

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. Теллуритовые 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 сердцевинки	185
6.4.2. Несвязанные сердцевинки	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 волокна 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-алюминосиликатного 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 алюиносиликатное 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 волокон	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. Ответители	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 аттенуаторы	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