. Сфера научной деятельности доктора Шубочкина включает изучение новых технологий и легирующих примесей для изготовления кварцевых волокон, нанопорошков и стекла.

Болеш Дж. Скутник (Bolesh J. Skutnik). Доктор Болеш Дж. Скутник работал в компании CeramOptec Group с 1991 года. Он получил степень бакалавра (BS) в области химии/математики в университете Сетон Холл (Seton Hall University) и степень магистра (MS) и доктора (PhD) по теоретической физической химии в Йельском университете. Доктор Скутник активно работал в области волоконной оптики с 1979 года. Он является изобретателем тугоплавкового кварцевого волокна с пластмассовой оболочкой; он также является автором многочисленных статей и патентов по устойчивости, оптическим и радиационным свойствам волокна со ступенчато-изменяющимся показателем преломления.

Шерил А. Смит (Cheryl A. Smith). Шерил Смит является специалистом по продажам в компании CeramOptec Industries, в которой она отвечает за изучение новых приложений волокон специального назначения. Шерил имеет более чем 20-летний опыт в деятельности по продажам и маркетингу волокон специального назначения и лазеров.

Марин Сольячик (Marin Soljasic). Марин Сольячик получил степень доктора (PhD) на физическом отделении Принстонского университета в 2000 году. После этого он был стипендиатом Папплардо на физическом отделении MIT (Массачусетский технологический институт). В 2003 году он стал главным научным специалистом в исследовательской лаборатории по электронике в MIT. С сентября 2005 года он был преподавателем физики в MIT. В 2005 году он был награжден медалью Адольфа Ломба Оптическим обществом Америки. Он является соавтором 55 научных статей и соавтором 14 патентов.

Канишка Танкала (Kanishka Tankala). Доктор Канишка Танкала занимает должность вице-президента по эксплуатации в компании Nufern с 2000 года и участвует в разработке и налаживании серийного производства волокон специального назначения, а также лазерных устройств. До поступления в компанию Nufern он был техническим менеджером компании Lucent Specialty Fiber и научным сотрудником компании SpecTran Corporation, в которой разработал большое количество специальных волокон, включая волокна, легированные редкоземельными элементами с двойной оболочкой и волокна с сохранением поляризации. Он получил степень магистра (MS) и доктора (PhD) в университете штата Пенсильвания по металлургии. Он полу-

чил звание биоинженера (BE) в металлургии в Индийском научном институте и бакалавра (BS) (Hons) физики в университете Дели, Индия.

Бурак Темелькуран (Bugak Temelkuran). Бурак Темелькуран родился в Турции в 1971 году. Он получил степень бакалавра (BS) (1994), магистра (MS) (1996) и доктора (PhD) (2000) физики в университете Билькента в Турции. В 1999 году он получил студенческую премию «New Focus Student Award». Он работал научным сотрудником в исследовательской лаборатории по электронике и на кафедре материаловедения в институте MIT с 2000 по 2002 год, где в 2002 году получил должность старшего научного сотрудника. В 2003 году он поступил на работу в компанию Omniguide Inc., в которой работает и в настоящее время в качестве старшего специалиста по оптической физике. Он является членом OSA (Американское Оптическое Общество) с 1998 года. Область его научных интересов включает материалы и оптические волокна с фотонной запрещенной зоной.

Лимин Тонг (Limin Tong). Лимин Тонг получил докторскую степень (PhD) по материаловедению в университете Чжэцзян (Zhejiang) в 1997 году. После этого он в течение четырех лет был ассистентом/помощником профессора на кафедре физики в университете Чжэцзян, а следующие три года был внештатным научным сотрудником в Отделе техники и прикладной науки в Гарвардском университете. В 2004 году он поступил на работу на кафедру оптической техники университета Чжэцзян и в настоящее время является профессором оптической техники. Доктор Тонг занимается исследованиями в области нанофотоники и оптических устройств.

Энтони Туссейнт (Anthony Toussaint). Энтони Туссейнт является вице-президентом по научно-исследовательской работе в компании DSM Desotech. Доктор Туссейнт работает в этой компании с 1997 года и занимал там несколько научных должностей, занимаясь, главным образом, разработкой покрытий, красителей и связующих материалов для волоконной оптики. Он получил степень доктора (PhD) химии в университетском колледже Лондона (UCL), Англия, и степень магистра (MBA) в школе менеджмента Келлога Северо-Западного университета.

Лиминг Вонг (Liming Wang). Лиминг Вонг получил степень доктора (PhD) по оптике в 1990 году в Китайской Академии наук в Китае. Затем он продолжил свою научную карьеру в области нелинейной оптики и оптических материалов в Китайской Академии наук (Китай, 1991—1993), в Институте физико-химических исследований (RIKEN), и Национальном научно-исследовательском институте промышленности (NIRIN) (Япония, 1993—1998), и в Университете Чикаго (1998—2001). В 2001 году он поступил на работу в компанию KVH Industries, Inc. в качестве инженера по фотонике и участвовал в исследованиях и разработке новых продуктов, включая высокоскоростные модуляторы и элементы для волоконно-оптических гироскопов. Он автор и соавтор 60 технических работ, опубликованных в профессиональных журналах.

Ори Вайсберг (Ori Weisberg). Ори Вайсберг в течение шести лет работал руководителем группы прикладных и системных исследований в компании OmniGuide Inc. Он получил степень бакалавра (BS) по геофизике в Тель-Авивском университете и степень магистра (MS) планетарных наук в MIT. Он соавтор шести научных статей и восьми патентов. В настоящее время он живет в Израиле под Тель-Авивом.

Олаф Цайманн (Olaf Ziemann). С 2001 года профессор Олаф Цайманн занимает должность директора по науке в Центре прикладных исследований полимерных оптических волокон, POF-AC при Нюрнбергском университете прикладных наук (FH Nurnberg). Доктор Цайманн изучал физику в Лейпцигском университете и получил докторскую степень в Техническом университете Ильменау в области оптической связи. С 1995 по март 2001 года он работал в центре исследований Deutsche Telekom (T-Nova) в области гибридных сетей доступа и построения сетей. С 1996 года он является председателем подкомитета «Полимерные оптические волокна» Общества информационных технологий (ITG-SC 5.4.1).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возможность передачи излучения по гибкому и недорогому каналу изменила нашу жизнь больше, чем это можно себе представить. Успешность этой идеи подтверждают миллионы миль волоконно-оптических линий связи на земле и под водой, коренным образом изменившие возможности нашего общения. Эти волнующие перемены произошли на наших глазах — в течение нескольких последних десятилетий.

В то же время все больше и больше возрастают роль и коммерческое значение оптических волокон в других сферах, не связанных с телекоммуникациями. Это промышленное зондирование, биомедицинские системы доставки лазерного излучения, военные гироскопы, автомобильные системы освещения и управления и многие другие приложения — от датчиков измерения давления в нефтяных скважинах до внутриаортальных катетеров и мощных лазеров, способных резать и сваривать сталь. Требования, выдвигаемые этими разнообразными приложениями, стимулировали разработку новой группы волокон, ориентированных на то или иное приложение, — так называемых «специальных волокон», материал и структура которых подобраны таким образом, чтобы обеспечивать новые свойства и характеристики.

В телекоммуникационных и сенсорных приложениях специализированные волокна все чаще используются для управления излучением, передаваемым по волокну, а также для ввода и вывода излучения на различных длинах волн. Для работы в области специальных оптических волокон требуются знания и практический опыт в широком диапазоне дисциплин, таких как материаловедение, керамическое производство, оптика, электротехника, физика, химия полимеров и ряд других.

Чтобы разработать специальное волокно, необходимо принять решения по трем основным аспектам:

- состав стекла;
- волноводная структура;
- покрытия.

Один из важнейших параметров, варьируемых при разработке специальных волокон, представляет состав стекла. В большинстве случаев базовый состав волокна (на основе кварца или другого материала) можно изменить за счет внесения соответствующих легирующих примесей. Воздействуя на стекло как формирователь, модификатор или активное вещество, примеси изменяют основные свойства волокна, например, показатель преломления или вязкость, либо придают волокну новые свойства, такие как способность к лазерной генерации, флуоресценция, повышенная чувствительность к деформациям или температуре, эффект Бриллюэна и многие другие.

Волноводная структура, вероятно, была первым проектным параметром, использованным при разработке волокна. Именно так в свое время появились одномодовые и многомодовые волокна. Сегодня волноводные структуры стали более сложными, что позволяет разрабатывать разнообразные специальные волокна — от волокон с несколькими сердцевинами до волокон на основе одно- или двумерных фотонно-кристаллических структур.

Определяющим признаком многих популярных специальных волокон является тип покрытия. Учитывая многообразие приложений и условий окружающей среды, на которые ориентированы волокна, подбор типа покрытия становится одной из важнейших задач при разработке специальных волокон. В результате на рынке появилось множество волокон с самыми разными покрытиями — от устойчивых к высоким температурам полиимидов до герметичных углеродных покрытий. Постоянно разрабатываются все новые и новые покрытия, адаптированные под конкретные первичные преобразования или исполнительные устройства. При этом задачи по-

крытия не ограничиваются защитой волокна от воздействия окружающей среды или механических повреждений. Покрытия могут усиливать чувствительность и избирательность волокна по отношению к различным физическим и биохимическим параметрам, таким как влажность, наличие углеводов, биохимических агентов, электромагнитные поля и т.д.

Хотя изначально многие специальные оптические волокна разрабатывались и внедрялись в сфере телекоммуникаций, в настоящее время спрос на них и особенности разработки определяются, в основном, специальными задачами и техническими требованиями, предъявляемыми к волоконно-оптическим датчикам и фотонным компонентам. Поэтому с ростом потребности в оптических датчиках и специализированных компонентах возрастает и спрос на специальные волокна. Примером могут служить волоконные усилители и волоконные решетки Брэгга. Для обеспечения необходимых рабочих характеристик волоконных усилителей требуются различные легирующие примеси и волноводные структуры, а для волоконных решеток — светочувствительные волокна и структуры с подавлением мод оболочки.

Однако в сфере разработки специальных оптических волокон есть и свои трудности. Одна из наибольших проблем состоит в том, что специальные волокна занимают отдельную рыночную нишу и, как следует из их названия, представляют довольно специфический вид продукции. Это означает, что спрос на такие волокна не столь велик, как на их телекоммуникационных «родственников». Чтобы наладить производство нового волокна со специальными свойствами, необходимо затратить много времени и средств. Стоимость разработки из расчета на метр произведенного волокна обычно составляет от 100 до 1000 долларов США. Поэтому, если приложение не имеет значительного рынка сбыта и не пользуется высоким спросом, то во многих случаях конечные пользователи отказываются от идеи применения специально изготовленных волокон. Как следствие, рынок специальных волокон становится очень фрагментированным, а по объемам продаж значительно уступает рынку обычных телекоммуникационных волокон. На сегодняшний день объем мирового рынка специальных оптических волокон составляет свыше 150 миллионов долларов США и продолжает расти. Вместе с тем, одной из главных задач индустрии специальных волокон должна оставаться ориентация на работу по специальным заказам.

Цель настоящего издания в том, чтобы дать читателю информацию (хотя и далеко не исчерпывающую) о множестве новых и нестандартных — с точки зрения материалов, структуры волокна и приложений — оптических волокон. Авторы попытались осветить наиболее распространенные и полезные типы специальных волокон, стремясь сделать такой обзор максимально сбалансированным и информативным. С этой целью к работе были привлечены лучшие эксперты в данной области, представители ведущих исследовательских групп и компаний, производящих специальные волокна. К сожалению, несмотря на приложенные усилия, авторам не удалось получить какие-либо материалы от компании Corning.

Для полноты изложения обзора различных типов специальных волокон и в качестве справочного материала по общим теоретическим вопросам первые шесть глав содержат теоретические основы технологии производства оптических волокон, а также анализ рынка. Разработка оптических волокон стимулируется экономическими, технологическими и научными факторами; при этом очевидно, что без сильных экономических стимулов волокна не получили бы столь широкого распространения. Именно поэтому мы начинаем изложение материала с обзора движущих сил, способствующих созданию и развитию индустрии специальных волокон, а также конъюнктуры рынка и коммерческих приложений, нуждающихся в специальных волокнах. Этим вопросам посвящена 1 глава. Любое справочное издание должно быть в определенном смысле самодостаточным. Поэтому во 2 главе изложены базовые принципы распространения света и теоретические основы разработки волокон, а в 3 гла-

ве — обзор существующих методов изготовления волокон. 4 глава посвящена защите оптических волокон, а именно различным покрытиям и методам их нанесения на волокно. Каковы характеристики и ограничения покрытий оптического волокна? Диапазон вариантов очень широк — от стандартных покрытий телекоммуникационных волокон до полимерных покрытий с низким показателем преломления, используемых в волокнах с двойной оболочкой. Завершает рассмотрение этой группы вопросов 5 глава, в которой описаны некоторые из самых новых и более специализированных одномодовых волокон для телекоммуникационных приложений, такие как волокна с ультранизким содержанием ОН, волокна со сглаженной дисперсией и с компенсацией дисперсии.

В сенсорных приложениях часто требуются одномодовые оптические волокна с нестандартной геометрической структурой, например, с двумя или более сердцевинами или со смещенной сердцевиной. В других приложениях применяются волокна с боковыми отверстиями, встроенными металлическими электродами или капиллярными трубками. Эта многочисленная группа специальных одномодовых волокон рассмотрена в 6 главе.

Только редкоземельные элементы обладают способностью генерировать когерентное оптическое излучение в аморфной среде, и поэтому волокна, легированные редкоземельными элементами, находят применение во многих важных приложениях (7 глава). Благодаря случайно обнаруженной способности легированного эрбием кварцевого волокна обеспечивать усиление сигнала в диапазоне 1,5 мкм, весь земной шар теперь охвачен широкополосными системами связи. Еще один яркий пример применения волокон, легированных редкоземельными элементами, представляет мощный иттербиевый волоконный лазер с оптической мощностью свыше 1кВт. Волокна с сохранением поляризации РМ (Polarization maintaining) более сложны в производстве, чем волокна с круговой симметрией. Наивысшая степень оптической анизотропии достигается за счет введения усиливающих стержней (волокно типа PANDA) и анизотропных присадок (волокно типа «бабочка»). Такие волокна, играющие важную роль во многих специальных приложениях, описаны в 8 главе. После того как К.О. Хилл открыл возможность «вписывания» решетки в стекло, получили распространение волоконные решетки с ультрафиолетовым возбуждением, на основании которых были созданы системы плотного мультиплексирования с разделением по длине волны DWDM (Dense wavelength division multiplexing), способствующие развитию Интернета. Светочувствительные волокна, используемые при изготовлении волоконных решеток Брэгга FBG (Fiber Bragg grating) и других устройств, рассмотрены в 9 главе.

Мы привыкли считать, что оптические волокна обладают твердой сердцевиной. Однако при использовании полой сердцевины, окруженной слоями материалов с сильно отличающимися показателями преломления, волокно получает дополнительные механизмы распространения света. Были продемонстрированы «бесконечно» одномодовые волокна данного типа с низкими потерями, а при заполнении полой сердцевины активной средой (например, органическим красителем) появляются новые виды лазерной генерации. Такие волокна позволяют передавать свет в инфракрасном (ИК) диапазоне — далеко за пределами критической длины волны кварцевого волокна, равной 2 мкм. В 10 главе подробно изложены теоретические основы волокон с полой сердцевиной. Мы также привыкли думать, что размеры волновода имеют тот же порядок, что и длина волны распространяющегося по нему света. Однако если диаметр волноводной структуры существенно меньше длины волны, то свет все равно распространяется (хотя и с потерями), создавая при этом большую исчезающую волну. Это явление не только представляет научный интерес, но и нашло применение при измерении объектов, размеры которых намного меньше длины волны. В 11 главе содержится обзор новых научных исследований в области анализа и производства волокон с диаметром, намного меньшим длины волны, а также так называемых

кварцевых нановолокон. В 12 главе исследуется еще одна необычная разновидность специальных волокон — киральные (хиральные) волокна. Киральные волокна используют спиральную периодичность в структуре сердцевины, что придает им уникальные характеристики в части поляризации и избирательности по длине волны.

подавляющее большинство оптических волокон изготавливается из кварца, обладающего чрезвычайно низкими оптическими потерями и удивительными физическими свойствами. Однако критическая длина волны кварцевых волокон в инфракрасном диапазоне составляет примерно 2 мкм, в то время как во многих приложениях, таких как спектроскопия, зондирование и доставка лазерного излучения, необходимо передавать свет на более длинных волнах. В 13 главе рассмотрены различные варианты стекла и кристаллических материалов, такие как фториды, халькогениды и галоидные стекла, которые могут использоваться для передачи в инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах.

Хорошо известно, что волокна необходимо защищать от воздействия окружающей среды, а кварцевые волокна особенно нуждаются в защите от ослабляющего воздействия влаги и радикалов OH^- . Результатом такого воздействия могут стать дополнительные потери в сердцевине, обусловленные пиком гидроксильного поглощения OH^- на длине волны 1380 нм. Поэтому в таких приложениях, как геофизические исследования в нефтяных и газовых скважинах, возникает необходимость в герметичных покрытиях, не пропускающих как воду, так и газообразный водород. В условиях повышенной температуры в скважине ускоряется диффузия молекул водорода в структуру стекла, что ведет к увеличению оптических потерь и делает защиту волокна еще более важной. В линейке предлагаемых на рынке специальных оптических волокон важное место занимают волокна с углеродным покрытием (14 глава), позволяющим применять кварцевое волокно при геофизических исследованиях и в других жестких условиях окружающей среды. Однако бывают и такие приложения (например, военные или сенсорные), в которых требуется еще более надежная защита волокон. Для решения этой задачи были разработаны волокна с металлическим покрытием (15 глава), в которых на стеклянную поверхность методом погружения или напыления наносится тонкий слой низкотемпературного металла (золота, олова или меди) или даже сплав с более высокой температурой.

Как уже было отмечено, волокна с сохранением поляризации могут формироваться вследствие стрессовой анизотропии. Любое изменение азимутальной симметрии в волокне может устранить вырожденность двух состояний поляризации. Этого можно достичь за счет геометрической структуры, как в случае D-образного волокна, или эллиптической формы сердцевины (16 глава).

Одним из первых видов выпускаемых серийно специальных волокон были многомодовые кварцевые волокна с большой сердцевиной и пластмассовой оболочкой, PCS4 (Plastic clad silica), которые до сих пор пользуются спросом и находят применение в различных приложениях, таких как доставка лазерного излучения в биомедицинских системах, автомобильное освещение, локальные вычислительные сети и многие другие. Различные варианты состава стекла и новые усовершенствованные волокна данного типа описаны в 17 главе.

В фотонных устройствах часто возникает необходимость включения специальных микрокомпонентов, обеспечивающих эффективную работу волоконных устройств. В таких случаях применяются конические волокна, позволяющие согласовать числовую апертуру усилительной секции устройства с соответствующими источниками накачки или усилить интенсивность оптического излучения мощного волоконного лазера с заданной диаграммой направленности в ближней и дальней зонах. Такие устройства и аспекты их разработки представлены в 18 главе.

Некоторые из самых ранних образцов волноводных структур были основаны на заполнении сердцевины или полого волокна жидкостями с более высокой оптической

плотностью. Такие волокна с жидким сердечником до сих пор используются во многих приложениях, связанных с доставкой УФ-излучения и спектроскопией (19 глава).

Во многих приложениях нет необходимости обеспечивать чрезвычайно низкий уровень потерь, и в таких случаях часто применяются полимерные оптические волокна POF (Polymeric optical fiber), описанные в 20 главе. Эта отрасль, демонстрирующая стабильный рост и развитие, ориентирована, прежде всего, на автомобильную промышленность. Более того, были разработаны полимерные волокна с более эффективным градиентным показателем преломления, что позволило снизить величину потерь до 40 дБ/км.

Хотя кварцевые волокна могут использоваться в качестве температурных датчиков примерно до 1100 °С, существует спрос на материал, который смог бы выдержать еще более высокие температуры при работе в агрессивных средах. Этим требованиям могут удовлетворить сапфировые волокна небольшой длины. Они выращиваются методом пьедестала как единые кристаллические нити с наименьшим диаметром 150 мкм. Такие волокна востребованы в спектроскопии, где они обеспечивают передачу в ИК-диапазоне на тех длинах волн, где уже не работают кварцевые волокна (21 глава).

Одним из крупных успехов в области специальных оптических волокон стало создание мощного иттербиевого волоконного лазера. В настоящее время выпускаются многокиловаттные лазеры, мощность которых при работе в одномодовом непрерывном режиме превышает 2000 Вт. Объем рынка материалов для производства промышленных лазеров составляет около 2 миллиардов долларов США в год, при этом доля мощных волоконных лазеров с двойной оболочкой постоянно растет. Лазер мощностью 1,5 кВт позволяет разрезать толстую сталь. В приложениях, связанных с резкой, применяются плазменная технология, лазеры на углекислом газе или лазеры на алюмоиттриевом гранате YAG (Yttrium aluminum garnet). Однако можно предположить, что с уменьшением стоимости мощных диодов накачки мощные волоконные лазерные системы окажутся вне конкуренции. В ближайшие несколько лет ожидается значительный рост числа приложений, использующих промышленные лазеры. Специальные волокна, необходимые для изготовления волоконных лазеров, а также их промышленные приложения подробно рассмотрены в 22 главе.

Преимущества использования волокон в биомедицинских приложениях очевидны. Кварцевое волокно биологически инертно, а благодаря малым размерам его можно вводить в тело в качестве катетера, проникающего в любое место кровеносной системы, для удаления бляшек, снятия закупорки артерий или удаления кист. Эта отрасль медицины активно развивается, и следует ожидать появления новых разработок. В 23 главе описаны волоконные системы доставки, их использование в биомедицине и применение специальных волокон.

Заключительная глава посвящена механической прочности и надежности стекловолокна. Эти сведения очень важны для инженеров-разработчиков, использующих кварцевые волокна в приложениях, не связанных с телекоммуникациями.

В заключение хотелось бы отметить, что вниманию читателя предлагается достаточно полный, по мнению авторов, обзор множества разновидностей специальных оптических волокон и их применений, а также ожидаемых направлений дальнейшего развития отрасли. При изложении материала авторы старались уделять внимание как теоретическим основам, так и практическим приложениям рассматриваемых вопросов. Мы также постарались привлечь к работе экспертов, внесших свой вклад в развитие различных аспектов данной отрасли. Авторы надеются, что это издание окажется полезным всем тем, кто хотел бы углубить свои знания общих принципов создания специальных волокон и понять, как особые свойства таких волокон могут быть использованы в практических приложениях.

*А. Мендес
Т.Ф. Морзе*

ГЛАВА I

ОБЗОР РЫНКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Стивен Монтгомери (Stephen Montgomery)
ElectroniCast Corp., Сан-Матео, Калифорния

1.1. Обзор рынка

Компания ElectroniCast изучает потенциал использования и емкость рынка различных специальных оптических волокон. История всех изучаемых типов волокон очень убедительно продемонстрировала высокий уровень и перспективы их будущего развития. Среди некоторых недавних достижений (в стоимостных показателях) — поляризация (PZ), легирование иттербием, компенсация дисперсии и фоточувствительные волокна. Предполагается также развитие менее известных и самых передовых волокон как, например, «дырчатых» (волокон на фотонных кристаллах).

Объем мирового потребления отдельных специальных оптических волокон, которые составляют предмет фактической торговли, исследований и производства (R&D), стремительно вырос от 239 млн долларов в 2000 году до прогнозируемой на 2010 год величины в 4380 млн долларов, рис. 1.1. Этот рост обусловлен требованиями, выдвигаемыми к дальности передачи (в каналоклометрах), оптическим усилителям OFA (Optical fiber amplifier), компенсации дисперсии, затуханию, необходимостью высокой скорости передачи, ростом числа длин волн (DWDM), высокоомощными лазерами и просто ростом числа применений компонентов и модулей, а также другими факторами.

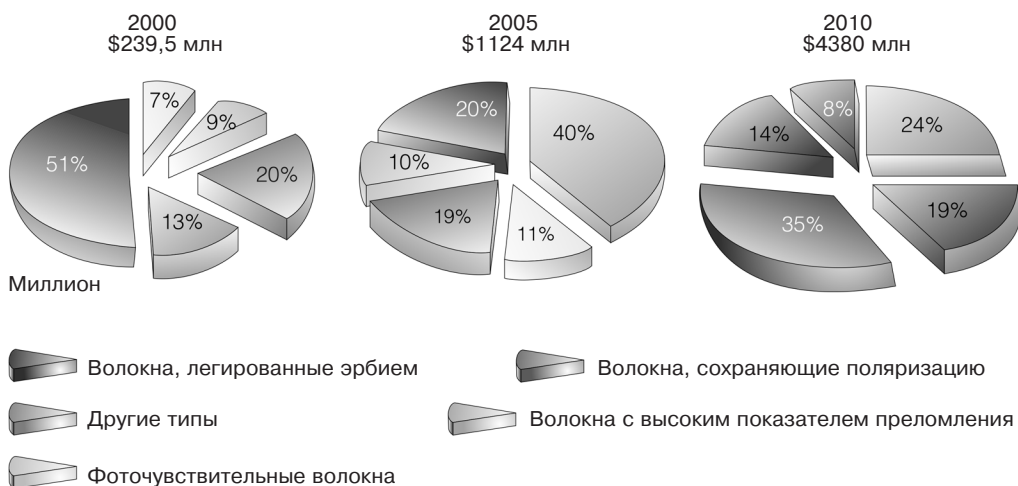


Рис. 1.1. Оценки общемирового потребления специальных оптических волокон, прогнозируемые по типам волокон

1.1.1. Зависимость производства от потребления

В последние годы фактическое потребление (использование) специальных оптических волокон в различных научно-исследовательских приложениях и в сфере коммерческого потребления превысило темпы их производства. Эта ситуация выравнивалась за счет того, что существующий запас волокон был использован более управляемыми уровнями сетей.

Общепризнано, что с 2004 года на всех уровнях «цепочки» производства и потребления оптических волокон возобновился существенный рост, хотя и не такой стремительный, какой наблюдался на линиях дальней наземной и подводной связи Северной Америки в 1999—2000 гг.

Необычно сильное развитие волоконной оптики в течение 1994—2000 гг., а затем необычно резкий спад в 2001—2002 гг. были в большей мере следствием инвестиционной политики, чем изменением спроса. Рискованные вложения капитала VC (Venture capital) и прибыльные инвестиции в будущие сети (включая все оборудование и компоненты) рухнули. Новые сети были заморожены в незавершенном состоянии. Заказы на оборудование были аннулированы, что последовательно распространилось на компоненты и комплектующие устройства.

1.1.2. Стремительный рост потребности в использовании волоконно-оптических датчиков

Наблюдается стремительный рост спроса на волоконно-оптические датчики, являющиеся главными потребителями специальных оптических волокон. Широкий диапазон применений волоконно-оптических датчиков обусловлен потребностью в измерении различных величин. Волоконно-оптические гироскопы, используемые в военных, космических и коммерческих приложениях наведения и дистанционного управления, благодаря относительно невысокой цене за единицу, лидируют в производстве датчиков (являются основной функциональной единицей потребления). Другие важные функции (измеряемые величины) волоконно-оптических датчиков, использующих специальные оптические волокна, включают следующие приложения (но ни в коем случае не ограничиваются ими):

- деформация;
- температура;
- течение;
- давление;
- газ, жидкость;
- акустика, вибрации, землетрясения;
- обнаружение объектов, отбор образцов;
- магнитные, электрические поля;
- контроль длин волн (цвета).

1.1.3. Разработка систем вооружения

По политическим, экономическим соображениям, соображениям безопасности и т.д. системы вооружений США разрабатываются, производятся и внедряются с максимальным использованием новейших технологий, которые могут быть широко распространены без привлечения значительных человеческих ресурсов. Последовательное развитие поколений электроники и оптики (фотоники) значительно опережает развитие средств доставки или контейнеров, в которых размещаются современные системы вооружения. В этой ситуации основные транспортные аппараты, например, во-

енная авиация, морские суда или межконтинентальные ракеты, должны быть приспособлены для размещения трех или четырех последовательных поколений систем вооружения, прежде чем эти транспортные средства или контейнеры будут сняты с эксплуатации.

1.1.4. Коэффициент модернизации: 100 — 1000

Обычно коэффициент модернизации каждой следующей военной или аэрокосмической системы составляет от 100 до 1000, но при этом системы должны иметь те же или еще меньшие габариты и тот же или еще меньший вес. Стремительный прогресс, например, потребовал еще меньшие радиусы изгибов волокна, что сделало специальные волокна практически идеальными для различных приложений, включая медицинские. При высокоскоростной передаче данных использование волоконной оптики вместо металлических проводов частично дает ответ на требования к уменьшению размеров, объема, веса при повышении стойкости к электромагнитным ЕМІ (ElectroMagnetic Interference) и радио RFI (Radio Frequency Interference) помехам. Такие системы, конечно же, должны иметь очень высокие показатели надежности при соблюдении ряда условий относительно охраны окружающей среды или жестких внешних условий. Эти факторы обуславливают спрос на высоконадежные специальные оптические волокна, волоконно-оптические датчики, высокомошные лазеры, оптические соединения, включающие оптические панели (кросс-платы), а также множество других устройств, использующих специальные оптические волокна, например, пассивные и активные оптические компоненты.

1.1.5. Высокая стоимость специализированного исполнения

Небольшие или относительно малые показатели годового производства большинства военных и аэрокосмических систем в сочетании с требованиями высочайшей надежности в различных условиях окружающей среды и максимальной миниатюризации, по предварительным оценкам, обычно приводят к повышению стоимости таких компонентов в 100 — 1000 раз, по сравнению со стоимостью аналогичных по функциям коммерческих компонентов общего пользования. Однако новая тенденция использования «готовых» технологий COST («commercial-off-the shelf») в качестве «рычага» для достижения быстрого результата в коммерческих приложениях снижает этот коэффициент.

1.1.6. Множество свойств одних и тех же специальных оптических волокон

Наблюдается повышенный интерес к высоколегированным волокнам, используемым для изготовления очень коротких волоконных лазеров или усилителей. В это семейство должны влиться и волокна с двойной оболочкой, легированные редкоземельными элементами, которые позволяют получить на выходе волоконных лазеров и усилителей еще большую мощность. Согласно прогнозам будет появляться все больше и больше волокон, легированных редкоземельными элементами, со свойством сохранения поляризации. Еще более популярными станут волокна с двойной оболочкой, легированные редкоземельными элементами и сохраняющие поляризацию.

Анализ дальнейших перспектив будущего рынка специальных оптических волокон показывает возможную тенденцию к объединению множества свойств в одних и тех же специальных волокнах. Производство таких многофункциональных волокон

обойдется значительно дороже, но и продаваться они будут по существенно большей цене. Мы ожидаем, что конкуренция среди производителей специальных волокон заставит их перейти к созданию более воспроизводимой серийной продукции, которая сможет заменить более распространенную продукцию общего назначения.

1.2. Специальные оптические волокна: несколько избранных примеров

1.2.1. Фторидное волокно

Фторидные волокна занимают на рынке нишу, которая будет нормально, без взрывов расти. Компания ElectroniCast не ожидает никаких прорывов, которые могли бы изменить рыночные реалии для волокон этого типа. Такие волокна будут использоваться для передачи в середине инфракрасного диапазона — MIR (Mid-infrared) и в производстве легированных празеодимом (Pr) или тулием (Tm) волоконно-оптических усилителей и источников. Оптические волокна MIR передают свет между 2 и 5 мкм. Специальные оптические волокна часто классифицируются и продаются по их оптическим, механическим показателям и показателям свойств окружающей среды.

1.2.2. Теллуритовые волокна

Теллуритовые волокна также занимают на рынке свою нишу. Их использование часто связывают с широкополосными оптическими усилителями, но существуют и другие, альтернативные или конкурирующие технологии. Компания ElectroniCast рассматривает теллуритовые волокна как предмет научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Однако, по сравнению с фторидными волокнами, теллуритовые волокна рассматриваются в контексте обработки оптических сигналов как более перспективные волокна, которые могут создать на рынке прецедент, если смогут работать с накачкой на длинах волн 980 и 1480 нм. Согласно нашим оценкам, общемировое использование (потребление) теллуритовых волокон в мире составило 200 тыс. долларов США в 2002 году, возросло до 600 тыс. долларов США в 2006 и, как показано на рис. 1.2, по прогнозу достигнет 3,3 млн. долларов США в 2008 году.

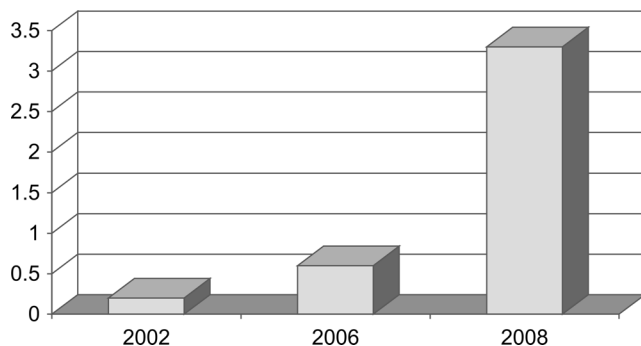


Рис. 1.2. Прогноз рынка теллуритовых оптических волокон, в млн долларов США

1.2.3. Волокна, легированные висмутом

Ожидается, что волокна, легированные висмутом, в конечном итоге будут усовершенствованы до уровня, очень привлекательного для использования в производстве оптических усилителей, охватывающих полосу L. Кроме того, легированные эрбием с добавкой висмута оптические волокна позволяют охватить полосы L и C+L. Несмотря на то, что городские оптические сети MAN (Metropolitan area network) или «метро», в отличие от магистральных линий связи, используют относительно короткие линии, внедрение на них систем мультиплексирования по длинам волн высокой плотности DWDM (Dense wavelength division multiplexing) открывает «форточку» для возможного использования волоконно-оптических усилителей. Предполагается также, что волокна из висмутового стекла обеспечат в полосе C+L химические, механические свойства и термическую стойкость, превосходящие свойства конкурирующих технологий, таких как теллуриновые и фторидные специальные оптические волокна. Как показано на рис. 1.3, прогнозируется, что общемировое потребление волокон, легированных висмутом, возрастет с 20 тыс. долларов США в 2002 году до 3,46 млн долларов США в 2008 году.

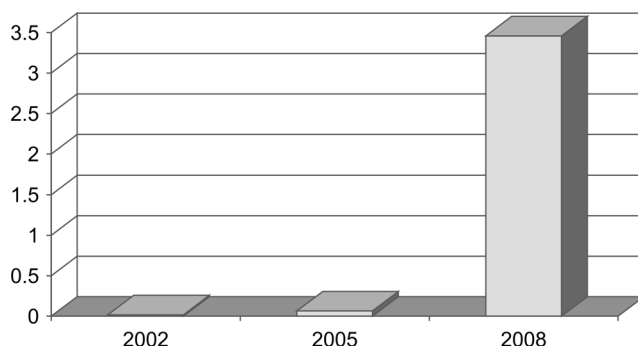


Рис. 1.3. Прогноз общемирового потребления оптических волокон, легированных висмутом, в млн долларов США

1.2.4. Поляризационные волокна

Ожидается, что поляризационные (PZ) волокна останутся в рыночной нише приложений, связанных с поляризацией. Одиночные волокна PZ используются в волоконно-оптических датчиках и высококлассных телекоммуникационных компонентах, таких как компенсаторы поляризационно-модовой дисперсии PMD (Polarizing mode dispersion). Как показано на рис. 1.4, общемировое использование (потребление) поляризационных волокон достигло в 2004 году 1,1 млн долларов США, возросло до 2,9 млн в 2006 и прогнозируется, что достигнет 5,0 млн долларов США в 2008 году.

1.2.5. Дырчатые — фотонно-кристаллические — волокна

Дырчатые волокна пришли на рынок из исследовательских лабораторий. Важнейшая область применения волокон с воздушной оболочкой состоит в их использовании в устройствах накачки высокоомощных лазеров. Фотонно-кристаллические («дырчатые») волокна PCF (Photonic crystal fiber) продаются с приложением максимальных усилий по их распространению, но коммерциализация растет главным образом за

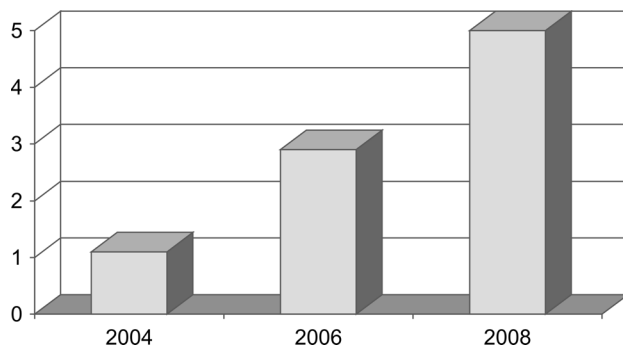


Рис. 1.4. Прогноз общемирового потребления поляризационных оптических волокон, в млн долларов США

счет спроса отдельными научно-исследовательскими центрами больших корпораций и университетов. В настоящее время стоимость дырчатых волокон оценивается в диапазоне между 100 и 1000 долларов США за метр. Прогноз цены сходится к величине не более 215 долларов США за метр к 2008 году и менее 100 долларов к 2012-му (рис. 1.5). Снижение цены будет обусловлено ростом количества таких волокон вследствие их коммерциализации.

Для прохождения света используется внутренняя микроструктура фотонно-кристаллических волокон РСФ. В обычных же оптических волокнах используется полное внутреннее отражение света в сердцевину, окруженную оболочкой с более низким коэффициентом преломления. Существует, по крайней мере, три типа фотонно-кристаллических волокон:

- с твердым кварцевым сердечником: полностью кварцевое волокно с твердым сердечником. Оболочка с воздушными отверстиями проходит по длине волокна. Эффективный механизм прохождения основан на полном внутреннем отражении. Оболочка имеет средний коэффициент преломления RI (Refraction index) стекла и воздуха;

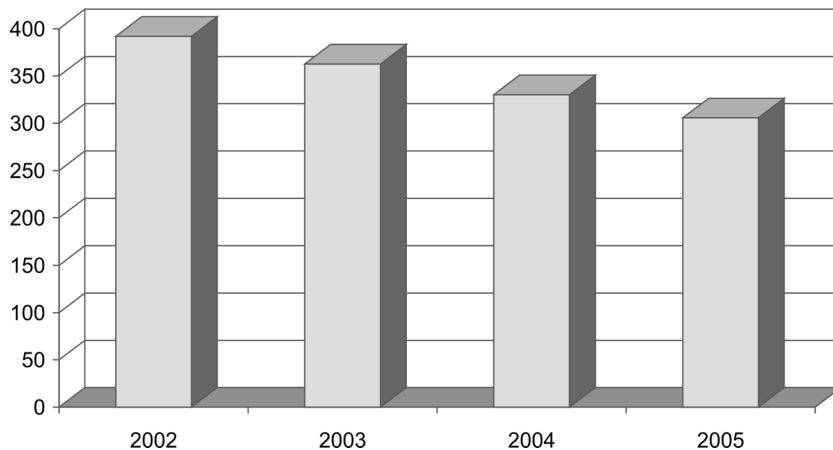


Рис. 1.5. Усредненная суммарная продажная стоимость волокон с фотонно-кристаллической оболочкой (дырчатых волокон)

- с полым сердечником: полностью кварцевое волокно с полым сердечником — в середине только воздух. Оболочка с воздушными отверстиями проходит по длине волокна. Механизм прохождения основан на эффекте фотонной запретной зоны, подобном эффекту Брэгга;
- жидкокристаллические — заполненные фотонными кристаллическими волокнами LC-PCF (Liquid crystal-filled PCF): это волокна, которые могут проводить свет на основе эффекта фотонной запретной зоны; полагают, что они пригодны для оптической обработки сигналов.

Дырчатые волокна начинают демонстрировать коммерческий потенциал их использования, основанный на успехах университетских исследований. Этот коммерческий потенциал виден в определенных характеристиках, таких как одномодовый режим работы в спектре от ультрафиолетового UV до инфракрасного IR диапазона, обширный диапазон режимов при сердцеvine с диаметром более 20 мкм, высокие нелинейные показатели с оптимизированными свойствами дисперсии и числовая апертура NA (Numbered Aperture) от достаточно низких значений до величины более 0,9.

1.2.6. Волокна с компенсацией дисперсии

Волокна с компенсацией дисперсии DCF (Dispersion Compensating Fiber) будут иметь значительную часть рынка с появлением множества новых производителей специальных волокон, борющихся за ограниченный рынок сбыта. Данный тип волокон скоро будет непосредственно доступен на рынке. Эти волокна создаются для того, чтобы предложить более широкую полосу частот, в которой может быть реализована компенсация. Мы скоро столкнемся со спросом на 40 Гбит/с.

Ожидается, что в локальных вычислительных сетях ЛВС или сетях доступа будет появляться все больше и больше многомодовых специальных оптических волокон (фоточувствительных, легированных редкоземельными элементами, затухающих), что превратит эти сети в полностью оптические системы, как это было на городских и магистральных сетях связи.

Существует несколько технических приемов решения проблемы хроматической дисперсии. Наиболее распространенные методы представляют волокна с компенсацией дисперсии DCF, дифракционные волоконные решетки, образцовые материалы, электронные компенсаторы дисперсии EDC (Electronic Dispersion Compensator). Волокна с компенсацией дисперсии DCF имеют дисперсию знака, противоположного знаку дисперсионных искажений, внесенных в сигнал стандартным одномодовым волокном. Например, для компенсации дисперсии 80-километрового участка оптического волокна к нему добавляется волокно DCF длиной 12—16 км. Однако некоторые производители и пользователи считают волокна с компенсацией дисперсии DCF слишком длинными, вносящими большое затухание и увеличивающими оптические нелинейные эффекты. Фильтрующие изделия, такие как решетки или плотная оптика, виртуальные фазированные решетки VIPA (Virtually Imaged Phased-Array) (фазированные решетки с виртуальным отображением), образцовые модули компенсации хроматической дисперсии, также дают приемлемые решения.

В решетчатых структурах период решетки линейно возрастает с тем, чтобы медленные длины волн ускорились и прошли дальше в модуль, прежде чем наступит отражение. Как и в других устройствах на основе волоконных решеток Брэгга FBG (Fiber Bragg grating), для отделения входов модуля от выходов используется оптический циркулятор. Возрастает дальность и скорость передачи, расширяются объемы использования систем DWDM и различных типов оптических волокон, поэтому спрос на регулируемые функции компенсации будет возрастать.

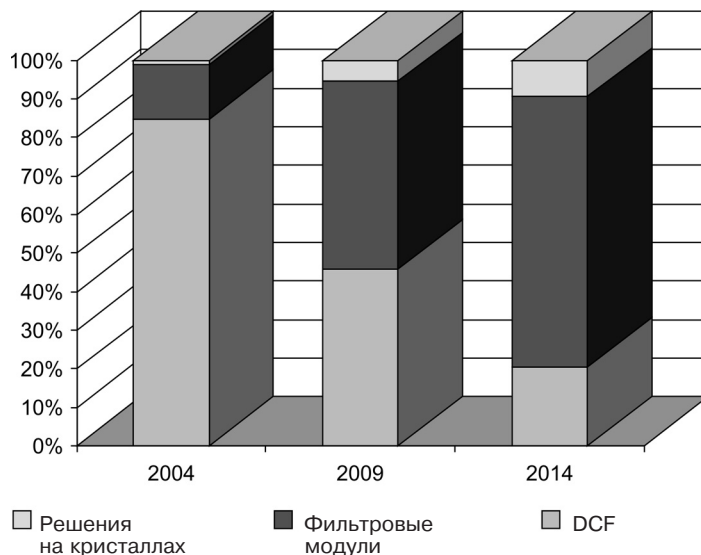


Рис. 1.6. Прогноз падения рынка компенсаторов хроматической дисперсии: сравнение компенсаторов на основе волокон DCF с фильтрующими модулями и решениями на кристаллах

Существует три общих метода борьбы с хроматической дисперсией в оптических сетях — использование волокон с компенсацией дисперсии DCF, фильтрующие модули компенсации дисперсии, обычно на волоконных решетках Брэгга FBG или эталонных образцах или других типах фильтров; и электронные (а в будущем — фотонные) схемы.

В 2004 году компенсаторы хроматической дисперсии на основе волокон DCF составили 85 % от валового объема общемирового потребления компенсаторов хроматической дисперсии. В том же году доля компенсаторов, использующих фильтровые методы, составила 14 %, а компенсаторов на электронных схемах — 1 %. В 2008 году доля схемных решений составит 5,5 %, а доля фильтровых методов возрастет до 49 %. Как показано на рис. 1.6, прогнозируется, что к 2014 году доля фильтровых модулей на рынке возрастет до 70,1 %, поскольку возрастет спрос на дистанционно управляемые, перестраиваемые устройства. Решения на кристаллах из-за того, что они имеют очень низкое соотношение цены на изделие, в 2014 году составят только 9,4 %, а волокна с компенсацией дисперсии DCF будут делить с ними рынок поровну или же займут 20,5 %.

Компенсаторы хроматической дисперсии появились в связи со стремительным вводом в эксплуатацию каналов на 2,54 Гбит/с (OC-48) и стали необходимыми в связи со стремительным развертыванием систем OC-192 (10 Гбит/с), с тенденцией увеличения спектральной плотности систем WDM. Рост рынка компенсаторов хроматической дисперсии в 1997—2000 годах имел взрывообразный характер (бум). Однако во время экономического спада (обвала) рынка высокоскоростной связи в 2001—2003 годах этот вид продукции также испытал снижение потребительского спроса. В 2004 году рынок начал проявлять оживление при полной экспансии высокоскоростных систем, а компенсаторы хроматической дисперсии опять в полной мере стали востребованными.

Большая разница между рынками компенсаторов хроматической дисперсии 1997—2000 годов и 2005 года заключается в том, что решения, основанные на филь-

трах, а также альтернативные решения на электронных схемах выдержали длинный перечень испытаний 2000—2004 годов, такие как стендовые и приемочные испытания, опытно-конструкторские разработки, усовершенствование технологий, объединения, приобретения и подготовка компаний (например, сертификация МОС {Международная организация по стандартизации} — ISO {International Organization for Standardization}). Таким образом, методы, альтернативные линейке продукции, основанной на волокнах с компенсацией дисперсии DCF, стали теперь уже готовы к рыночной конкурентной борьбе с DCF.

Прежние компенсаторы хроматической дисперсии представляли собой просто участки компенсационного волокна DCF с отрицательной дисперсией соответствующей длины, подавляющего дисперсию, вызванную в сигнале предыдущим, транспортным волокном. Но эти блоки достаточно дороги для покупки и трудоемки в монтаже, плюс они вносят значительные потери и другие проблемы, а одиночные модули не полностью компенсируют дисперсию на всех длинах волн. Поскольку плотное мультимплексирование WDM прогрессирует, а скорость модуляции возрастает, то необходимо демультимплексировать длины волн и вставлять в каждую волну или волокно подстраиваемый (переменный, регулируемый) компенсатор для подстройки сигналов по частоте и времени. В 1997—2000 годах методы компенсации дисперсии эволюционировали к компенсаторам, основанным на волоконных решетках Брэгга FBG и других методах оптической фильтрации. Эти устройства вносят меньшие потери и имеют другие достоинства, но все еще нуждаются в ручном монтаже на узлах.

Поскольку оптические мультимплексоры ввода-вывода OADM (Optical add/drop multiplexer) используют демультимплексирование, а затем повторное мультимплексирование вместе с усилением, они представляют естественный объект для установки компенсатора. Компенсаторы, устанавливаемые вручную, не учитываются как составная часть мультимплексора OADM, поскольку они устанавливаются обычно отдельно после установки мультимплексора OADM. Однако по соображениям, обсуждаемым в этой главе далее, существует тенденция разработки дистанционно подстраиваемых компенсаторов, встроенных в мультимплексоры OADM и учитываемых в качестве их составной части. Использование компенсаторов в мультимплексорах OADM, конечно, не исчерпывается весь рынок подстраиваемых компенсаторов. Компенсаторы необходимы в каждом усилительном пункте и регенераторе, и будет расти спрос на усилители, которые будут или уже объединены с мультимплексорами OADM. Тем не менее, физическое размещение узлов OADM должно быть удобным для обслуживаемых ими пользователей, и это не всегда может совпадать с оптимальным размещением усилительных станций. Вообще абонентская инфраструктура (как правило, малые и средние города) может обслуживаться одним узлом OADM, который может объединять четыре мультимплексора ввода-вывода OADM (как предполагается в данном примере): два для двунаправленной транспортировки активного трафика плюс два дублирующих в двухволоконной схеме резервирования. Обычно магистральный кабель содержит от 48 до 144 волокон, а кабели на участке доступа имеют тенденцию к 864 волокнам и более.

Начиная с 1997 года, усилия исследователей и разработчиков направлены на перестраиваемые волоконно-оптические компоненты (компенсаторы, аттенюаторы, лазерные диоды, фотодиоды и т.п.), и эти компоненты появились на свободном рынке. Их основное достоинство состоит в устранении работ (и дополнительных затрат) монтажных бригад по установке и наладке станций OADM и усилителей. Теперь для подстройки (замены) компенсаторов на любом удаленном узле и в любое время в таких работах нет никакой необходимости. Выезды монтажных бригад достаточно дороги, к тому же возрастает дефицит квалифицированного технического персонала.

Модули компенсации хроматической дисперсии также требуются на всем протяжении магистральных линий, в оптических усилителях OFA и между регенерационными пунктами. Усовершенствование методов компенсации дисперсии позволит увеличить расстояние между регенерационными пунктами, а, следовательно, число требуемых регенераторов в линиях сети уменьшится, и стоимость линий снизится.

1.2.7. Волокна с высоким показателем преломления

Корпорация Corning производит этот тип волокон по собственному патенту методом внешнего парофазного осаждения, обеспечивая целостность и однородность. Волокно использует двойную акриловую систему, обеспечивающую защиту от затухания на микроизгибах. Это волокно отличается отличной геометрией, высоким показателем преломления сердцевины, эффективной сращиваемостью и высокой числовой апертурой NA. Использование такого волокна в оптических шнурах обеспечивает эффективные соединения внутри фотонных изделий. Оно позволяет также снизить затухание на изгибах благодаря высокому показателю преломления сердцевины. Применения волокон данного типа включают фотонные изделия, сплавные волоконные разветвители, волоконные компоненты для оптических усилителей с легированными эрбием волокнами EDFA (Erbium-doped fiber amplifier), соединители, соединительные шнуры лазерных диодов (пиг-тэйлов) и другие компоненты систем DWDM.

1.2.8. Волокна, сохраняющие поляризацию

В волокнах, сохраняющих поляризацию PMF (Polarization maintaining fiber), плоскость поляризации PZ световой волны, входящей в волокно, поддерживается в процессе распространения с небольшим или вообще отсутствующим поперечным смещением поляризации оптической мощности. Поляризация PZ — это свойство, которое описывается ориентацией вектора электрического поля электромагнитной волны. Направленность и величина вектора изменяются во времени. Поперечное сечение PMF изменяется от эллиптической формы до прямоугольной. Как показано на рис. 1.7, валовое потребление волокон, сохраняющих поляризацию (PMF), в

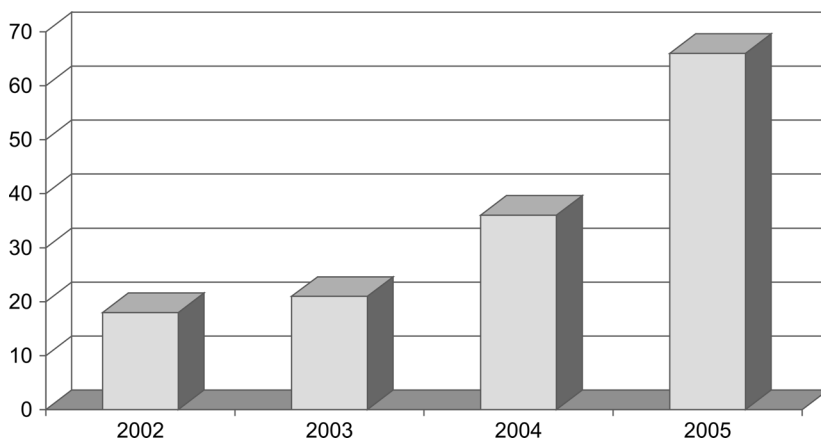


Рис. 1.7. Мировое валовое потребление оптических волокон, сохраняющих поляризацию — PMF, в млн. долларов США

2002 году достигло 18 млн долларов США, возросло до 36 млн в 2004-м и, по оценке, достигнет 56 млн в 2005 году.

Если поляризованный свет вводится в стандартное одномодовое волокно, то положение поляризации быстро потеряется через несколько метров. Положение поляризации PZ света, распространяющегося в среде, может подвергаться воздействию этой среды. Это может создавать проблемы в обычном одномодовом волокне. Напряжения, создаваемые при сгибе или кручении, изменяют направление поляризации света, распространяющегося в обычном волокне. Если волокно подвергается любым внешним воздействиям, например, температурным, то плоскость поляризации на выходе будет изменяться во времени. Это верно даже для коротких волокон. Такая ситуация нежелательна для многочисленных приложений, требующих постоянной поляризации на выходе волокна. Для поддержания положения поляризации необходимо использовать волокна с сохранением поляризации PMF, которые также обозначают аббревиатурой PPF (Polarization preserving fiber — волокна, «консервирующие» поляризацию). Самый распространенный тип волокна PMF представляют волокна с сильным двойным лучепреломлением. «Двойное лучепреломление» означает различные постоянные распространения света в волокне в двух перпендикулярных плоскостях поляризации. В волокне с сильно выраженным двойным лучепреломлением асимметричные напряжения, возникающие вокруг сердцевины волокна, несколько по-разному действуют на показатель преломления в двух ортогональных осях. Эти быстрая и медленная оси поддерживают направление поляризации введенного света на большом расстоянии.

В таких типах кабелей необходимо выровнять оси волокна по поляризации света. Если это невозможно или трудновыполнимо, то для транспортировки поляризованного света можно использовать волокна со слабо выраженным двойным лучепреломлением. В этом случае волокно делается со значительно большей симметрией, чем у стандартного одномодового волокна. Волокно должно иметь отличную геометрию и должно быть совершенно симметрично по всей оси волокна. В некоторых разработках датчиков волокно само используется как чувствительный элемент, и в этом случае датчик Фарадея из витка проводника, обернутого вокруг волокна, вызывает вращение поляризации света в витке. В идеальном волокне вращение пропорционально току и нечувствительно к изменению температуры.

Волокна с сохранением поляризации PMF могут использоваться в шнурах лазеров с высококачественными показателями, поляризационных модуляторах, высокоскоростных системах передачи, поляризационно-чувствительных компонентах и других приложениях, где используется поляризация света. Кроме того, волокна PMF используются в специальных приложениях, таких как оптическое считывание и интерферометрия.

1.2.9. Фоточувствительные волокна

Волокна с решетками Брэгга — FBG представляют средство повышения пропускной способности оптического волокна. Это средство создания функций фильтрации непосредственно на участке оптического волокна с использованием интерференционных методов. Помещая фоточувствительное волокно под ультрафиолетовое излучение через маску, формируют высокие и низкие показатели преломления в сердцевине волокна. Число каналов передачи ограничивается разнесением по длинам волн между решетками Брэгга. Качество решетки Брэгга в большой степени зависит от фоточувствительности волокна, используемого для записи решетки.

Если сердцевина фоточувствительного оптического волокна образована с использованием примесей, например, германия, то коэффициент преломления сердцевины

(вдоль волокна) может быть промодулирован. Этого можно достичь, подвергая сердцевину воздействию пары ультрафиолетовых интерферирующих лучей света.

Фоточувствительные волокна используются для записи решеток с большим периодом и волоконных решеток Брэгга — FBG. Решетки FBG появились в качестве технологии, связанной с системами DWDM. Фильтры — выравниватели характеристики усиления EDFA, системы WDM и мультиплексоры ввода-вывода, принцип действия которых основан на периодических колебаниях показателя преломления сердцевины самого волокна, способствовали расширению полосы частот. Волоконные решетки FBG могут также использоваться в производстве датчиков оптической деформации и температуры с возможностью квазираспределенных измерений, для чего применяются решетки, записанные последовательно по длине волокна.

1.2.10. Волокна, легированные эрбием

Волокна, легированные эрбием, применяются в оптических усилителях EDFA. С самого начала использования оптических волокон разработчики сетей связи рассматривали оптические усилители на длинных линиях передачи в качестве альтернативы повышению мощности сигнала на передаче, высокочувствительным приемникам и волокнам с малыми потерями. Усилители мощности EDFA повышают мощность оптических сигналов и устраняют неэффективное преобразование оптических сигналов в электрические. Волокна, легированные эрбием, представляют ключевую составляющую в различных приложениях, нуждающихся в оптических усилителях диапазона около 1550 нм. Среди таких приложений — усилители мощности для очень длинных магистральных линий, усилители мощности наземных систем и систем кабельного ТВ, усилители малых сигналов в оптических приемниках. Новое поколение усилителей EDFA включает усилители мощности, предусилители и линейные усилители диапазонов С и L.

Волокна с примесью эрбия, благодаря особым свойствам этого материала, способствуют регенерации оптических сигналов при их прохождении через усилитель EDFA (устройство, усиливающее сигналы в оптической сети). Ионы эрбия в легированном эрбием волокне могут поглощать свет на длинах волн 980 и 1480 нм и переизлучать свет в диапазоне 1550 нм, используемом в связи, в процессе вынужденного или спонтанного излучения. Это позволяет создавать оптические усилители, способные восстанавливать мощность истощенного оптического сигнала в диапазоне длин волн около 1550 нм.

Спрос на оптические усилители, а, следовательно, и на легированные редкоземельными элементами волокна, стремительно возрос с появлением сетей DWDM (см. рис. 1.8). Оптические усилители расставляются вдоль линии связи для одновременного усиления оптического многоканального сигнала. Затем этот сигнал поступает в оптический демультиплексор, где он разделяется на исходные каналы и передается к приемникам.

Следующее поколение усилителей использует модифицированные легированные волокна, предназначенные для усиления во всех полосах — L, S и C. Поскольку легированные эрбием усилители не работают в других полосах, кроме C, то используются другие присадки, например, тулий с фракциями, содержащими фтор или многокомпонентный силикат. Принцип работы усилителей с волокнами, легированными тулием, — TDFA (Thulium-doped fiber amplifier), подобен принципу работы усилителей EDFA. Отличие состоит в материале примеси и конфигурации накачки. Для активации усилителя TDFA используются две накачки на одной или различных длинах волн. Использование усилителей TDFA ограничено в силу того, что они менее надежны, чем усилители, использующие кремневую основу, и не годятся для сплав-

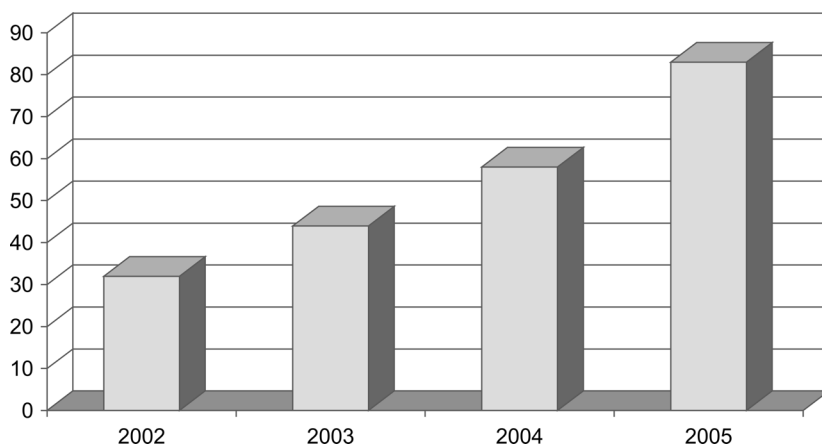


Рис. 1.8. Валовое потребление оптических волокон, легированных эрбием, в млн долларов США

ного сращивания из-за несовместимости материалов волокон, смонтированных на существующих сетях.

Усилители с волокнами, легированными празеодимом, — PDFA (Praseodymium-doped fiber amplifier), хотя и не столь эффективны, как EDFA, но пригодны для работы в окне 1300 нм. Для коротких волн усилители PDFA выглядят многообещающе. Коммерчески доступные усилители PDFA используют фторидную основу. Исследовательский центр NTT Laboratory продемонстрировал теллуритовый усилитель с примесью Er³⁺ EDTFA (Er³⁺-doped tellurite fiber amplifier), имеющий плоскую характеристику при усилении более 25 дБ и коэффициенте шума менее 6 дБ в полосе 50 нм (1560–1610 нм).

Разработка и производство усилителей на волоконной основе предусматривают использование узкополосных сплавных соединителей с очень точным согласованием центральных длин волн (точность около 2 нм). Это позволяет объединить несколько лазерных модулей накачки, существенно увеличивая суммарную мощность усилителя. Волоконные поляризационные (PZ) объединители модулей накачки более совершенны, чем микрооптические объединители с относительно большим вносимым затуханием. С помощью фильтров с плоской характеристикой усиления на основе решеток FBG усиление усилителя может регулироваться в широкой полосе частот. Волоконные решетки представляют собой структуры с периодически изменяющимся показателем преломления в сердцевине оптического волокна, что приводит к отражению или отводу света из сердцевины волокна. Фильтры на решетках Брэгга FBG используются и в других приложениях, включая лазеры с захватом длины волны при выборе канала в устройствах ввода-вывода.

Волоконные усилители Рамана обеспечивают улучшенные характеристики усиления в широкой полосе частот. Высокоскоростные виды трафика настойчиво требуют увеличения пропускной способности сетей. Волоконные усилители Рамана предоставляют решение для реализации очень широкополосного усиления. Но обычно усилители Рамана нуждаются в высокой мощности накачки и низком коэффициенте шума при высоком усилении. Среди возможных приложений — высокоомощные лазерные диоды на кристаллах и волоконные лазеры, обладающие лучшими коэффициентами полезного действия и относительно высокой выходной мощностью. В усилителях Рамана усиливающей средой служит собственно само волокно. Эффект Ра-

мана — это, по сути, нелинейное явление, возникающее при высокой концентрации мощности в волокне. Эти усилители используют стимулированное, вынужденное рамановское рассеяние SRS (Stimulated Raman scattering) для переноса энергии с высокой частоты накачки на низкую частоту сигнала. Объединение рамановского усилителя с EDFA дает очень низкий уровень шума в широкой полосе пропускания. Усиление Рамана позволяет также организовать доступ к длинам волн, которые недоступны высококачественным усилителям EDFA.

Несмотря на то что усиление Рамана было изучено еще до появления усилителей EDFA, эта технология не была востребована до тех пор, пока в начале 1990-х годов не стали доступны высокоомощные источники накачки. Сейчас находятся в производстве и одновременно совершенствуются два типа усилителей Рамана — дискретный и распределенный (усиление рассредоточено по длинам волн, используемым для передачи). Распределенные усилители Рамана будут играть важную роль в высокоскоростных сетях свыше OC-192 (10 Гбит/с) на участках с увеличенной длиной (меньшим числом электронных усилителей или регенераторов), улучшая общие качественные показатели таких сетей. Успехи, достигнутые в разработке усилителей Рамана, привели к усовершенствованию их компоновки, снижению рассеивания Релея и коэффициента шума. На сегодняшний день усилители Рамана (законченные модули и сборочные узлы) предлагаются несколькими производителями.

В терминологии волоконно-оптических усилителей OFA имеет место путаница. Термин «волоконно-оптический усилитель» по-разному понимается в промышленности. Компания ElectroniCast обычно определяет волоконно-оптический усилитель OFA как законченный рабочий модуль, включающий всю необходимую для работы системы электронику. Как правило, оптический усилитель OFA содержит активный блок оптического усиления AOGB (Active optical gain block) плюс множество интегральных схем и других электронных компонентов, смонтированных на одной или нескольких печатных платах. Продаваемые образцы усилителей OFA, как это можно наблюдать в кабельном ТВ и специальных или инструментальных приложениях, часто размещаются в отдельном корпусе с регуляторами на лицевой панели. На рис. 1.9 обозначены направления совершенствования компоновки волоконно-оптических усилителей OFA. Блок усиления (активный или пассивный) в телекоммуникацион-

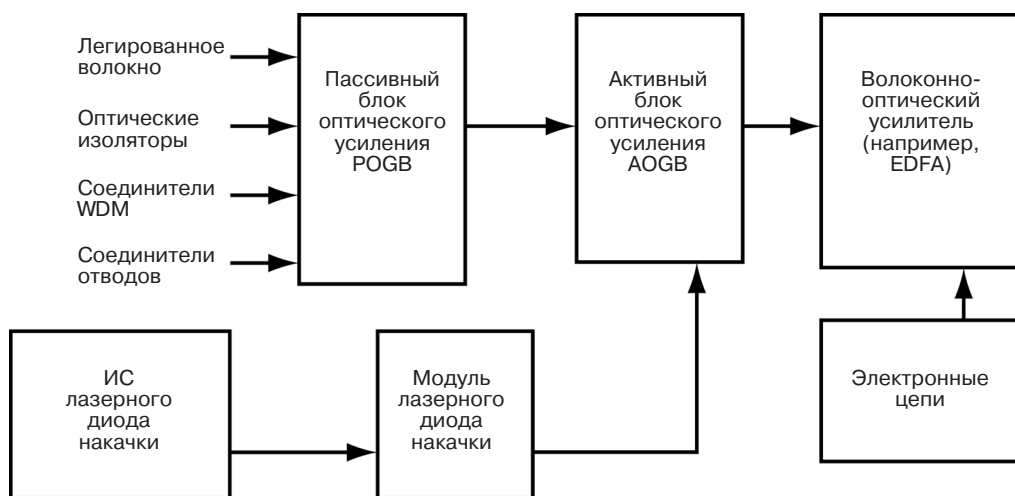


Рис. 1.9. Компоненты волоконно-оптических усилителей OFA: дополнительные усовершенствования

ной промышленности часто называют «оптическим усилителем». Однако в данном примере эти блоки называются «усилительными блоками».

Активный блок оптического усиления АОГВ включает пассивный блок оптического усиления ПОГВ (Passive optical gain block) плюс необходимые модули накачки с лазерными диодами. Однонаправленный активный блок оптического усиления может использовать один, два и более модулей оптической накачки с лазерными диодами. Накачка может вестись на одинаковых или различных длинах волн.

Пассивный блок оптического усиления ПОГВ обычно содержит модуль легированного волокна плюс изолирующий оптический шнур и сплавные соединители для увязки и упаковки в единый корпус.

Лазерные диоды накачки состоят из кристаллов лазерных диодов плюс обычно термоэлектрический охладитель и фотодиод обратной связи в полупроводниковом исполнении с оптическим шнуром.

Спрос на усилители EDFA возрастает по мере продвижения средств связи к технологиям DWDM, ориентированным на скорости 10 Гбит/с и выше. В свою очередь, спрос на специализированное волокно как неотъемлемую часть этих устройств будет создавать производителям хорошие возможности на рынке сбыта этих изделий. Обычно компании-производители предлагают целую номенклатуру волокон, оптимизированных для различных приложений.

Примерно половину итоговой стоимости волоконно-оптических усилителей составляет стоимость оптических и электронных компонентов, используемых в их производстве. Баланс продажной цены включает затраты на оплату труда и накладные расходы на монтаж и тестирование, общие, административные расходы и прибыль. Большая часть расходов на комплектацию приходится на лазерные диоды накачки волоконных усилителей. Как видно из рис. 1.10, требуется и множество других компонентов.

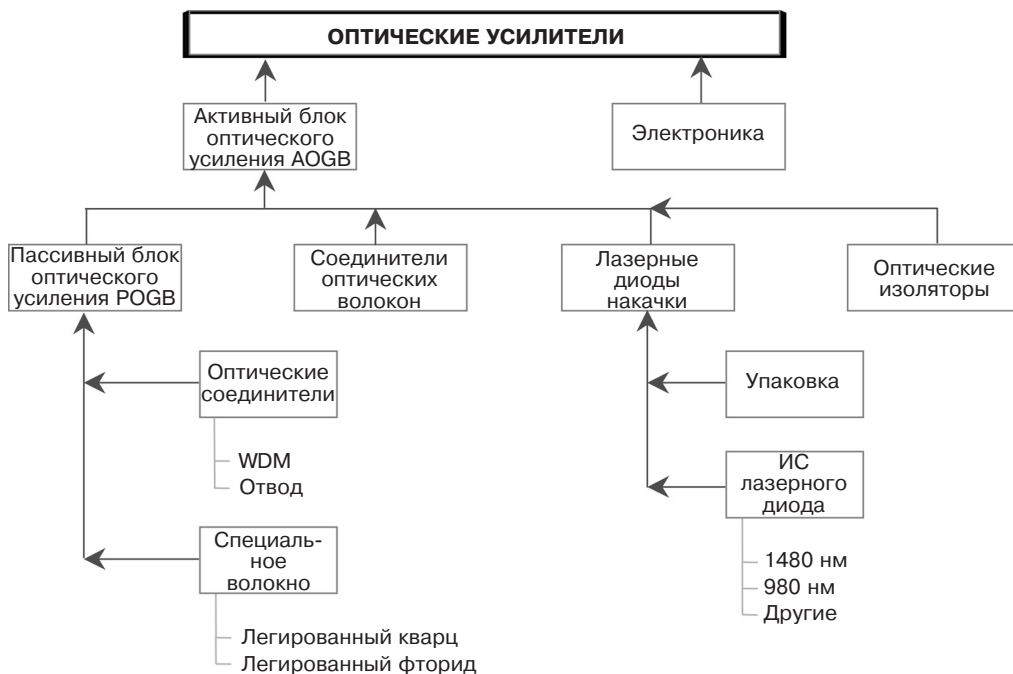


Рис. 1.10. Категории компонентов волоконно-оптических усилителей

1.3. Выводы

Оптические волокна прошли путь развития от простых транспортных волноводов для телекоммуникационных приложений до жизненно необходимых оптических компонентов в составе оптических усилителей, компенсаторов хроматической дисперсии, поляризаторов, датчиков и многочисленных других устройств. Значительную часть оборота рынка специальных волокон составляют быстро растущие военные и аэрокосмические приложения, такие как волоконно-оптические гироскопы, управляемые по волоконным шнурам ракеты, подводные гидрофоны, а также приложения, связанные с добычей нефти и газа.

Рынок специальных оптических кабелей вырос из малого высокоспециализированного бизнеса 1990-х годов во впечатляющий рынок с оборотом в 239 млн долларов США в 2000 году. В дальнейшем ожидается непрерывный динамичный рост этого рынка на более чем 30 % в год, что, по прогнозам, приведет к сумме в 4,38 млрд долларов США в 2010 году.