

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

А.И. Цаплин, М.Е. Лихачев

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

Под общей редакцией
доктора технических наук, профессора А.И. Цаплина

*Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2011

УДК 681.7.068

Ц25

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *А.С. Бирюков*
(Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва);

д-р техн. наук, профессор *В.П. Первадчук*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

Цаплин, А.И.

Ц25 Методы измерений в волоконной оптике: учеб. пособие /
А.И. Цаплин, М.Е. Лихачев; под общ. ред. д-ра техн. наук., проф.
А.И. Цаплина. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та,
2011. – 227 с.

ISBN 978-5-398-00727-5

Рассмотрены основные понятия, проблемы стандартизации и метрологии в волоконной оптике, необходимые для изучения курса «Методы измерений в волоконной оптике» в техническом вузе. Приведены стандартные методы измерений в оптических волокнах, рассмотрены методы оценки погрешностей измерений, особенности измерений с учетом их микро- и наноструктурирования.

Предназначено для магистров по направлению «Фотоника и оптоинформатика», обучающихся по профилю «Волоконная оптика».

УДК 681.7.068

ISBN 978-5-398-00727-5

© ПНИПУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Волоконная оптика: основные понятия	7
1.1. История развития волоконной оптики.....	7
1.2. Основные характеристики в волоконной оптике.....	21
1.2.1. Устройство оптического волокна.....	21
1.2.2. Классификация волокон	23
1.2.3. Характеристики волокон	27
1.3. Категории оптических волокон	38
1.4. Вопросы для самоконтроля.....	41
2. Стандартизация в волоконной оптике	43
2.1. Стандартизация как элемент системы технического регулирования.....	43
2.2. Особенности стандартизации в волоконной оптике.....	51
2.3. Работа российских и зарубежных организаций по стандартизации в волоконной оптике	55
2.4. Вопросы для самоконтроля.....	56
3. Метрология в волоконной оптике	57
3.1. Обеспечение единства измерений в системе технического регулирования	57
3.2. Особенности измерений в волоконной оптике	66
3.3. Метрологическое обеспечение единства и качества измерений.....	70
3.4. Вопросы для самоконтроля.....	75
4. Контроль, измерения и тестирование волоконной оптики	77
4.1. Основные понятия и определения	77
4.2. Методы контроля и измерения физических величин	81
4.3. Оценка погрешности измерений.....	88
4.4. Вопросы для самоконтроля.....	106
5. Методы измерений в волоконной оптике	107
5.1. Измерение параметров оптического волокна.....	107
5.2. Методы определения размеров волокна	110
5.3. Методы измерения механических характеристик	120
5.4. Методы измерения затухания	125
5.5. Методы измерения ширины полосы пропускания	139
5.6. Числовая апертура. Распределение света в дальнем поле.....	150

5.7. Методы определения характеристик при испытаниях на воздействие внешних факторов	167
5.8. Изменение спектральных характеристик.....	178
5.9. Измерение дисперсии	182
5.10. Вопросы для самоконтроля.....	189
6. Измерения в микро- и наноструктурированных волокнах	191
6.1. Особенности измерений в области нанотехнологий	191
6.2. Методы измерений, применяемые в нанометрологии.....	192
6.3. Метрологическое обеспечение измерений в нанотехнологиях.....	215
6.4. Вопросы для самоконтроля.....	220
Список литературы	222

ВВЕДЕНИЕ

Использование электроники для передачи информации ограничивается небольшими возможностями: при скоростях свыше 10 Гбит/с электроника уже не работает. Переход к новому носителю информации – фотону, а также бурное развитие технологии производства и применения среды его распространения – оптического стеклянного волокна позволяет увеличивать скорость передачи информации до гигантских значений ~ 1 Тбит/с.

Революционные изменения происходят и в другой сфере применения оптического волокна: его участок, легированный эрбием, ниодимом или другими редкоземельными элементами, способен при накачке энергии становиться усиливающей средой. Волоконный лазер способен генерировать энергию с пиковой мощностью более 100 кВт и сверхкороткими импульсами $\sim 10^{-15}$ с (фемтосекундный лазер). Это приводит к качественным изменениям на рынке лазерных технологий.

Такое развитие событий стало возможным благодаря широкому практическому использованию достижений фундаментальных наук – прежде всего физики, химии и математики, а также компьютерных технологий. Проводятся интенсивные исследования нового типа оптических волокон – так называемых микроструктурированных волокон и фотонных кристаллов, на основе которых прогнозируется создание новых типов волоконной оптики. Развитие нанотехнологий открывает новые перспективы в производстве волокон с низкими оптическими потерями и высоким к.п.д. усиления закачиваемой энергии.

Однако развитие рынка этой наукоемкой продукции в России должно быть защищено стандартами, кроме того, нормы этих стандартов должны соответствовать международным требованиям, то есть должны быть привлекательными для потенциальных торговых партнеров. Другими словами, стандартизация и метрология в этой сфере являются непременным условием создания конкурентоспособной нанопродукции.

Стремление повысить плотность передаваемой через оптоволокно информации и энергии приводит к микро- и даже наноструктурированию его сердцевины, диаметр которой составляет 10 микрон для стандартных одномодовых волокон и 50...100 микрон для многомодовых. Работы по усложнению структуры световедущей области волокна

предъявляют новые требования (стандарты) к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами и повышенной точностью, что ужесточает требования к уровню обеспечения единства измерений. В первую очередь это относится к точности исходных эталонов, их совершенствованию и созданию новых эталонов.

В этой развивающейся области знаний необходимо опережающее развитие метрологии, поскольку именно уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать развитие соответствующих отраслей, либо служить сдерживающим фактором.

Развитие сверхточных измерений ставит особые задачи перед стандартизацией и метрологией. Законы квантовой физики отличны от законов макромира. Это неизбежно сказывается на применяемых здесь методах и средствах исследований и измерений. Требуются совершенно новые приборы, а порой и сами принципы измерений. Необходима унификация и четкая классификация метрологического оборудования, в частности сканирующих микроскопов. Не исключено также появление новых единиц физических величин для целей измерений в нано- (10^{-9}), пико- (10^{-12}), фемто- (10^{-15}) диапазонах.

Вместе с тем актуальными остаются стандартные методы тестирования затухания излучения оптоволоконных линий для минимизации полных потерь, прогнозирования надежности, срока службы. Потери могут превысить заданное значение на каком-нибудь участке линии, чаще всего из-за избыточного натяжения волокон в кабеле, наличия дефекта в сварном соединении волокон или сильного изгиба волокон в муфте.

Отметим, что основная задача учебного пособия состоит не только в том, чтобы в рамках курса «Методы измерений в волоконной оптике» познакомить студентов политехнического университета с основами знаний стандартизации и метрологии в волоконной оптике, стандартными методами измерения, тестирования и контроля оптических волокон. Оно призвано побудить их к пониманию и развитию умения оценивать погрешности измерений, к знакомству с проблемами нанометрологии.

1. ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. История развития волоконной оптики

Использование света для передачи информации имеет давнюю историю. В VI в. до н.э. в Греции Пифагор сформулировал теорию света, согласно которой прямолинейные видимые лучи испускаются глазом и ощупывают объект, давая зрительное ощущение.

Согласно Эмпедоклу (около 483–423 гг. до н.э.), Афродита (богиня любви) снабдила наши глаза четырьмя элементами, которые, по его мнению, являются сущностью всех вещей (земля, вода, воздух и огонь), и свет огня подобен человеку, использующему фонарь для освещения своего пути в темноте. Зрение – это результате действия глаза на объект: глаза испускают свой собственный свет.

Платон (около 428–427 до 348–347 гг. до н.э.) предполагал, что огонь в глазу испускает свет и этот внутренний свет смешивается с дневным светом, образуя связь между объектами внешнего мира и душой, являясь, таким образом, мостом, благодаря которому мельчайшие движения внешних предметов создают зрительное ощущение. По мнению философа, две формы света – внутренняя и внешняя – смешиваются и действуют как посредник между человеком и темнотой внешнего мира.

Первые попытки механистического подхода к сущности зрения связывают с именем Эвклида, великого александрийского математика, который жил около 300 г. до н.э. В своих сочинениях по оптике он представил четкую геометрическую теорию зрения. Он продолжал верить, что свет исходит из глаза, но в отличие от Эмпедокла и Платона, предполагающих существование смутных светящихся и эфемерных испусканий, рассматривал прямолинейные лучи света как субстанцию, к которой применима математическая дедукция. В своих развернутых математических работах он определил геометрическую форму зрительных лучей и вывел некоторые из законов геометрической оптики, которые известны по сегодняшний день. Он, а также Архимед (около 287–212 гг. до н.э.) и Герон (III или II в. н.э.) разделяли учение Пифагора. Напротив, Демокрит (470–360 гг. до н.э.) и атомисты предполагали, что светящиеся предметы испускают атомы, которые создают образы этих предметов и которые, когда попадают в глаз, создают видение.

Со времен Античности свет использовался для передачи сообщений. В Китае, Египте, и Греции использовали днем дым, а ночью – огонь для передачи сигналов. Среди первых исторических свидетельств

оптической связи мы можем вспомнить осаду Трои. В своей трагедии «Агамемнон» Эсхил дает детальное описание цепочки сигнальных огней на вершинах гор Ида, Антос, Масисто, Египланта и Аракнея, а также на утесах Лемно и Кифара для передачи в Арго вести о захвате Трои ахейцами.

В более поздние античные времена римский император Тиберий, находясь на Капри, использовал световые сигналы для связи с побережьем. На Капри до сих пор можно видеть руины античного Фаро (свет) вблизи виллы императора Тиберия на Тиберио Маунт.

В Северной Америке одна из первых оптических систем связи была установлена около 300 лет назад в колонии Новая Франция (ныне провинция Квебек в Канаде). Региональное правительство, опасаясь нападения английского флота, установило ряд позиций для сигнальных огней во многих деревнях вдоль реки Святого Лаврентия. В этой цепи, которая начиналась с Иль Верте, на расстоянии около 200 км от Квебека, ниже по течению, было не менее 13 пунктов. С начала 1700-х гг. в каждой из этих деревень каждую ночь периода навигации был караульный, задачей которого было наблюдать за сигналом, посылаемым из деревни ниже по течению, и передавать его далее. С помощью такой системы сообщение о британской атаке в 1759 г. достигло Квебека вовремя.

В 1790 г. французский инженер Клод Шапп изобрел семафоры (оптический телеграф), располагаемые на башнях, установленных в пределах видимости одна от другой, что позволяло посылать сообщения от одной к другой. Моряки применяли сигнальные лампы для передачи информации с помощью кода Морзе, а маяки в течение многих веков предупреждали мореплавателей об опасностях.

Клауд Чапп в 90-х гг. XVIII в. построил оптический телеграф во Франции. Сигнальщики размещались на вышках, расположенных от Парижа до Лилля по цепочке длиной 230 км. Сообщение передавалось из одного конца в другой за 15 минут. В США оптический телеграф соединял Бостон с островом Марта Вайнъярд, расположенным недалеко от этого города. Все эти системы со временем были заменены электрическими телеграфами.

Английский физик Джон Тиндалл в 1870 г. продемонстрировал возможность управления светом на основе внутренних отражений. На собрании Королевского общества было показано, что свет, распространяющийся в струе очищенной воды, может огибать любой угол. В эксперименте вода протекала над горизонтальным дном одного желоба и падала по параболической траектории в другой желоб. Свет попадал

в струю воды через прозрачное окно на дне первого желоба. Когда Тиндалл направлял свет по касательной к струе, аудитория могла наблюдать зигзагообразное распространение света внутри изогнутой части струи. Аналогичное зигзагообразное распространение света происходит и в оптическом волокне.

Десятилетием позднее Александр Грэхем Белл запатентовал фотофон, в котором направленный свет использовался для передачи голоса (рис. 1.1). В этом устройстве с помощью системы линз и зеркал свет направлялся на плоское зеркало, закрепленное на рупоре. Под воздействием звука зеркало колебалось, что приводило к модуляции отраженного света. В приемном устройстве использовался детектор на основе селена, электрическое сопротивление которого меняется в зависимости от интенсивности падающего света. Модулированный голосом солнечный свет, падающий на образец селена, изменял силу тока, протекающего через контур приемного устройства, и воспроизводил голос. Фотофон позволял передавать речевой сигнал на расстояние более 200 м.

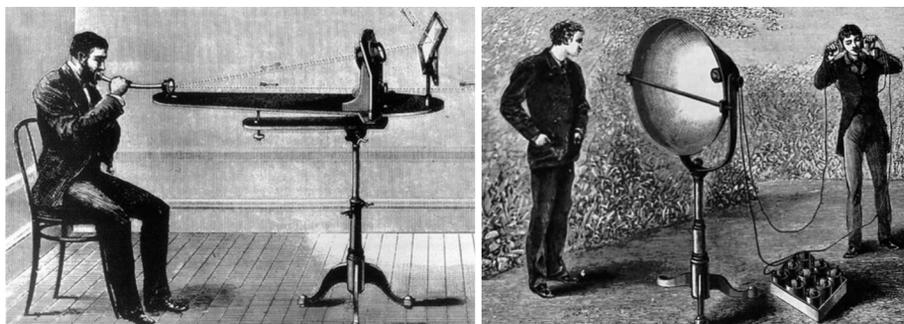


Рис. 1.1. Фотофон Александра Белла

В начале XX в. были проведены теоретические и экспериментальные исследования диэлектрических волноводов, в том числе гибких стеклянных стержней. В 1927 г. инженер Берд (Baird) предложил использовать непокрытые волокна при передаче изображений в телевидении. В 1934 г. инженер фирмы AT&T Норман Френч (Norman French) впервые запатентовал идею передачи сигналов связи по тонкому стеклянному волокну. В то время не было доступных прозрачных материалов с достаточно низким ослаблением, чтобы технология оказалась осуществимой.

В 50-е гг. Брайен О'Бриен из Американской оптической компании и Нариндер Капани с коллегами в Императорского научно-технологического колледжа в Лондоне разработали волокна, предназначенные для пе-

редачи изображения. Эти волокна нашли применение в световодах, используемых в медицине для визуального наблюдения внутренних органов человека. Доктор Капани был первым, кто разработал стеклянные волокна в стеклянной оболочке и ввел термин «волоконная оптика» (1956).

В 1957 г. Гордон Голд, выпускник Колумбийского университета, сформулировал принципы работы лазера как интенсивного источника света. Теоретические работы Чарльза Таунса совместно с Артуром Шавловым в Bell Laboratories способствовали популяризации идеи лазера в научных кругах и вызвали бурный всплеск экспериментальных исследований, направленных на создание работающего лазера. В 1960 г. Т. Мэймен в Hughes Laboratories создал первый в мире рубиновый лазер. В этом же году Ч. Таунс продемонстрировал работу гелий-неонового лазера. В СССР оптические квантовые генераторы света разрабатывали А. М. Прохоров и Н. Г. Басов. Разработка оптических квантовых генераторов (ОКГ) – лазеров (аббревиатура из первых букв английского названия этих устройств – Light Amplification by the Stimulation Emission of Radiation) А. М. Прохоровым, Н. Г. Басовым и Ч. Таунсом была отмечена Нобелевской премией по физике.

Изобретение лазера стимулировало возросший интерес к оптической связи в открытой атмосфере и космосе. Возможности лазерного излучения для передачи информации в 10 000 раз превышают возможности радиочастотного излучения. С 1962 г. началось серийное производство ОКГ (так в СССР назывались эти приборы до начала 70-х гг.), а в 1965 г. в Московскую городскую телефонную сеть была включена одна из первых в мире оптическая линия связи протяженностью 4,7 км между одним из центральных узлов связи (Зубовская площадь) и зданием МГУ им. М. В. Ломоносова. По этой линии с помощью лазерного луча с длиной волны 0,632 мкм (красный свет), распространявшегося в атмосфере (по воздуху), передавались 12 телефонных каналов. По существу, это была первая оптическая соединительная линия городской телефонной сети. К началу семидесятых годов в Советском Союзе работало несколько лазерных атмосферных линий связи: две в Москве – протяженностью 5 км (скорость передачи 32 Мбит/с), а также в г. Куйбышеве (ныне Самара) через р. Волгу, в г. Клайпеде через Куршскую косу, Ереван–Бюракан (28 км).

Однако на открытом воздухе лазерное излучение оказалось не вполне пригодным для передачи сигнала. На работу такого рода линий существенно влияют туман, смог и дождь, равно как и состояние атмосферы. Ла-

зерному лучу гораздо проще преодолеть расстояние между Землей и Луной, чем между противоположными границами большого города. Таким образом, первоначально лазер представлял собой коммуникационный световой источник, не имеющий подходящей среды передачи.

Понимание того, что свет могут проводить тонкие стеклянные волокна за счет полного внутреннего отражения, было старой идеей, известной с XIX в. благодаря английскому физику Джону Тиндалю (1820–1893). Однако в 1960-х гг. даже лучшие стекла обладали большим ослаблением света, пропускаемого через волокно, что сильно ограничивало длину распространения. В то время типичным значением ослабления был один децибел на метр, означающий, что после прохода 1 м пропущенная мощность уменьшается до 80%. Поэтому было возможно лишь распространение света по волокну длиной несколько десятков метров, а единственным применением была медицина, например эндоскопы.

В 1966 г. Чарльз Као и Джордж Хокхэм, работавшие в английской лаборатории телекоммуникационных стандартов, опубликовали фундаментальную работу, в которой показали, что если в плавленом кварце тщательно устранить примеси, а волокно окружить оболочкой с меньшим показателем преломления, то можно добиться уменьшения ослабления до 20 дБ/км. Это означает, что при прохождении длины 1 км мощность пучка ослабляется до одной сотой входной мощности. Хотя это и очень малое значение, оно приемлемо для ряда применений. За этот результат китайский ученый Ч. Као (рис. 1.2) позднее, в 2009 г., получил Нобелевскую премию по физике.



Рис. 1.2. Чарльз Као за измерениями в европейской лаборатории

Как часто бывает в таких случаях, в Великобритании, Японии и США начались интенсивные исследования с целью получить волокна с улучшенными характеристиками. Первый успех был достигнут в 1970 г. Дональдом Кеком, Робертом Маурэром, Петером Шульцем (рис. 1.3) из компании «Корнинг Глас». Они изготовили волокна, которые имели потери 20 дБ/км на длине волны 6328 Å (длина волны He-Ne-лазера). В том же году И. Хаяши с сотрудниками сообщили о лазерном диоде, работающем при комнатной температуре.

Появилась практическая возможность связи с помощью волокон телефонных станций в крупных городах. Тогда для этого использовались кабели, а информация передавалась в цифровом виде, путем кодирования ее серией импульсов. Волокна с их способностью передавать огромное количество информации представлялись идеальной заменой электрических кабелей. Офисы и телефонные станции в больших городах расположены на расстоянии нескольких километров друг от друга, и проблемы связи между ними не было, даже при использовании волокон с относительно большими потерями.

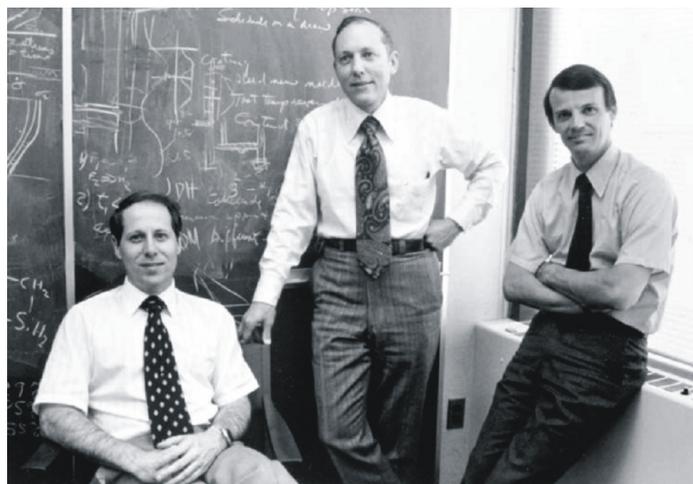


Рис. 1.3. Разработчики первого волоконного световода с низкими потерями Дональд Кек, Роберт Маурэр, Петер Шульц

Первый такой опыт был осуществлен в середине 1976 г. в Атланта с оптическими волоконными кабелями, помещаемыми в трубы обычных кабелей. Первоначальный успех этих попыток привел к созданию системы, которая связала две телефонные станции в Чикаго. На основе этих первых результатов осенью 1977 г. в Bell Labs было решено разработать оптическую систему для широкого пользования. В 1983 г. связь была

установлена между Вашингтоном и Бостоном. Эта система связи работала со скоростью передачи 90 Мбит/с. В ней использовалось волокно на длине волны 0,825 мкм.

В СССР те же результаты получали с отставанием на один-три года. К 1975–1976 гг. потери были снижены до нескольких децибел на километр. А в 1977 г. были получены предельные для используемой технологии потери в 0,20 дБ/км. Это очень маленькая величина, она определяется фундаментальными механизмами оптических потерь в стеклах. Суммарное поглощение складывается из электронного ультрафиолетового поглощения, инфракрасного поглощения, связанного с колебаниями атомов и, наконец, из рэлеевского рассеяния на неоднородностях меньше длины волны излучения. Все эти потери являются неотъемлемыми свойствами материала. Уровень оптических потерь достиг фундаментального предела – 0,16 дБ/км на длине волны 1,55 мкм (рис. 1.4), что соответствует ослаблению света в 2 раза на расстоянии 18 км.

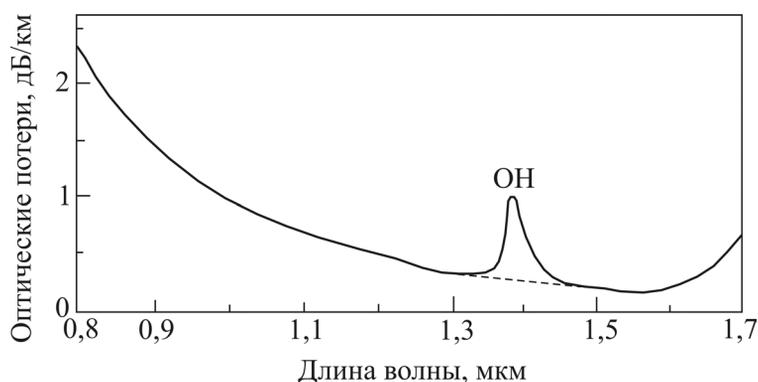


Рис. 1.4. Оптические потери (затухание сигнала) в стеклянных волоконных световодах

Вплоть до 1980-х гг. оптоволоконная технология не могла развиваться до такой степени, чтобы стать коммерчески ценным продуктом для нужд связи. Однако развивающиеся международные стандарты связи предъявляли очень высокие требования к скорости передачи данных. Хотя нужная для них пропускная способность могла быть получена через традиционные кабельные, микроволновые и спутниковые технологии, у последних имелось явное ограничение максимальных скоростей передачи данных. Оптоволоконные системы передачи обеспечили требуемую, огромную, производительность. Началось коммерческое распространение оптоволоконных систем связи.

Не менее крупные достижения отмечены в области полупроводниковых источников и детекторов, соединителей, технологии передач, теории коммуникаций и других, связанных с волоконной оптикой сферах. Все это вместе с огромным интересом к использованию очевидных преимуществ волоконной оптики обусловило в середине и конце 70-х гг. существенное продвижение на пути создания волоконно-оптических систем.

В 1973 г. Военно-морские силы США внедрили волоконно-оптическую линию на корабле Little Rock. В 1976 г. в рамках программы ALOFT военно-воздушных сил кабельная оснастка самолета А-7 была заменена на волоконно-оптическую. При этом кабельная система из 302 медных кабелей, имевшая суммарную протяженность 1260 м и весившая 40 кг, была заменена на 12 волокон общей длиной 76 м и весом 1,7 кг. Военные были первыми и в деле внедрения волоконно-оптической линии. В 1977 г. была запущена двухкилометровая система со скоростью передачи информации 20 Мбит/с, связавшая наземную спутниковую станцию с центром управления.

В 1977 г. компании AT&T и GTE установили коммерческие телефонные системы на основе оптического волокна. Эти системы превзошли по своим характеристикам считавшиеся ранее незыблемыми стандарты производительности, что привело к их бурному распространению в конце 70-х и начале 80-х гг. В 1980 г. AT&T объявила об амбициозном проекте волоконно-оптической системы, связывающей Бостон и Ричмонд. Реализация проекта продемонстрировала скоростные качества новой технологии в серийных высокоскоростных системах, а не только в экспериментальных установках. После этого стало ясно, что в будущем ставку надо делать на волоконно-оптическую технологию, показавшую возможность широкого практического применения. Малое затухание света в оптическом волокне обуславливает возможность применения волоконно-оптической связи на значительных расстояниях без использования усилителей. Волоконно-оптическая связь свободна от электромагнитных помех и весьма труднодоступна для несанкционированного использования – незаметно перехватить сигнал, передаваемый по оптическому кабелю, технически крайне сложно.

Максимальная скорость передачи информации ограничивается явлением дисперсии – эффектом зависимости групповой скорости световых колебаний от длины волны. При прохождении через световод с нулевой дисперсией длительность импульса увеличивается. При этом

спектральные компоненты с одного края спектра отстают, а с другого – опережают центральные, приходя на приемник с разной задержкой распространения. Таким образом, импульс расплывается. При передаче информация кодируется последовательностью импульсов. Чем они короче, тем большее их число (и, следовательно, больше информации) можно передать в единицу времени. Так как импульсы расплываются настолько, что приемник не может их различить, то приходится уменьшать плотность их следования, при этом уменьшается и пропускная способность канала.

Световоды делятся на одно- и многомодовые. Одномодовые световоды поддерживают лишь одно пространственное распределение интенсивности электромагнитной волны – одну моду. В многомодовых световодах существует межмодовая дисперсия, также приводящая к расплыванию импульса и ограничивающая скорость передачи информации. Поэтому многомодовые волокна применяются в основном для передачи мощности или для связи, но на короткие расстояния. Хотя многомодовые световоды и обладают сильной межмодовой дисперсией, производить их и работать с ними намного легче, чем с одномодовыми, так как диаметр сердцевины у них гораздо больше, около 50–100 мкм, по сравнению с одномодовыми (10 мкм).

В 1970 г. сотрудниками Ленинградского физико-технического института под руководством Ж. И. Алферова были разработаны полупроводниковые приборы на основе двойных гетероструктур, в том числе полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. С этого момента началось быстрое развитие волоконно-оптических систем передачи информации. К середине 70-х гг. в СССР, США, Японии, Англии, Франции и Германии были построены первые коммерческие волоконно-оптические системы со скоростями передачи 2, 048, 8,848 и 34 Мбит/с.

Потребность в дальнейшем наращивании пропускной способности систем передачи информации стимулировала исследования в направлении поиска новых методов решения этой задачи. Одним из эффективных решений поставленной задачи является увеличение пропускной способности с помощью уплотнения оптических каналов по длинам волн оптического излучения – WDM (Wavelength Division Multiplexing). Использование уплотнения оптических каналов (мультиплексирования) позволило повысить пропускную способность волоконно-оптических систем до величин диапазона Гига- (10^9), Тера- (10^{12}) и даже более бит/с

(рис. 1.5). Для реализации этого метода были разработаны такие оптические элементы, как оптические мультиплексоры и демультиплексоры, оптические фильтры, полупроводниковые лазеры с малой шириной линии излучения на заданной длине волны, методы и средства, обеспечивающие необходимую стабильность оптической частоты, оптические усилители с широкой полосой усиления и ряд других элементов.

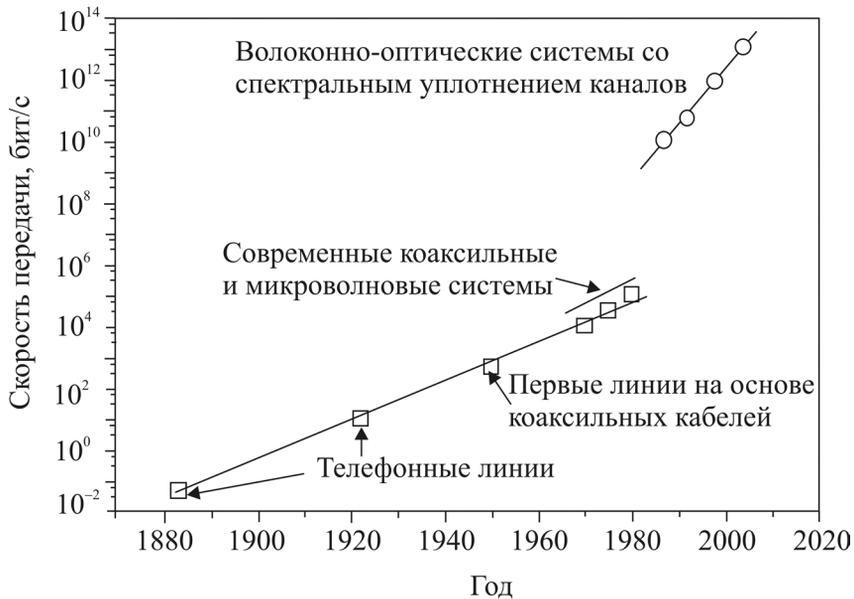


Рис. 1.5. Увеличение скорости передачи информации

На рубеже 80-х гг. в связи с разработкой одномодового оптического волокна и полупроводникового лазера с узкой линией генерации появляются когерентные оптические системы связи, обеспечивающие передачу информации со скоростью 8... 10 Гбит/с. Применяются спектральное уплотнение каналов, перспективные способы частотной и фазовой модуляции света, увеличивающие скорость и дальность передачи информации.

В 1988 г. начало действовать первое поколение трансатлантических кабелей на оптических волокнах. Они работают на длине волны 1,3 мкм и связывают Европу, Северную Америку и Восточную часть Тихого океана. В 1991 г. началось установление второго поколения волоконно-оптической связи, которая работает на 1,3 мкм и связывает США и Канаду с Великобританией, Францией и Испанией. Другая линия работает между США и Канадой и Японией.

В мире имеется ряд других волоконно-оптических линий. Для примера, оптическая подводная линия между Англией и Японией покрывает 27 300 км в Атлантическом океане, Средиземном море, Красном море, Индийском океане, Тихом океане и имеет 120000 промежуточных усилителей на пару волокон. Для сравнения, первый трансатлантический телефонный кабель в 1956 г. использовал 36 преобразователей, а первый оптический кабель, проложенный через Атлантический океан, использовал 80 000.

В 1990 г. Линн Моллинар, сотрудник Bellcore, продемонстрировал возможность передачи сигнала без регенерации со скоростью 2,5 Гбит/с на расстояние около 7500 км. В системе Моллинара лазер работал в солитонном режиме, использовалось самоусиливающее волокно с добавками эрбия. Солитонные (в очень узком диапазоне спектра) импульсы не рассеиваются и сохраняют свою первоначальную форму по мере распространения по волокну. В это же время японской компанией Nippon Telephone & Telegraph была достигнута скорость 20 Гбит/с, правда, на существенно более короткое расстояние. Ценность солитонной технологии заключается в принципиальной возможности прокладки по дну Тихого или Атлантического океана волоконно-оптической телефонной системы, не требующей установки промежуточных усилителей. Однако солитонная технология остается на уровне лабораторных демонстраций и не находит пока коммерческого применения.

Оптический сигнал ослабляется на 10–20 дБ через каждые 50–100 км волоконно-оптического тракта, что требует его восстановления. До начала 1990-х гг. в действующих линиях связи единственным способом компенсации потерь в линии было применение усилителей – сложных устройств, включающих в себя как электронные, так и оптические компоненты. Пропускная способность линии дальней связи с усилителями ограничена возможностями электроники (на сегодняшний день предельная скорость обработки сигналов для электроники порядка 10 Гбит/с).

Радикальным улучшением ситуации является возможность непосредственного усиления оптических сигналов в волокне, т.е. без необходимости первоначального извлечения их из волокон. В 1985–1990 гг. каскад открытий и изобретений нескольких групп ученых привел к появлению технически совершенных промышленных эрбиевых усилителей (Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA). Усилители на волоконном световоде, легированном ионами эрбия (Er-doped fiber), обладают сочетанием уникальных свойств, обеспечившим им быстрое внедрение

в системы дальней связи. Среди этих свойств очевидными являются непосредственное усиление оптических сигналов без их преобразования в электрические сигналы и обратно, низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему передачи.

Поэтому первое же сообщение (1987) об успешных экспериментах научной группы из Университета Саутгемптона (Великобритания) под руководством Д. Пэйна по усилению света в волоконном световоде, легированном ионами эрбия, привлекло пристальное внимание ученых и разработчиков. За короткое время были проведены экспериментальные и теоретические исследования, подтвердившие практическую возможность создания компактного, обладающего хорошими характеристиками чисто оптического усилителя. В 1990 г. были проведены крупные конференции, посвященные исключительно эрбиевым усилителям и их компонентам; на эту тему было опубликовано множество статей, и уже в 1992 г. на рынке появились готовые для применения модули таких усилителей. Существенный вклад наряду с группой из Саутгемптона внесла научная группа под руководством Эммануила Десурвира из лаборатории Bell (США). В нашей стране работы в этом направлении велись под руководством Е.М. Дианова в отделе волоконной оптики Института общей физики АН СССР (в настоящее время Научный центр волоконной оптики РАН). Разработка и применение эрбиевых волоконных усилителей привели к революционным изменениям в линиях дальней связи. Быстрый рост информационной емкости волоконно-оптических линий связи, основанных на новых технологиях, способствовал возникновению телекоммуникационного бума и росту инвестиций в эту область в конце 1990-х гг.

Усиление импульса света происходит в отрезке активного волокна, в который при помощи оптического ответвителя направляется излучение накачки. Накачка, поглощаясь, создает инверсию активной среды (ионы редкоземельных элементов, поглощая фотон накачки, переходят из основного состояния в возбужденное). При распространении по активному световоду оптический сигнал усиливается за счет явления вынужденного излучения – ионы редкоземельных элементов, переходя обратно из возбужденного состояния в основное, излучают фотон, идентичный фотону сигнала, тем самым увеличивая мощность сигнала. Мощности оптоволоконных лазеров, которые находят все более широкое применение не только при передаче информации, непрерывно возрастают, достигая в настоящее время 50 кВт. Энергетическая эффективность, определяемая отношением изменения мощности сигнала к мощности накачки, на длине волны 1480 нм достигает 86 %.

Проводятся интенсивные исследования волокон нового типа – микроструктурированных волокон и фотонных кристаллов, на основе которых прогнозируется создание новых типов оптических элементов. С помощью такого подхода исключаются промежуточные электронные усилители при передаче оптического сигнала.

На сегодняшний день значительные успехи оптических технологий обеспечивают такие услуги связи, как Ethernet, E-mail, IP-телефония, широкополосный доступ в Internet и телефакс. Такое развитие событий стало возможным благодаря широкому практическому использованию достижений фундаментальных наук – прежде всего физики, химии и математики, а также компьютерных технологий. Создание элементной базы современных волоконно-оптических систем передачи информации основано на практическом применении таких открытий в области физики и таких разделов математики, которые еще совсем недавно считались делом самых высших кругов «чистой науки», на практическое использование которых не надеялась не только широкая общественность, но и сами авторы этих открытий. К созданию современных телекоммуникационных систем и компьютерных технологий причастны почти все известные физики прошлого и настоящего: от Ньютона и Гюйгенса, Френеля и Декарта до большинства нобелевских лауреатов по физике – от М. Планка и А. Эйнштейна до А. М. Прохорова, Ч. Таунса, Н. Г. Басова и Ж. И. Алферова. В профессиональный лексикон специалистов, работающих в области волоконно-оптической связи, входят такие термины, как кванты, электроны, фотоны, фононы и многие другие, которые ранее в своей деятельности употребляли только профессиональные физики. Современные волоконно-оптические системы передачи – это концентратор практического использования самых глубинных достижений фундаментальных наук, яркая демонстрация их практической необходимости и полезности.

Применение света и оптических волокон оказалось очень эффективным не только в передаче информации, но и в медицине, в технологии обработки материалов, в бесконтактных измерительных системах. Последние используются для измерений размеров предметов или их перемещения, для измерения и контроля вибраций, измерения скорости, контроля состояния поверхности и других характеристик. Для этого удобно использовать лазерные диоды, свет которых можно коллимировать и фокусировать на исследуемый объект. Принципиальным преимуществом бесконтактных измерений является полное отсутствие воздействия на объект и высокая скорость измерений, которая в некоторых случаях может превышать 25000 измерений в секунду.

Оптический профилометр, работа которого основана на использовании информации отраженного света, позволяет измерять смещения с точностью до нескольких ангстрем ($1\text{ \AA}=10^{-10}\text{ м}$), без прямого контакта с любой механической частью. Этот принцип важен для устройств компакт-дисков.

Совершенно другое применение у волоконного оптического гироскопа (ВОГ), способного измерять очень малые вращения. Первые такие гироскопы были сделаны в 1963 г. и стали развиваться с 1965 г. Принцип действия был установлен французским физиком Жоржем Саньяком (1869–1928), который в 1913 г. отметил, что пучки света, распространяющиеся в противоположных направлениях по замкнутому кольцу, можно использовать для измерения вращения этого кольца. В самом деле, если точка, из которой пучки начинают свое распространение, движется по кольцу, то эти пучки должны проходить разные пути вдоль кольца до точки возврата. Этот факт легко установить с помощью интерферометра. В 1965 г. были построены гироскопы, способные обнаружить скорость вращения менее 5° за час. Подобные гироскопы устанавливаются на самолетах, ракетах и других объектах для их точного позиционирования и обеспечения работы систем высокоточного наведения.

Волоконная оптика, пройдя незначительный период своего развития, становится новой технологией, влияющей на жизнь каждого человека. Достоинствами оптических волокон являются:

1) широкая полоса пропускания, обусловленная высокой частотой оптической несущей – около 10^{14} Гц, которая обеспечивает возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько Тбит/с;

2) малое затухание светового сигнала в волокне. Выпускаемое в настоящее время отечественное и зарубежное оптическое волокно имеет затухание 0,2 дБ/км на длине волны 1,55 мкм. Это позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью более 100 км;

3) высокая помехозащищенность. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к окружающим электромагнитным помехам, индуцирующим электромагнитное излучение; не возникает проблем перекрестного влияния в многоволоконных оптических кабелях;

4) малый вес и объём. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объём по сравнению с медными кабелями в расчёте на одну и ту же пропускную способность. Например, 900-парный телефон-

ный кабель диаметром 7,5 см на металлической основе может быть заменён одним волокном с диаметром 1 мм;

5) высокая защищённость от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приёма-передачи. Эффективны системы мониторинга (непрерывного контроля) объектов с использованием волоконно-оптических датчиков.

1.2. Основные характеристики в волоконной оптике

1.2.1. Устройство оптического волокна

Оптическое волокно (световод) имеет два concentрических слоя – сердцевина и оптическая оболочка (рис. 1.6). Внутренняя сердцевина предназначена для переноса света. Окружающая его оболочка имеет отличный от сердцевины показатель преломления и обеспечивает полное внутреннее отражение света в сердцевину.

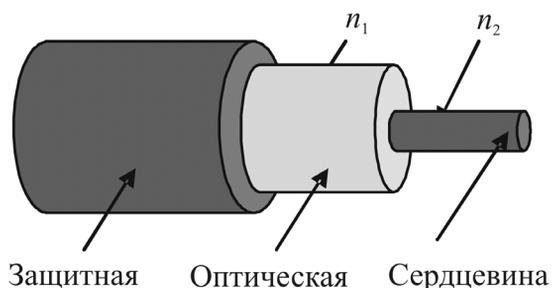


Рис. 1.6. Структура световода

Показатель преломления оптической оболочки немного меньше, чем показатель преломления сердцевины ($n_2 < n_1$). Производители волокна строго контролируют разность показателей для получения нужных характеристик волокна. Волокна имеют дополнительную защитную оболочку вокруг оптической оболочки. Защитная оболочка, представляющая собой один или несколько слоев полимера, предохраняет ядро и оптическую оболочку от воздействий, которые могут повлиять на их оптические свойства. Защитная оболочка не влияет на процесс распространения света по волокну, а всего лишь предохраняет от ударов.

На рис. 1.7 представлена схема распространения света по волокну. Свет заводится внутрь волокна под углом больше критического к границе «ядро – оптическая оболочка» и испытывает полное внутреннее

отражение на этой границе. Поскольку углы падения и отражения совпадают, то свет и в дальнейшем будет отражаться от границы. Таким образом, луч света будет двигаться зигзагообразно вдоль волокна.

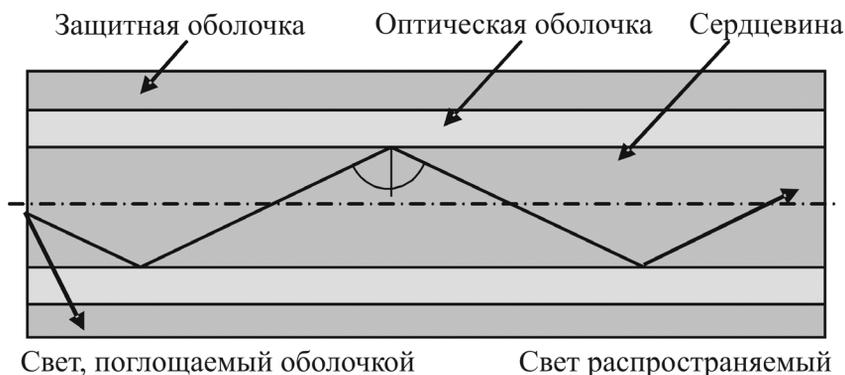


Рис. 1.7. Ход лучей в оптическом волокне

Свет, попадающий на границу под углом меньше критического, будет проникать в оптическую оболочку и затухать по мере распространения в ней. Оптическая оболочка обычно не предназначена для переноса света, и свет в ней достаточно быстро поглощается. Отметим, что в ситуации, представленной на рис. 1.7, свет будет также преломляться на границе воздух–волокно. И только после этого его распространение будет происходить в соответствии с законом преломления Снелла и значениями показателей преломления ядра и оптической оболочки. Внутреннее отражение служит основой для распространения света вдоль обычного оптического волокна. В этом анализе, однако, учитываются только меридианные лучи, проходящие через центральную ось волокна после каждого отражения. Другие лучи, называемые асимметричными, движутся вдоль волокна, не проходя через его центральную ось. Траектория асимметричных лучей представляет собой спираль, накручивающуюся вокруг центральной оси. Асимметричные лучи, как правило, игнорируются в анализе большинства волоконно-оптических процессов. Специфические особенности движения света вдоль волокна зависят от многих факторов, включая размер волокна, состав волокна, процесс инжекции света внутрь волокна.

Понимание взаимного влияния этих факторов проясняет многие аспекты волоконной оптики. Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр. Диаметр ядра для наиболее распространенных видов волокон колеблется от 8 до 100 мкм, а диаметр оптической оболочки –

от 125 до 140 мкм. Для наглядного представления малости этих размеров укажем, что человеческий волос имеет диаметр около 100 микрон. При указании размеров волокна вначале приводится значение диаметра ядра, а затем оптической оболочки: например, 50/125 означает диаметр ядра – 50 мкм и диаметр оптической оболочки – 125 мкм.

1.2.2. Классификация волокон

Оптические волокна могут быть классифицированы двумя способами: во-первых, по материалу, из которого сделано волокно, во-вторых, по показателю преломления в ядре и модовой структуре света.

Стеклянные волокна имеют как стеклянное ядро, так и стеклянную оптическую оболочку. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого сверхпрозрачного диоксида кремния или плавленного кварца. Если морская вода была бы столь прозрачной, как волокно, то можно было бы увидеть дно самой глубокой океанской впадины – Марианской (11 022 м), расположенной в Тихом океане. В стекло добавляют примеси, чтобы получить требуемый показатель преломления. Германий и фосфор, например, увеличивают показатель преломления, а бор и фтор, напротив, уменьшают его. Кроме того, в стекле присутствуют другие примеси, не извлеченные в процессе очистки. Они также влияют на свойства волокна, увеличивая затухание, обусловленное рассеянием и поглощением света.

Характеристики стеклянных волокон с пластиковой оптической оболочкой, хотя и не столь хорошие, как у полностью стеклянного волокна, являются вполне приемлемыми.

Пластиковые волокна имеют пластиковое ядро и пластиковую оптическую оболочку. По сравнению с другими видами пластиковые волокна имеют ограниченные возможности с точки зрения затухания и полосы пропускания. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к величинам затухания и полосе пропускания не столь высоки. Электромагнитная невосприимчивость и секретность передачи информации по пластиковым волокнам делают их применение оправданным. Пластиковые волокна являются достаточно прочными, с малым радиусом изгиба и способностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Этот тип волокон находит применение в автомобилестроении, производстве различной бытовой техники.

В соответствии со второй классификацией на рис. 1.8 показаны три основные особенности волокон.

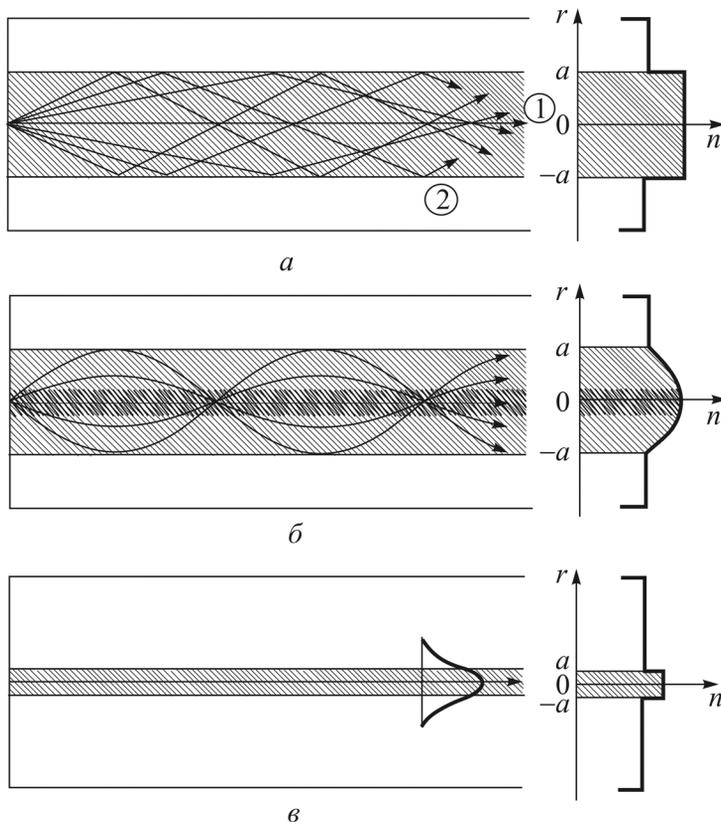


Рис. 1.8. Распространение света: *a* – в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления; *б* – в градиентном световоде; *в* – в одномодовом световоде

Первая особенность – различие входного и выходного импульсов. Уменьшение амплитуды импульса связано с затуханием его мощности. Расширение импульса связано с конечной полосой пропускания волокна и ограниченной информационной емкостью. Вторая особенность – траектории лучей, возникающих при распространении света. Третья особенность – распределение значений показателей преломления в ядре и оптической оболочке для различных типов волокон. Важность каждой из перечисленных особенностей будет ясна после рассмотрения всех видов волокон.

Профиль показателя преломления отображает соотношение между показателями преломления ядра и оптической оболочки. Существуют два основных вида профиля: ступенчатый и сглаженный (градиентный). Волокно со ступенчатым профилем имеет ядро с однородным показателем преломления. При этом показатель преломления испытывает резкий

скачок на границе между ядром и оптической оболочкой. Напротив, в случае сглаженного профиля показатель преломления ядра не является однородным: он максимален в центре, а между ядром и оптической оболочкой отсутствует резкий скачок показателя преломления.

В соответствии с данной классификацией существует три вида оптических волокон:

1) многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления (обычно называемое волокном со ступенчатым профилем);

2) многомодовое волокно со сглаженным профилем (градиентное волокно);

3) одномодовое волокно со ступенчатым профилем (одномодовое волокно).

Характеристики каждого из типов волокон в существенной степени определяются областью применения.

Многомодовое волокно со ступенчатым профилем – наиболее простой тип волокон, обычно имеет сердцевину диаметром от 50 до 970 мкм и может быть чисто стеклянным или пластиковым. Данный тип волокна является наиболее распространенным, хотя и не обеспечивает максимальную полосу пропускания и минимальные потери. Поскольку свет испытывает отражение под разными углами на разных траекториях (в различных модах), длина пути, соответствующая различным модам, тоже отличается. Таким образом, различные лучи затрачивают меньше или больше времени на прохождение одной и той же длины волокна. Лучи, которые движутся вдоль центральной оси ядра без отражений, достигают противоположного конца волокна первыми. Косые лучи появляются позднее. Свет, попадающий в волокно в одно и то же время, достигает противоположного конца в различные моменты времени. Сетевой импульс расплывается по времени. Это расплывание называется модовой дисперсией. Импульс света, который имел первоначально узкий, строго определенный профиль, в дальнейшем расширяется во времени. Дисперсия может быть обусловлена несколькими причинами. Модовая дисперсия возникает в результате различных длин траекторий, соответствующих различным модам волокна. Типичное значение модовой дисперсии для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления составляет от 15 до 30 нс/км. Это означает, что лучи света, попадая в волокно одновременно, достигают противоположного конца волокна длиной в один километр с интервалом от 15 до 30 наносекунд. При этом первыми приходят лучи, движущиеся вдоль центральной оси. Эти интервалы вре-

мени могут показаться не столь уж большими, однако именно модовая дисперсия ограничивает возможную полосу пропускания оптического волокна. Расплывание импульса приводит к перекрыванию крыльев соседних импульсов. Вследствие этого импульсы трудно отличить один от другого, а заключенная в них информация теряется. Уменьшение дисперсии приводит к увеличению полосы пропускания.

Многомодовое градиентное волокно использует сглаженный профиль показателя преломления. Так как свет движется быстрее по среде с меньшим показателем преломления, то чем дальше расположена траектория светового луча от центра, тем быстрее он движется. Каждый слой ядра отражает свет. В отличие от ситуации со ступенчатым профилем показателя преломления, когда свет отражается от резкой границы между ядром и оптической оболочкой, здесь свет постоянно и более плавно испытывает отражение от каждого слоя ядра. При этом его траектория отклоняется к центру и становится похожей на синусоидальную. Лучи, которые проходят более длинные дистанции, делают это большей частью по участкам с меньшим показателем преломления, двигаясь при этом быстрее. Свет, распространяющийся вдоль центральной оси, проходит наименьшую дистанцию, но с минимальной скоростью. В итоге все лучи достигают противоположного конца волокна одновременно. Использование сглаженного профиля показателя преломления приводит к уменьшению дисперсии до 1 нс/км и менее.

Популярные виды данного типа волокон имеют диаметры ядер 50, 62,5 и 85 микрон, а диаметр оптической оболочки 125 микрон. Эти волокна используются там, где требуются широкие полосы пропускания, в частности в передаче телевизионного сигнала, локальных сетях, компьютерах и т. д.

Одномодовое волокно позволяет значительно сократить модовую дисперсию за счет уменьшения ядра до тех пор, пока волокно не станет эффективно передавать только одну моду. Одномодовое волокно имеет чрезвычайно малый диаметр – от 5 до 10 мкм, при этом диаметр оптической оболочки должен быть на порядок больше, чем диаметр сердцевины.

Характеристики одномодовой системы ограничены возможностями электроники, а не волокна. Еще одно преимущество одномодового волокна заключается в том, что оно может быть проложено один раз с тем, чтобы в дальнейшем возможности передающей линии возрастали по мере развития и замены электронных устройств. Это позволяет экономить средства на прокладке новой наиболее современной передающей линии и добиваться увеличения скорости передачи наиболее экономным способом.

Указанные типы волокон могут значительно различаться по качеству и физическим свойствам. Термин «качество» рассматривается в широком смысле: лучшее качество означает более широкую полосу пропускания, большую информационную емкость и низкие потери. Низкая стоимость и безопасность делают привлекательными другие типы волокон.

В соответствии с их качеством волокна могут быть расположены в следующем порядке: одномодовые, градиентные, со ступенчатым профилем, пластиковые.

1.2.3. Характеристики волокон

Дисперсия (разброс, отклонение) – распывание светового импульса по мере его движения по оптическому волокну. Дисперсия приводит к искажению формы и длительности светового импульса и ограничивает ширину полосы пропускания и информационную емкость кабеля. Скорость передачи битов должна быть при этом достаточно низкой, чтобы избежать перекрытия различных импульсов. Чем ниже скорость передачи сигналов, тем реже располагаются импульсы в цепочке и тем большая дисперсия допустима. Существует три вида дисперсии:

- модовая дисперсия;
- молекулярная дисперсия;
- волноводная дисперсия.

Модовая дисперсия свойственна только многомодовым волокнам. Она возникает из-за того, что лучи проходят различные пути и, следовательно, достигают противоположного конца волокна в различные моменты времени. Появление модовой дисперсии обусловлено изменением скорости распространения волны из-за зависимости показателя преломления среды от длины волны. В волокне волна распространяется в двух средах – частично в сердцевине, а частично – в кварцевой оболочке, и для нее показатель преломления принимает некое среднее значение между значением показателя преломления сердцевинки и кварцевой оболочки (рис. 1.9).

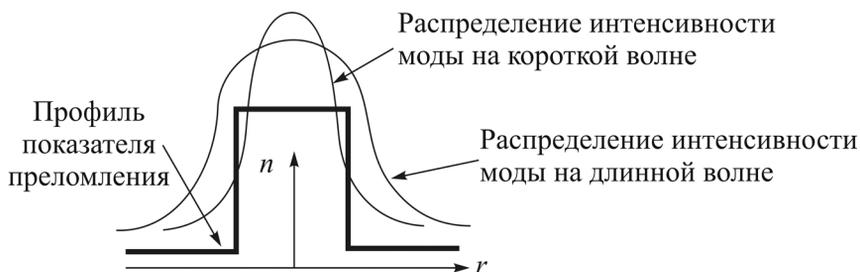


Рис. 1.9. Модовая дисперсия возникает из-за того, что усредненный по диаметру моды показатель преломления изменяется при изменении длины волны

Этот средний показатель преломления может изменяться по двум причинам. Во-первых, из-за того, что показатели преломления сердцевин и кварцевой оболочки примерно одинаково зависят от длины волны. Во-вторых, потому, что при изменении длины волны меняется глубина проникновения поля в кварцевую оболочку и, соответственно, меняется среднее значение показателя преломления. Это чисто межмодовый эффект, и поэтому возникающую из-за него дисперсию называют модовой.

Модовая дисперсия может быть уменьшена тремя способами:

1) использование сердцевин с меньшим диаметром, поддерживающим меньшее количество мод. Сердцевина диаметром 100 мкм поддерживает меньшее число мод, чем ядро в 200 мкм;

2) использование волокна со сглаженным показателем преломления, чтобы световые лучи, прошедшие по более длинным траекториям, двигались со скоростью, превышающей среднюю скорость, и достигали противоположного конца волокна в тот же момент, что и лучи, движущиеся по коротким траекториям;

3) использование одномодового волокна, позволяющего избежать модовой дисперсии.

Материальная дисперсия возникает из-за того, что спектр оптического сигнала имеет конечную ширину и разные спектральные компоненты сигнала движутся в волокне с разной скоростью (рис. 1.10). В результате световой импульс после прохождения через дисперсионную среду уширяется. Это объясняется различными скоростями лучей света с различными длинами волн даже в одной и той же моде. Показатель преломления $n = c/v$, где c – скорость света в вакууме, v – скорость, соответствующая длине волны в веществе.

Поскольку каждая длина волны движется с разной скоростью, то величина скорости v в этом уравнении изменяется для каждой длины волны. Таким образом, показатель преломления изменяется в зависимости от длины волны. Дисперсия, связанная с этим явлением, называется молекулярной дисперсией, поскольку зависит от физических свойств вещества волокна. Уровень дисперсии определяют два фактора:

1) диапазон длин волн света, инжектируемого в волокно. Как правило, источник не может излучать одну длину волны, он излучает несколько. Диапазон длин волн, выраженный в нанометрах, называется спектральной шириной источника. Светодиод характеризуется большей спектральной шириной, чем лазер (около 35 нм для светодиода и от 2 до 3 нм для лазера);

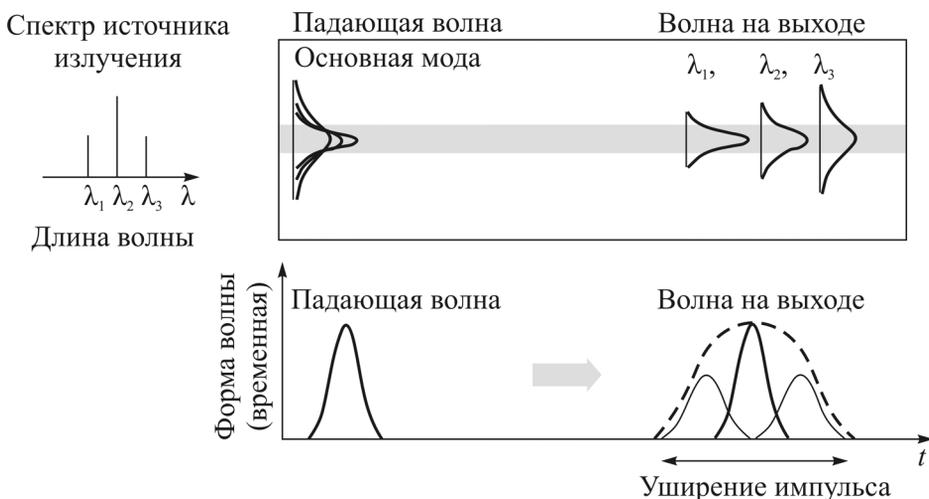


Рис. 1.10. Материальная дисперсия в волокне

2) центральная рабочая длина волны источника. В области 850 нм более длинные волны (красные) движутся быстрее по сравнению с более короткими (голубыми) длинами волн. Волны длиной 860 нм движутся быстрее по стеклянному волокну, чем волны длиной 850 нм. В области 1550 нм ситуация меняется: более короткие волны движутся быстрее по сравнению с более длинными; волна длиной 1560 нм движется медленнее, чем волна длиной 1540 нм. В некоторой точке спектра происходит совпадение, при этом более голубые и более красные длины волн движутся с одной и той же скоростью. Это совпадение скоростей происходит в области 1300 нм, называемой длиной волны с нулевой дисперсией.

Материальная дисперсия является основным видом дисперсии в одномодовых системах. Напротив, в многомодовых системах наиболее существенной является модовая дисперсия, так что материальной дисперсией можно пренебречь. Во многих случаях модовая дисперсия не играет никакой роли при конструировании волоконных систем. Скорости слишком малы или расстояния слишком незначительны.

Диапазон длин волн от 820 до 850 нм часто используется для передачи во многих волоконно-оптических системах. В этом диапазоне длин волн материальная дисперсия равна примерно 0,1 нс/нм ширины спектра.

Волноводная дисперсия (наиболее важный вид дисперсии в одномодовых волокнах) обусловлена тем, что оптическая энергия движется как по ядру, так и по оптической оболочке. А так как они имеют различные показатели преломления, то излучение движется со слегка раз-

личающимися скоростями в ядре и оптической оболочке. Изменение внутренней структуры волокна позволяет существенно влиять на волноводную дисперсию, тем самым изменяя специфицированную общую дисперсию волокна. Это является одним из перспективных направлений разработки одномодовых систем.

Волноводная дисперсия может возникнуть в одномодовом волокне при поляризации света и двулучепреломлении. Она наводится в номинально круглом волокне при его изготовлении из-за неизбежного появления небольшой эллиптичности сердцевинки и внутренних напряжений, не обладающих аксиальной симметрией (рис. 1.11). Поскольку наведенные в волокне напряжения не имеют выделенного направления, величина и азимут двулучепреломления изменяется случайным образом вдоль оси волокна.



Рис. 1.11. Причины возникновения поляризации (двулучепреломления) в оптических волокнах

Представим свет, распространяющийся в одномодовом волокне, в виде суммы двух ортогональных поляризационных мод. Возбужденные быстрая и медленная поляризационные моды распространяются вдоль волокна, не обмениваясь при этом мощностью. Это приводит, как видно из рис. 1.12, к появлению разности фазовых запаздываний поляризационных мод $\Delta\tau$ и, соответственно, к уширению импульсов.

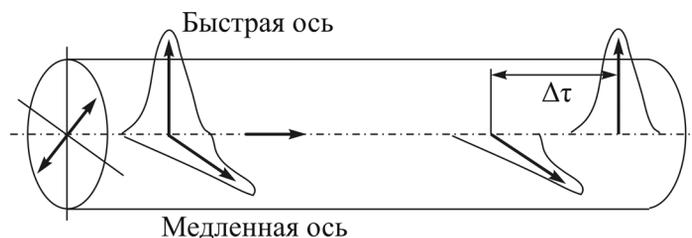


Рис. 1.12. Уширение импульсов в поляризованном волокне

Затуханием (рассеянием, поглощением) называется потеря оптической энергии по мере движения света по волокну. Затухание по длине волокна оценивается в децибелах (дБ/км). Если на входе линии протя-

женностью L мощность сигнала равна P_0 , а на выходе P_1 , затухание α на 1 км длины линии

$$\alpha = (10/L) \lg(P_0/P_1). \quad (1.1)$$

Затухание изменяется от 300 дБ/км для пластикового волокна до примерно 0,21 дБ/км для одномодового волокна.

Затухание зависит от длины волны света. Существуют окна прозрачности, в которых свет распространяется вдоль волокна с малым затуханием. На заре своего развития оптические волокна работали в окне прозрачности от 820 до 850 нм. Второе окно относится к области нулевой дисперсии вблизи 1300 нм, третье окно – в области 1550 нм. Типичное волокно со структурой показателя преломления 50/125 имеет затухание 4 дБ/км при 850 нм и 2,5 дБ/км при 1300 нм, что соответствует увеличению эффективности передачи на 30 %.

Области высокого затухания находятся вблизи 730, 950, 1250 и 1380 нм. Работы в этих диапазонах лучше избегать. Регулирование потерь в волокне может быть достигнуто выбором соответствующей длины волны для передачи.

Снижение потерь в волокне требует, чтобы источник света работал в области длин волн с наименьшим затуханием. Пластиковое волокно лучше всего работает в видимом диапазоне около 650 нм.

Важнейшей особенностью затухания в оптическом волокне является его независимость от частоты модуляций внутри полосы пропускания. В медных кабелях затухание увеличивается с частотой сигнала: чем больше частота, тем больше затухание. В результате частота сигнала ограничивает расстояние, на которое может быть послан сигнал. Для увеличения этого расстояния требуется повторитель, осуществляющий регенерацию сигнала. В оптическом волокне оба эти сигнала будут иметь одинаковое затухание.

Затухание в волокне определяется двумя эффектами: рассеянием и поглощением.

Рассеяние оптической энергии обусловлено неоднородностью волокна и его геометрической структурой. Рассеяние на неоднородностях происходит во всех направлениях, и свет перестает быть направленным.

В прямых волокнах рассеяние происходит на оптических неоднородностях, размеры которых значительно меньше длины волны (рэлеевское рассеяние) и уменьшаются с увеличением длины волны $\sim \lambda^{-4}$, на-

пример, на $\lambda = 1550$ нм потери всегда меньше, чем на $\lambda=1310$ нм. Рэлеевское рассеяние обусловлено вариациями состава и плотности волокна, неизбежными в процессе его производства.

Поскольку интенсивность рассеяния обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени, она быстро уменьшается по мере роста длины волны. Рассеяние определяет минимальный теоретический предел затухания, равный 1,7 дБ/км при 820 нм, 0,26 дБ/км при 1300 нм, 0,13 дБ при 1550 нм/км.

Поглощением называется процесс, при котором материал волокна поглощает оптическую энергию и преобразует ее в тепло. При этом интенсивность распространяющегося излучения падает. Собственное поглощение материалом световода связано с электронным поглощением (поглощение дефектами сетки стекла) и фононным поглощением и на длине волны 1,55 мкм мало и не превышает 0,03 дБ/км. Отдельно рассматривают поглощение света гидроксильными молекулами, возникающими при недостаточной осушке стекла, из которого изготавливают световод.

Поглощение может быть вызвано также загрязняющими примесями, такими как ионы железа, меди, кобальта, ванадия и хрома. Чтобы снизить потери, производители волокна должны поддерживать концентрацию этих ионов на уровне одной миллиардной. Современная технология производства волокна позволяет добиваться этого в контролируемых условиях особо чистого окружения.

Микроизгибные потери. Этот вид затухания связан с небольшими вариациями профиля границы ядро–оптическая оболочка. Данные вариации границы могут приводить к отражению мод высокого порядка под углами, не допускающими дальнейших отражений. При этом свет покидает волокно.

Микронеоднородности границы могут возникнуть при производстве волокна. Развитие технологий производства направлено на уменьшение этих микронеоднородностей.

Спектры потерь в изогнутых и прямых волокнах могут существенно различаться. В прямых волокнах потери ограничиваются в основном рэлеевским рассеянием и уменьшаются с увеличением длины волны. В то же время в изогнутых волокнах потери могут, наоборот, увеличиваться с увеличением длины волны. Изгибы световода, как и различные неровности границы раздела, приводят к выходу излучающей моды за его пределы.

Потери при изгибании волокна возникают по двум причинам. Во-первых, потери возникают в месте соединения прямого и изогнутого волокна. Обусловлены они тем, что в изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некую величину d , зависящую от радиуса изгиба волокна (рис. 1.13). В результате модовые пятна прямого и изогнутого волокна в месте их соединения оказываются смещенными относительно друг друга также на величину d . Поэтому только часть мощности моды «прямого» волокна (диаметром w) передается моде изогнутого волокна, а остальная мощность преобразуется в оболочечные моды и теряется.

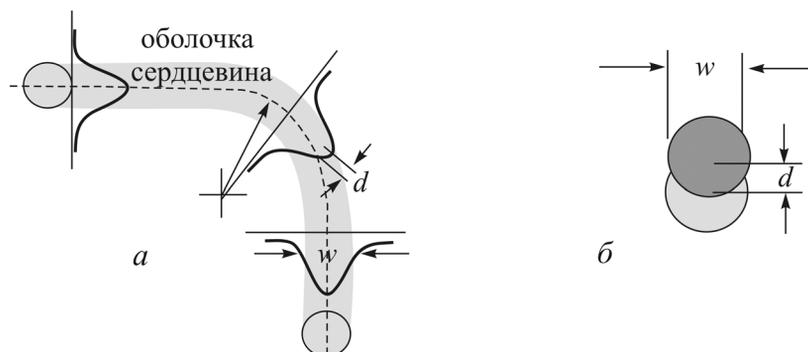


Рис. 1.13. Схема, поясняющая причину возникновения потерь в месте соединения прямого и изогнутого волокна: *а* – в изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на величину d ; *б* – в месте соединения «прямого» и изогнутого волокна их модовые пятна смещены относительно друг друга на величину d

Во-вторых, мощность теряется и непосредственно в изогнутом волокне. Происходит это из-за того, что в изогнутом волокне периферийная часть моды распространяется со скоростью больше скорости света в среде (в оболочке). Эта часть моды излучается в оболочку волокна и в конечном счете теряется (рис. 1.14). Величина этих потерь тем больше, чем больше число витков волокна и чем меньше радиус изгиба волокна.

Числовой апертурой (Numeric aperture – NA) называется способность волокна собирать лучи. Только лучи, которые инжектируются в волокно под углом больше критического, смогут распространяться вдоль него. Апертура является безразмерной величиной и зависит от свойств материалов волокна и определяется показателями преломления ядра и оптической оболочки.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} . \quad (1.2)$$

Также можно определить величину углов, при которых свет распространяется вдоль волокна. Эти углы образуют конус, называемый входным конусом, угловой растр которого определяет максимальный угол ввода света в волокно. Входной конус связан с NA :

$$\theta = \arcsin(NA), \quad (1.3)$$

$$NA = \sin\theta,$$

где θ – половина угла ввода (рис. 1.15).

NA волокна является важной характеристикой, так как она указывает на то, как свет вводится в волокно и распространяется по нему. Волокно с большим значением NA хорошо принимает свет, в то время как в волокно с малым значением NA можно ввести только узконаправленный пучок света.

Как правило, волокна с широкой полосой пропускания имеют малые значения NA . Таким образом, они допускают существование малого числа мод, означающее малую дисперсию и более широкую рабочую полосу. Значения NA изменяются от 0,5 в пластиковом волокне до 0,2 в волокне со сглаженным профилем показателя преломления. Большое значение NA подразумевает большую модовую дисперсию и, как следствие, большее количество возможных световых траекторий.

Свет в одномодовом волокне не испытывает отражения или преломления, он не распространяется под углом к границе волокна. Аналогично в случае одномодового волокна свет не заводится под углами внутри входного конуса до полного внутреннего отражения. Таким образом, в одномодовом волокне NA может быть определена чисто формально, особенного значения для практики она не имеет.

Источники и приемник также имеют свои апертуры. NA источника определяет угловую апертуру выходного света. NA детектора определяет рабочий диапазон углов для приемника. Для источника особенно

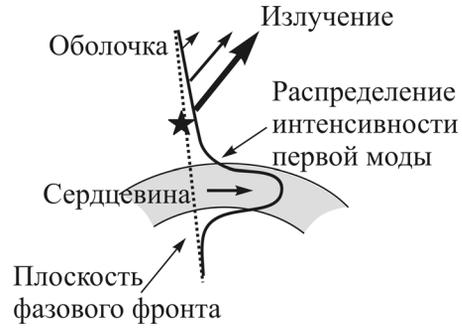


Рис. 1.14. Схема, поясняющая возникновение потерь в изогнутом волокне. Звездой обозначена точка, где скорость распространения фазового фронта превышает скорость света в среде

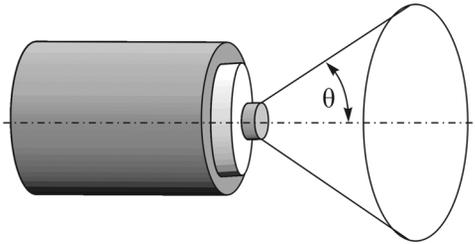


Рис. 1.15. Числовая апертура

важно иметь NA , согласованную с NA волокна, чтоб весь свет, излучаемый источником, проникал в волокно и распространялся по нему. Рас- согласование апертуры приводит к дополнительным потерям при передаче света.

Мода представляет собой математическое и физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде. В математической формулировке модовая теория возникает из уравнений Максвелла. Джеймс Клерк Максвелл, шотландский физик прошлого века, первым получил математическое выражение для соотношения между электрической и магнитной энергией. Он показал, что они являются лишь различными формами одного вида электромагнитной энергии, а не различными видами энергии, как полагали ранее. Из его уравнений также следует, что распространение этого вида излучения подчиняется строгим правилам. Уравнения Максвелла являются основой электромагнитной теории.

Мода представляет собой возможное решение уравнений Максвелла. Под модой можно понимать вид траектории, вдоль которой может распространяться свет. Число мод, допускаемых волокном, колеблется от 1 до 100000. Таким образом, волокно позволяет свету распространяться по множеству траекторий, число которых зависит от размера и свойств волокна.

Влияние ионизирующего излучения. Радиационная прочность определяет способность оборудования противостоять ядерным эффектам. Волокна в отличие от проводников не накапливают статические заряды под воздействием радиации.

Волокна противостоят росту затухания в условиях постоянного радиоактивного облучения высокой интенсивности. Радиационное облучение усиливает поглощение на неоднородностях волокна. Рост затухания зависит от величины накопленной дозы и интенсивности облучения.

Механическая прочность и срок службы оптических волокон. Физико-механические свойства оптоволокон довольно существенно отличаются от свойств исходного материала, из которого они изготавливаются. Особенно это относится к механической прочности, которая у оптоволокон больше, чем у исходного стекла. Стекло принято считать хрупким. Оконное стекло действительно не гнется. Однако стеклянные волокна можно согнуть в виде окружности небольшого диаметра или завязать в свободный узел. Предел прочности характеризует способность волокна или провода противостоять натяжению или изгибу без

повреждения. Так, если предел прочности при растяжении для стекла составляет $(3,9 \dots 9,8) \cdot 10^7$ Па, то оптоволокно диаметром $3 \dots 9$ мкм, изготовленное из того же стекла, имеет этот предел $(1,47 \dots 1,9) \cdot 10^9$ Па.

Предел прочности волокна на разрыв превосходит ту же величину для стальной нити идентичного размера. Более того, медный проводник должен иметь вдвое больший диаметр, чтобы обеспечить тот же предел прочности, что и волокно.

Основная причина, обуславливающая хрупкость волокна, – наличие микротрещин на поверхности и дефектов внутри волокна. При этом поверхностные трещины более существенны. Поверхностные дефекты могут возрасти под воздействием растягивающей нагрузки, возникающей во время прокладки кабеля. Температурные изменения, механические и химические воздействия, обычное старение также приводит к появлению дефектов.

Важным достоинством волоконно-оптических линий связи является их потенциальная долговечность – изделия из стекла сохраняются столетиями. Для обеспечения долголетней работы необходимы соответствующие условия и главное из них – отсутствие механических напряжений. Дело в том, что срок службы оптических волокон определяется процессом роста в них микроскопических трещин. Центры роста таких трещин всегда присутствуют на поверхности стекла, но не всегда развиваются. Однако если волокно растянуто, то трещина начинает лавинообразно расти и волокно разрывается. Характер зависимости срока службы волокна от его натяжения проиллюстрирован на графике (рис. 1.16), где натяжение выражено в единицах продольного удлинения. Графики построены по типичным данным японской фирмы FUJIKURA для стандартного телекоммуникационного одномодового волокна. Хотя в приведенных оценках не учитывался ряд факторов, таких как микроповреждения волокна или влияние влаги, из графика видно, что незначительное увеличение натяжения волокна может приводить к многократному уменьшению его срока службы. Поэтому надежность волоконно-оптических линий связи невозможно оценить, не имея достоверной информации о натяжении волокна в кабеле. Актуальность такой задачи стимулировала исследования тонких оптических эффектов в волокне, в результате чего возникла бриллюэновская рефлектометрия.

Видно, что срок службы 25 лет, установленный потребителем ВОК, обеспечивается при значении удлинения менее 0,36 %, что определяет допустимую величину локальной механической растягивающей нагрузки в пределах 3 Н.

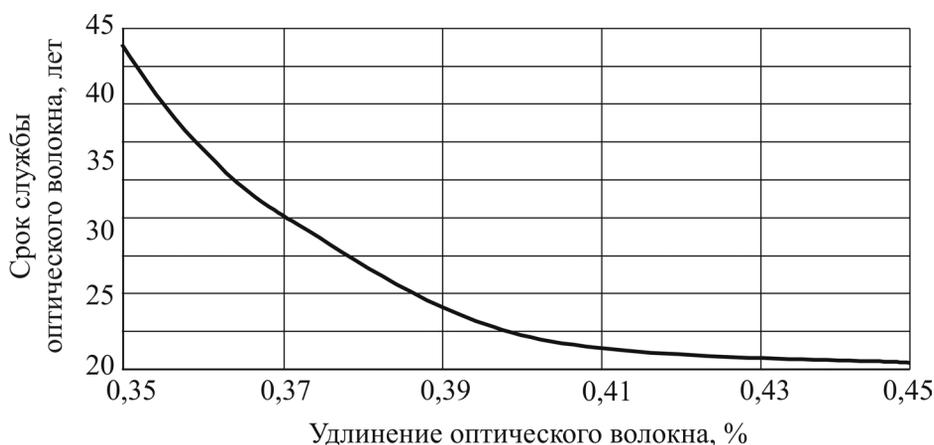


Рис. 1.16. Зависимость срока службы оптического волокна от его удлинения

Значительное влияние на процесс разрушения стекла оказывают физико-химические свойства окружающей среды, в первую очередь наличие паров воды. Защитное покрытие оптического волокна предохраняет волоконный световод от взаимодействия с окружающей средой. Конечно, полимерное покрытие не может полностью исключить проникновение молекул воды к поверхности волоконного световода, оно может только лишь затруднить этот доступ.

Подчеркнем некоторые основные положения параграфа.

- Существует три вида волокон: со ступенчатым и сглаженным профилем показателя преломления и одномодовое.

- Диаметр ядра позволяет грубо оценить качество волокна: чем меньше диаметр, тем шире полоса пропускания и меньше потери.

- Волокна разного качества находят применение в различных областях техники.

- Дисперсия – один из факторов, ограничивающих качество волокна. Для уменьшения дисперсии используют волокна со сглаженным профилем или одномодовые волокна.

- Дисперсия лежит в основе явления расплывания импульса света по мере его распространения вдоль волокна.

- Существует три вида дисперсии: модовая, материальная и волноводная.

- Дисперсия ограничивает ширину полосы пропускания.

- Дисперсия в многомодовом волокне делится на модовую и молекулярную.

- Дисперсия в одномодовом волокне делится на волноводную и материальную.

- Затухание проявляется в потере мощности сигнала.
- Затухание изменяется в зависимости от частоты света.
- Затухание не зависит от скорости распространения сигнала по волокну.

– Числовая апертура определяет собирающую способность волокна, она определяет величину углов, под которыми свет может вводиться и распространяться в волокне.

– Волокна имеют более высокий предел прочности на разрыв по сравнению с медными проводниками.

1.3. Категории оптических волокон

В соответствии со стандартом категории многомодовых волокон подразделяют через параметр g , характеризующий профиль показателя преломления. Нормализованный профиль показателя преломления выражается соотношением

$$\delta(x) = 1 - x^g, \text{ где } \delta(x) = \frac{n(x) - n(1)}{n(0) - n(1)}, \quad (1.4)$$

$n(x)$ – показатель преломления в точке x , $x = r/a$ ($0 \leq r \leq a$), a – радиус сердцевины.

Категория волокна определяется через значение g , наилучшим образом соответствующее нормализованному профилю показателя преломления, входящему в категорию, указанную в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Категории многомодовых волокон

Категория	Материал	Тип	Диапазон
A1	Стеклопластиковая сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно с градиентным показателем преломления	$1 \leq g \leq 3$
A2.1	Стеклопластиковая сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно с квазиступенчатым* показателем преломления	$3 \leq g \leq 10$
A2.2	Стеклопластиковая сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно со ступенчатым* показателем преломления	$10 \leq g \leq \infty$
A3	Стеклопластиковая сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно со ступенчатым* показателем преломления	$10 \leq g \leq \infty$
A4	Полимерное волокно	–	

* В некоторых областях применения g может быть функцией x .

Используемые в настоящее время категории одномодовых волокон представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Категории одномодовых волокон

Категория	Материал	Номинальная длина волны нулевой дисперсии, нм	Номинальная нормируемая длина волны, нм
B1.1	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1300	1300
B1.2	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1300	1550
B2	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1550	1550
B3	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1300 и 1550	1300 и 1550

Эксплуатационные характеристики одномодового волокна зависят не только от конструкции волокна, а от таких основных параметров волокна и системы, как диаметр модового поля, длина волны отсечки, обшая дисперсия.

Для диаметра модового поля существуют два метода определения.

Согласно первому из них диаметр модового поля определяется как ширина участка кривой радиального распределения интенсивности пропускаемого излучения на уровне $1/e$ от максимального значения амплитуды. Для гауссова распределения модового поля указанный диаметр равен ширине кривой распределения амплитуды оптического поля на уровне $1/e$ и ширине кривой распределения оптической мощности (интенсивности) в точке $1/e^2$.

Передаваемая мощность зависит от смещения:

$$T = \left| \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(r, \Theta) \cdot E(r', \Theta') \cdot r dr d\Theta \right|^2, \quad (1.5)$$

где $E(r, \Theta)$ есть нормализованное (при $T = 1$ для $d = 0$) распределение поперечного поля, описанное с помощью цилиндрических полярных координат, и $E(r', \Theta')$ есть это же нормализованное поле с переменной смещения d в установленном направлении Θd .

Во втором из них, методе передаваемых полей, диаметр модового поля ($2W_0$) определяется с помощью следующих величин: $f(r)$ – распределение (квадратный корень из значения интенсивности) ближнего поля; $q = \sin \Theta / \lambda$; Θ – угловая координата в дальнем поле; $F(q)$ – распределение дальнего поля (квадратный корень из значения интенсивности);

$$g(r) = (2/w) \exp(-r^2/w^2); \quad (1.6)$$

$$G(q) = (2/W) \exp(-q^2/W^2); \quad (1.7)$$

$$W = 1/\pi w. \quad (1.8)$$

После измерения $f(r)$ или $F(q)$ можно подобрать $g(r)$ или $G(q)$ для того, чтобы довести до максимума интегралы перекрытия.

$$\frac{\left[\int_0^{\infty} r f(r) g(r) dr \right]^2}{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr \int_0^{\infty} g^2(r) dr} = \frac{\left[\int_0^{\infty} q F(q) G(q) dq \right]^2}{\int_0^{\infty} q G^2(q) dq}. \quad (1.9)$$

Величина w в вычисленной таким образом $g(r)$ (или W в вычисленной $G(q)$), преобразованная в w с помощью уравнения (1.8)), определяется затем как радиус модового поля (w_0), равный половине диаметра модового поля.

Это определение математически эквивалентно минимизации отклонения по методу наименьших квадратов на плоскости, перпендикулярной к оси волокна.

$$\int_0^{\infty} r [f(r) - g(r)]^2 dr = \int_0^{\infty} q [F(q) - G(q)]^2 dq. \quad (1.10)$$

Данное определение диаметра модового поля дает совпадающие результаты в ближнем и дальнем полях и четыре математически эквивалентных способа определения w_0 :

- 1) измерение ближнего поля $f(r)$ и максимизация левой части равенства (1.9) по отношению к функции Гаусса;
- 2) измерение ближнего поля $f(r)$ и минимизация левой части равенства (1.10) по отношению к функции Гаусса;
- 3) измерение дальнего поля $F(q)$ и максимизация правой части равенства (1.9) для получения W ; вычисление w по уравнению (1.8);

4) измерение дальнего поля $F(q)$ и минимизация правой части равенства (1.9) для получения W ; вычисление w по уравнению (1.8).

Следует отметить, что диаметр модового поля определяется для основной моды испытываемого волокна. Для гауссова распределения мощности

$$f(w_0)/f(0) = 1/e, \quad (1.11)$$

а измеренное значение обычно есть не $f(r)$, а $f^2(r)$, которое пропорционально оптической мощности.

Длина волны отсечки представляет собой длину волны, при превышении которой соотношение между общей мощностью, включая излучаемые моды высшего порядка, и мощностью основной моды уменьшается до значения менее заданного, причем моды возбуждаются в основном равномерно. По определению заданное значение выбрано 0,1 дБ для прямого отрезка волокна длиной 2 м, включая одну петлю радиусом 140 мм.

Общая дисперсия есть зависимость параметра распространения от длины волны. Если источник имеет конечную ширину спектральной линии, дисперсия является причиной искажения сигнала. Общая дисперсия возникает в результате дисперсии материала и дисперсии волновода.

1.4. Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные этапы развития передачи информации фотонами.

2. Перечислите достоинства оптических волокон для передачи информации и энергии.

3. Почему на практике применяется волоконный световод, состоящий из сердцевины и оболочки?

4. Что такое «профиль показателя преломления волоконного световода»?

5. Какой волоконный световод (оптическое волокно) называется ступенчатым и какой градиентным?

6. Для чего на оптическое волокно наносят полимерное покрытие?

7. Каковы причины возникновения световых потерь в волоконном световоде и в каких единицах они измеряются?

8. Какой режим работы волоконного световода называется одномодовым и какой многомодовым?

9. Чем определяется число направляемых мод в волоконных световодах?

10. Как определить границы одномодового режима?
11. В каких пределах находятся величины фазовых и групповых скоростей направляемых мод и чем объясняется их зависимость от длины волны излучения?
12. Как проявляется в оптическом волокне молекулярная и модовая дисперсия?
13. В чем состоит технология спектрального уплотнения в волоконно-оптических линиях связи?
14. Как определяется числовая апертура ступенчатого и градиентного волоконного световода? Что характеризует эффективная числовая апертура?
15. Какие материалы используют для изготовления волоконных световодов?
16. Факторы, влияющие на механическую прочность оптического волокна.

2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

Современная стандартизация выполняет следующие функции:

– экономическую. Стандарты обеспечивают заданный уровень качества продукции и услуг, снижение себестоимости, повышение производительности труда, содействие конкуренции, экономия ресурсов, снижение барьеров в торговле;

– социальную. Стандарты обеспечивают нормирование и выполнение на практике требований безопасности, здравоохранения и санитарии, охраны природы;

– коммуникативную. Стандарты обеспечивают единство представления и восприятия, прозрачность и доступность информации, внедрение современных технологий.

С учетом мировых тенденций и в целях совершенствования правовых основ установления и дифференциации обязательных и добровольных требований к продукции, к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также реформирования деятельности в сферах стандартизации, сертификации, аккредитации органов по сертификации и испытательных лабораторий, государственного контроля и надзора был принят Федеральный закон «О техническом регулировании» (далее – ФЗ), вступивший в силу с 1 июля 2003 г.

2.1. Стандартизация как элемент системы технического регулирования

В соответствии с ФЗ стандартизация – деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ или услуг.

Стандарт – документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг. Стандарт также может содержать правила

и методы исследований (испытаний) и измерений, правила отбора образцов, требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке или этикеткам и правилам их нанесения.

Существуют различные типы стандартов. Некоторые из них поддерживают единые методики проведения измерений и определения параметров. Другие позволяют специалистам разрабатывать совместимые или взаимодействующие технологии и продукцию. Развитие деятельности в области волоконной оптики требует разработки и принятия стандартов различных типов.

В международной практике применяются следующие виды стандартов:

основополагающий стандарт, имеющий широкую область распространения или содержащий общие положения для определенной области. Основополагающий стандарт может применяться непосредственно в качестве стандарта или служить основой для других стандартов;

стандарт терминов и определений (терминологический стандарт), распространяющийся на термины, к которым, как правило, даются определения, а в некоторых случаях примечания, иллюстрации, примеры и т. д.;

стандарт методов испытаний, устанавливающий методы испытаний, иногда дополненный другими положениями, касающимися испытаний, как например отбор проб, использование статистических методов и порядок проведения испытаний;

стандарт на продукцию, устанавливающий требования, которым должна удовлетворять продукция или группа продукции, чтобы обеспечить ее соответствие своему назначению;

стандарт на процесс, устанавливающий требования, которым должен удовлетворять процесс, с тем чтобы обеспечить соответствие процесса его назначению;

стандарт на совместимость, устанавливающий требования, касающиеся совместимости продукции или систем в местах их сочленения;

стандарт с открытыми значениями, неидентифицирующий стандарт, содержащий перечень характеристик, для которых должны быть указаны значения или другие данные для конкретизации продукции, процесса или услуги. В некоторых стандартах обычно предусматриваются данные, которые должны быть указаны поставщиками, в других – данные, указываемые покупателями.

Положительные моменты практики использования стандартов представлены на рис. 2.1. В соответствии с двумя последними фактора-

ми применение стандартов позволит развивать деятельность в области волоконной оптики, создать единую терминологическую систему в этой области.

Стандартизация в качестве одного из элементов технического регулирования обеспечивает весомый вклад в экономическое развитие страны.

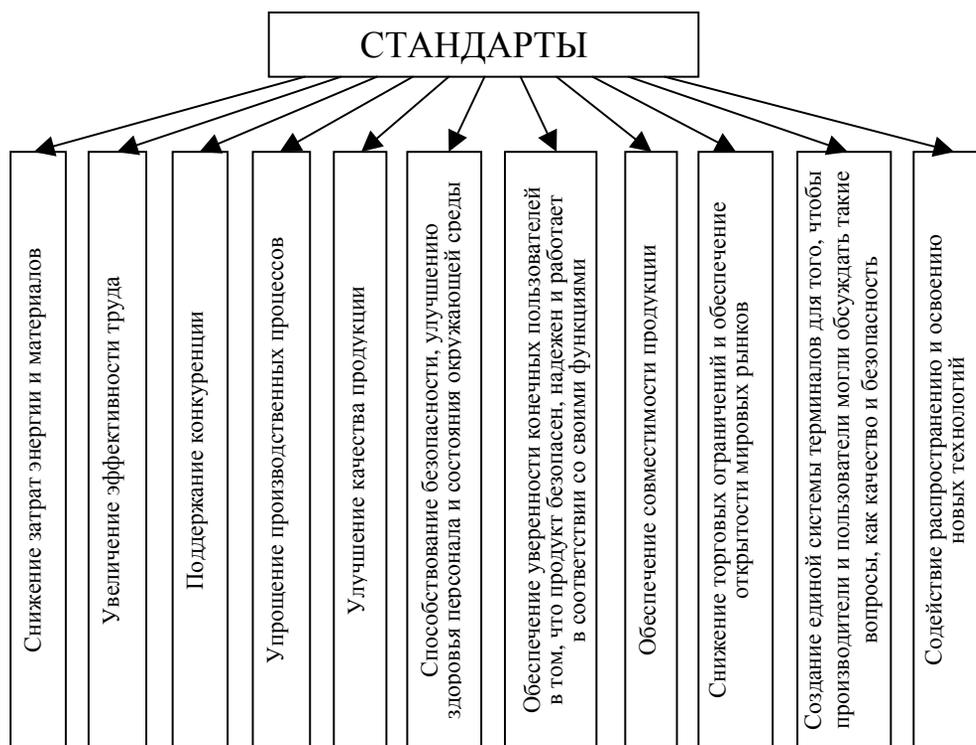


Рис. 2.1. Преимущества использования стандартов

Цели стандартизации (в рамках ФЗ):

– повышение уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества, объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, повышения уровня экологической безопасности, безопасности жизни или здоровья животных и растений;

– обеспечение конкурентоспособности и качества продукции (работ, услуг), единства измерений, рационального использования ресурсов, взаимозаменяемости технических средств (машин и оборудования, их составных частей, комплектующих изделий и материалов), технической

и информационной совместимости, сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений технических и экономико-статистических данных, проведения анализа характеристик продукции, (работ, услуг), исполнения государственных заказов, добровольного подтверждения соответствия продукции (работ, услуг);

- содействие соблюдению требований технических регламентов;
- создание систем классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации, систем каталогизации продукции (работ, услуг), систем обеспечения качества продукции (работ, услуг), систем поиска и передачи данных, содействия проведению работ по унификации.

Стандартизация как наука и как вид деятельности базируется на определенных исходных положениях – принципах. Принципы отражают основные закономерности процесса разработки стандартов, обосновывают ее необходимость в управлении народным хозяйством, определяют условия эффективной реализации и тенденции развития. Согласно ФЗ стандартизация осуществляется в соответствии со следующими **принципами:**

- добровольное применение стандартов;
- максимальный учет при разработке стандартов законных интересов заинтересованных лиц;
- применение международного стандарта как основы разработки национального стандарта, за исключением случаев, если такое применение признано невозможным вследствие несоответствия требований международных стандартов климатическим и географическим особенностям РФ, техническим и (или) технологическим особенностям или по иным основаниям либо если РФ в соответствии с установленными процедурами выступала против принятия международного стандарта или отдельного его положения;
- недопустимость создания препятствий производству и обращению продукции, выполнению работ и оказанию услуг в большей степени, чем это минимально необходимо для выполнения целей стандартизации;
- недопустимость установления таких стандартов, которые противоречат техническим регламентам;
- обеспечение условий для единообразного применения стандартов.

Законом «О техническом регулировании» установлен новый подход к стандартизации, характеризующийся изменением статуса стандартов. Государственные стандарты из основного инструмента государственно-

го технического регулирования трансформируются в российские национальные стандарты – признанные обществом, но добровольные для применения технические правила, которые способствуют соблюдению обязательных требований, устанавливаемых в технических регламентах. В соответствии с ФЗ категории стандартов, а также их статус и порядок их утверждения были изменены. Среди новых нормативных документов нет отраслевых стандартов. Но поскольку они содержат большой объем полезной научно-технической информации и производственного опыта, их целесообразно пересмотреть в качестве национальных стандартов или стандартов организации, частично отменить, но основной массив должен перейти в новый вид документов – своды правил.

Согласно Закону *свод правил* – это документ в области стандартизации, в котором содержатся технические правила и (или) описание процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции и который применяется на добровольной основе.

Переработка отраслевых стандартов в другие категории документов коснется также таких нормативных документов, как СНиП (Строительные нормы и правила), СанНиП (Санитарные нормы и правила), ветеринарные, пожарные и т. п. правила.

Новый документ, впервые появившийся в отечественной практике, это *технический регламент* – законодательный или правительственный акт, который содержит требования в области безопасности. Его введение представляет собой наиболее жесткую форму регулирования со стороны государства. Он применяется в тех случаях, когда другие формы регулирования не обеспечивают безопасности общества и граждан. Технический регламент разрабатывается на группу продукции и устанавливает требования безопасности либо непосредственно, либо путем установления существенных требований, качественно определяющих необходимые уровни безопасности.

ФЗ (ст. 16) предусмотрены этапы разработки и утверждения национальных стандартов. Инновация Закона по отношению к стандартизации – разработка и утверждение Программы разработки национальных стандартов, которые проводит **Национальный орган по стандартизации (НОСт)**. Данная программа должна быть доступна заинтересованным лицам для ознакомления. Учитывая необходимость разработки и принятия стандартов в области волоконной оптики, необходимо включить в Программу стандарты на продукцию и технологии в этой отрасли.

Национальный стандарт применяется на добровольной основе равным образом и в равной мере, независимо от страны и (или) места происхождения продукции, осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг, видов или особенностей сделок и (или) лиц, являющихся изготовителями, исполнителями, продавцами, приобретателями.

В связи с тем что национальные стандарты служат доказательной базой выполнения требований обязательных технических регламентов, Национальным органом по стандартизации до дня вступления в силу технического регламента утверждается, публикуется в печатном издании федерального органа исполнительной власти по техническому регулированию и размещается в информационной системе общего пользования в электронно-цифровой форме *перечень национальных стандартов и (или) сводов правил*, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований принятого технического регламента.

В национальных стандартах и (или) сводах правил могут указываться требования технических регламентов, для соблюдения которых на добровольной основе применяются национальные стандарты и (или) своды правил.

Применение на добровольной основе национальных стандартов и (или) сводов правил является достаточным условием соблюдения требований соответствующих технических регламентов. В случае применения национальных стандартов и (или) сводов правил для соблюдения требований технических регламентов оценка соответствия требованиям технических регламентов может осуществляться на основании подтверждения их соответствия национальным стандартам и (или) сводам правил.

Инструментом, который определен ФЗ «О техническом регулировании» и с помощью которого составляется и реализуется Программа разработки национальных стандартов, являются *технические комитеты (ТК)*. В соответствии со статьей 14 ФЗ ТК по стандартизации в структуру национальной системы стандартизации включаются и им делегируются одни из самых ответственных функций – разработка и экспертиза национальных стандартов.

Для реализации ФЗ «О техническом регулировании» в части стандартизации в 2005 г. начали действовать национальные стандарты комплекса «Стандартизация в Российской Федерации», который заменяет известный комплекс стандартов ГСС РФ – «Государственная система стандартизации Российской Федерации».

Процесс совершенствования нормативного обеспечения методологии стандартизации не завершается с утверждением вышеупомянутых национальных стандартов комплекса «Стандартизация в Российской Федерации» и ПР 50.1.074-2004 «Подготовка проектов национальных стандартов Российской Федерации и проектов изменений к ним к утверждению, регистрации и опубликованию. Внесение поправок в стандарты и подготовка документов для их отмены».

Порядок создания и деятельности технических комитетов по стандартизации утверждается национальным органом по стандартизации.

В соответствии с распоряжением Правительства РФ от 28 февраля 2006 г. № 266-р была принята Концепция развития национальной системы стандартизации, которая представляет собой систему взглядов на проблемы развития национальной системы стандартизации в Российской Федерации до 2010 г. и содержит обоснованные цели, задачи и направления развития национальной системы стандартизации. В рамках вышеуказанной концепции стандартизация в качестве одного из элементов технического регулирования должна внести достойный вклад в экономическое развитие страны, при этом роль и принципы стандартизации в условиях реформирования российской экономики должны быть адекватны происходящим переменам и соответствовать международной практике.

В Концепции нашли отражение основные стратегические и тактические задачи и проблемы, которые приходится решать Национальному органу по стандартизации.

Важное направление деятельности в сфере стандартизации согласно Концепции связано с усилением роли национальной стандартизации в решении государственных задач и, в свою очередь, роли государства в ее развитии. Предстоит разработать механизмы применения национальных стандартов при формировании отраслевых программ, в том числе в такой отрасли, как волоконная оптика, в сфере госзакупок, а также и сам механизм привлечения органов власти к работам в области национальной стандартизации.

Потребность в стандартных мерах, возникшая у человека как только он начал строить жилища, делать орудия труда, изготавливать домашнюю утварь и одежду, когда нужно было измерять длину, объем, вес, время, постепенно развивалась. В наше время – время современных технологий, имеющих дело с малыми размерами элементов и структур, стандартизация в этой сфере требует особого подхода.

Важным также является экономический эффект, который дает применение стандартизации.

Стандарт предлагает опробованные на практике и несущие меньший риск технические и технологические решения. Использование этих решений позволяет производителю существенно снизить расходы на проведение исследований, испытаний, в том числе эксплуатационных, и свои риски от невозможности самостоятельного проведения НИОКР и доводочных испытаний выпускаемой продукции в полном объеме.

Выполнение положений, указанных в стандартах, позволяет сформулировать требования к качеству продукции.

Приобретя стандарт, производитель может использовать его многократно, тем самым снижая расходы на приобретение прав на интеллектуальную собственность.

С помощью стандартизации возможен допуск на рынок технологий, отдаленные последствия применения которых до сих пор окончательно не ясны, например нанотехнологий. При этом соблюдаются интересы всех участников рынка.

Как свидетельствует международный опыт, стандартизация в качестве одного из основных элементов технического регулирования в условиях рыночной экономики может обеспечить вклад в экономический рост, превышающий соответствующие показатели от внедрения патентов и лицензий. Так, в результате исследований, проведенных в ряде стран Азиатско-Тихоокеанского региона, было выявлено, что эффективное применение технического нетарифного регулирования позволяет увеличить долю прибыли в среднем на 0,26 % от ВВП (валовый внутренний продукт), тогда как прибыль от мер тарифного регулирования не превышает 0,14 %. Таким образом, государство напрямую должно быть заинтересовано в эффективном применении стандартизации в качестве рычага технического регулирования.

Поскольку стандартизация, как и метрология, отличается межотраслевым характером своего применения и является универсальным средством технического регулирования, развитие волоконной оптики, как и любой другой отрасли, невозможно без совершенствования деятельности в области стандартизации, позволяющей пользоваться общепринятыми терминами и определениями.

Это особенно важно, поскольку волоконная оптика широко применяется в самых различных сферах деятельности и отраслях экономики. Стандарты устанавливают также оптимальные требования к объектам этой индустрии и методам их испытаний, что дает возмож-

ность контролировать соответствие показателей установленным требованиям. Поэтому на сегодняшний день главной стратегической целью является создание эффективной национальной системы стандартизации.

2.2. Особенности стандартизации в волоконной оптике

По прогнозам российских ученых, к 2015 г. наиболее перспективными секторами экономики станут следующие секторы; фотоника, электроника, телекоммуникации и др., т.е. те, в которых применяется волоконная оптика и которые в области стандартизации применяемых измерений относятся к нанотехнологиям (рис. 2.2).

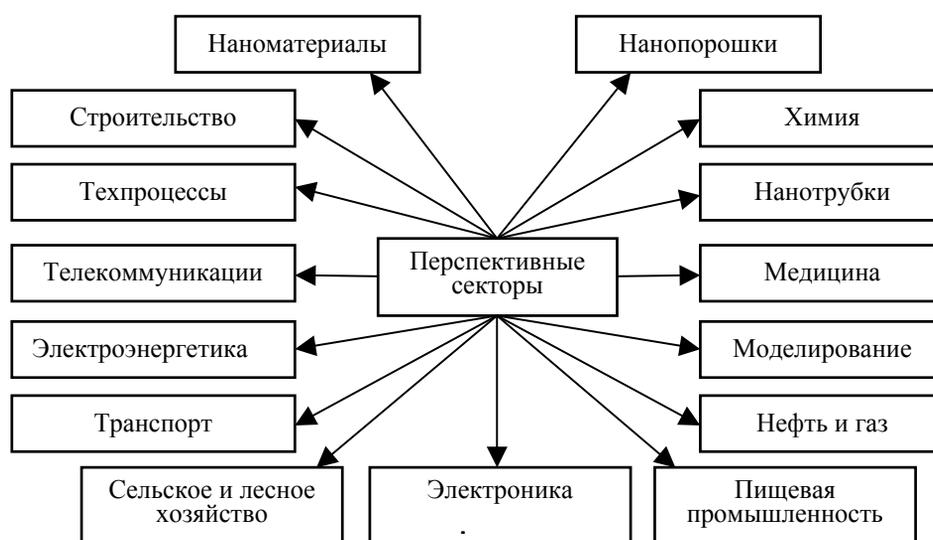


Рис. 2.2. Перспективные секторы экономики (прогноз на 2015 год)

Все это делает актуальным вопрос разработки и установления требований к продукции и процессам волоконной оптики и соответственно создания стандартов на эту продукцию и процессы.

Переход к нанотехнологиям поставил перед наукой и техникой ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур, с которыми имеют дело нанотехнологии. Поэтому стандартизация в этой сфере требует особого подхода. Характеристики наноматериалов и наноизделий, методы их испытаний, система классификации и идентификации существенно отличаются от объектов макромира, что должно быть отражено в стандартах и других нормативных документах.

Поскольку применение нанотехнологий отличается межотраслевым характером, то благодаря использованию инструментов стандартизации возможен единый подход во всех сферах применения нанотехнологий и ко всем объектам наноиндустрии.

Организация и проведение деятельности по стандартизации в области нанотехнологий обеспечивает соблюдение принципов технического регулирования, включающих единство терминов и определений, требований к объектам, методам испытаний, возможность подтверждения соответствия.

Разработчикам стандартов нанотехнологии приходится тщательно отбирать стандарты, на которые следуют тратить время и ресурсы. Любой новый стандарт должен обладать большим рыночным потенциалом, быть экономически и технологически осуществимым, не повторять другие разрабатываемые в настоящее время стандарты и обеспечивать единственное решение. Специалисты, занимающиеся новыми технологиями, должны тщательно изучать объект исследования, чтобы не тратить ограниченные ресурсы на то, что не соответствует вышеперечисленным критериям.

Необходимы стандарты для описания нанотехнологий. Новые термины появляются практически каждый день, что часто вызывает некоторую неопределенность, связанную с сущностью, лежащей в основе технологии, которую данный термин описывает. Такое быстрое увеличение количества причудливых названий происходит из-за отсутствия договоренности о присвоении наименований, что не позволяет систематически классифицировать новые открытия в нанотехнологиях. Принятие *терминологической системы* упорядочит количество изобретаемых терминов и поможет науке, промышленности и обществу в целом ориентироваться в этой новой, стремительно развивающейся области. Отсутствие системы терминов может стать источником проблем, препятствующих коммерциализации технологий.

В настоящее время используются различные термины для описания измерений в волоконной оптике. Однако междисциплинарная природа нанотехнологии вызывает необходимость создания соглашений, которые бы охватывали всевозможные комбинации и формы междисциплинарных открытий.

Одной из первоочередных задач стандартизации является стандартизация параметров и свойств материалов, объектов, элементов и структур волоконной оптики, подлежащих измерениям. При межотраслевом

и междисциплинарном характере нанотехнологии, различной терминологии и различных исследовательских и измерительных приемах и методах – это непростая, последовательно решаемая задача, в которой заложено объединяющее начало. В табл. 2.1. в соответствии со стандартом ГОСТ 25462–82 представлены определения некоторых терминов волоконной оптики.

Таблица 2.1

Указатель терминов в волоконной оптике

№ п/п	Термин	Определение
1	Волоконная оптика	Раздел оптики, в котором рассматривают направленную передачу излучения и связанную с ним информацию по волоконным световодам
2	Волоконный световод Световод	Направляющий канал для передачи оптического излучения, состоящий из сердцевины, окруженной отражающей оболочкой (оболочками)
3	Многожильный волоконный световод Многожильный световод	Совокупность волоконных световодов, объединенных по всей длине материалом оболочки
4	Сердцевина волоконного световода Сердцевина	Светопроводящая часть волоконного световода со средним значением показателя преломления, превышающим показатель преломления отражающей оболочки
5	Отражающая оболочка волоконного световода Оболочка	Покрытие сердцевины волоконного световода, обеспечивающее ее оптическую изоляцию и механическую защиту
6	Градиентный волоконный световод	Волоконный световод с плавным изменением показателя преломления по сечению от оси световода к его периферии
7	Волоконнооптический жгут	Изделие из волоконных световодов, жестко скрепленных у торцов
8	Волоконнооптическая пластина	Изделие из параллельно расположенных и жестко скрепленных по всей длине волоконных световодов с длиной, меньшей поперечного сечения
9	Волоконнооптический преобразователь	Изделие из волоконных световодов с заданной схемой расположения их концов
10	Фокон	Изделие из волоконных световодов с увеличивающимся или уменьшающимся по длине сечением

Окончание табл. 2.1

№ п/п	Термин	Определение
11	Коэффициент заполнения изделия из волоконных световодов Коэффициент заполнения	Отношение суммы площадей торцов сердцевин к площади торца изделия из волоконных световодов
12	Угол скоса торца волоконного световода Угол скоса	Угол между оптической осью волоконного световода и нормалью к поверхности торца волоконного световода
13	Угол входа луча в волоконный световод Угол входа	Угол между лучом в пространстве предметов и оптической осью волоконного световода
14	Угол распространения луча в волоконном световоде Угол распространения	Угол между лучом в волоконном световоде и его оптической осью
15	Угол выхода луча из волоконного световода Угол выхода	Угол между лучом в пространстве изображений и оптической осью волоконного световода
16	Расчетный апертурный угол волоконного световода Расчетный апертурный угол	Наибольший угол между оптической осью волоконного световода и лучом в пространстве предметов, проходящим по волоконному световоду без виньетирования
17	Расчетная числовая апертура волоконного световода Расчетная числовая апертура	Произведение показателя преломления среды на входе волоконного световода и абсолютного значения синуса его расчетного апертурного угла

Примечание. Стандартизованные термины набраны полужирным шрифтом, краткая форма – светлым.

Необходимость стандартизации терминов и определений в волоконной оптике, направленной на решение проблем общения и взаимопонимания различных групп исследователей не только внутри одной отдельно взятой страны, но и в рамках междисциплинарного обмена информацией между странами, очевидна. Отсюда закономерное следствие: необходимость в аттестованных и стандартизованных методиках выполнения измерений, методиках калибровки и поверки средств измерений, применяемых в нанотехнологиях, в волоконной оптике и др.

Особый аспект стандартизации – решение задач обеспечения здоровья и безопасности операторов технологических процессов, равно как и лиц, взаимодействующих с продукцией нанотехнологий на всех этапах ее производства, испытаний, исследований и применений, а также экологической безопасности окружающей среды.

Крайне важной является международная стандартизация технологий и продукции волоконной оптики. Применение международных стандартов в этой области позволяет повысить конкурентоспособность на глобальном уровне.

2.3. Работа российских и зарубежных организаций по стандартизации в волоконной оптике

Международная стандартизация в области новых технологий дает возможность достижения следующих положительных результатов:

- 1) содействие инновационному процессу;
- 2) решение проблем при проведении высокоточных измерений;
- 3) повышение значения международных стандартов в области менеджмента риска, связанного с потенциальным воздействием на здоровье и окружающую среду, для определения фактической степени данного воздействия.

Международные стандарты могут выполнять самые различные функции – от правил де-факто, действующих в соответствии с требованиями коммерции (например, контракт), до поддержки сути проблемы или ее обеспечения, что в широком представлении может определяться как позитивное право (например, законодательство или регламенты).

Ссылка на стандарт применяется в законодательном, регулирующем или судебном требованиях, придавая им силу закона, или стандарт может быть добровольно признан как отвечающий положениям закона.

Международная деятельность в этой области ведется техническим комитетом Международной организации по стандартизации ИСО/ТК 229 «Нанотехнологии» и включает четыре направления, а именно:

- 1) терминологию и номенклатуру;
- 2) измерение и характеризацию;
- 3) воздействие нанотехнологий на здоровье, безопасность и спецификацию материалов;
- 4) воздействие нанотехнологий на окружающую среду.

Председателями направлений являются представители национальных органов по стандартизации Канады, Японии и США, общий секретариат ведет Британский институт стандартов. Великобритания координирует стандартизацию в области размерной и оптической метрологии.

В России подобные задачи решаются в рамках Технического комитета по стандартизации ТК441 «Нанотехнологии и наноматериалы» Ростехрегулирования, созданного в 2001 году. Секретариат ТК441 ведет

Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума (НИЦПВ).

Техническим комитетом (ТК46) «Кабельные изделия» внесен стандарт «Волокна оптические», введенный в действие с 1995 г. Стандарт содержит полный аутентичный текст международного стандарта МЭК 793-1-89 «Оптические волокна. Часть 1. Общие технические требования» и распространяется на оптические волокна с первичным покрытием или первичным буферным покрытием, применяемые в системах дальней связи и в системах с использованием аналогичной техники. Стандарт устанавливает общие требования к геометрическим, оптическим, передающим, механическим характеристикам и стойкости к воздействию внешних факторов для оптических волокон.

Разработка единых требований позволяет активнее развивать волоконную оптику как в России, так и за рубежом, а также способствует повышению конкурентоспособности в данной области. Не менее важной в области разработки методов измерений является и роль метрологии.

2.4. Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные функции стандартизации.
2. Перечислите виды стандартов, применяемых в международной практике.
3. Каковы цели стандартизации в рамках федерального закона?
4. Кем и для чего разрабатывается технический регламент?
5. Что обозначает стандартизованный термин «фокон» в волоконной оптике?
6. Какова роль и функции международных стандартов в области новых технологий?
7. Перечислите четыре направления работы технического комитета Международной организации по стандартизации ИСО/ТК 229 «Нанотехнологии».
8. В каком году в России введен в действие стандарт «Волокна оптические», содержащий полный аутентичный текст международного стандарта МЭК 793-1-89 «Оптические волокна. Часть 1. Общие технические требования»?

3. МЕТРОЛОГИЯ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

3.1. Обеспечение единства измерений в системе технического регулирования

Измерения являются одним из путей познания природы человеком. Они являются основой научных знаний, служат для учета материальных ресурсов, обеспечения требуемого качества, взаимозаменяемости деталей и узлов, совершенствования технологии, охраны здоровья и обеспечения безопасности труда и многих других отраслей человеческой деятельности. Измерения количественно характеризуют окружающий материальный мир, раскрывая действующие в природе закономерности. Об этом сказал основоположник отечественной метрологии Д. И. Менделеев: «Наука начинается... с тех пор, как начинают измерять. ...Точная наука немыслима без меры». Известно аналогичное высказывание и основоположника английской метрологии Томсона: «Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить».

Директор Международного бюро мер и весов профессор Эндрю Воллард в послании к Всемирному дню метрологии 20 мая 2005 г. писал: «Экономический успех страны зависит от ее способности производить и продавать точно измеренные и испытанные товары и услуги. Метрология играет центральную роль для производителей, поставщиков и потребителей товаров и услуг. Все слои общества должны иметь уверенность в точности и надежности измерений, сделанных на нужном уровне точности».

Под измерительной техникой в широком понимании значения этих слов подразумевают как все технические средства, с помощью которых выполняют измерения, так и технику проведения измерений. Результаты измерений одинаковых величин, полученные в разных местах (разных странах) и с помощью различных измерительных средств, должны быть сопоставимы на уровне требований точности.

В первую очередь для этого необходимо единообразие единиц измеряемых величин и мер, осуществляющих вещественное их воспроизведение. Обеспечение высокой степени единообразия, или, как говорят, единства мер, является одним из условий обеспечения сопоставимости результатов измерений. Кроме того, необходимо выполнение ряда других условий для того, чтобы обеспечить все те качества результатов измерений, которые нужны для их сопоставимости и правильного использования, что в целом называют единством измерений.

Вопросами теории и практики обеспечения единства измерений занимается метрология.

Метрология в широком понимании представляет собой науку об измерениях, обеспечении их единства, способах достижения требуемой точности, а также методах и средствах достижения указанных целей. Метрология служит теоретической основой измерительной техники. Создана система, направленная на всеобщее обеспечение единства мер и единства измерений. Эта система обеспечивается единой государственной службой, которая раньше при ограниченной измерительной технике именовалась службой мер и весов. В настоящее время, когда диапазон деятельности этой службы возрос во много раз, она называется *метрологической службой страны*.

Проблема обеспечения высокого качества продукции находится в прямой зависимости от степени метрологического обслуживания производства. Это прежде всего умение правильно измерять параметры качества материалов и комплектующих изделий, поддерживать заданные технологические режимы, т.е. измерять множество параметров технологических процессов, результаты измерений преобразуются в управляющие команды.

Метрология органически связана со стандартизацией, и эта связь выражается прежде всего в стандартизации единиц измерений, системы государственных эталонов, средств измерений и методов поверок, в создании стандартных образцов свойств и составов веществ. В свою очередь, стандартизация опирается на метрологию, обеспечивающую правильность и сопоставимость результатов испытаний материалов и изделий, а также заимствует из метрологии методы определения и контроля качества.

В 1993 г. принят Закон РФ «Об обеспечении единства измерений». До этого времени, по существу, не было законодательных норм в области метрологии. Правовые нормы устанавливались постановлениями правительства. По сравнению с положениями этих постановлений Закон установил немало нововведений – от терминологии до лицензирования метрологической деятельности в стране.

Реорганизация государственных метрологических служб, необходимость которой диктовалась переходом страны к рыночной экономике, фактически привела к разрушению централизованной системы управления метрологической деятельностью и ведомственных служб. Появление различных форм собственности стало причиной противоречий между обязательностью государственных испытаний средств измерений, их поверки, государственного надзора и возросшей степенью свободы

субъектов хозяйственной деятельности. К этому добавились проблемы, связанные с необходимостью интеграции России в мировую экономику.

Метрология относится к такой сфере деятельности, в которой основные положения обязательно должны быть закреплены законом, принимаемым высшим законодательным органом страны. Цели Закона «Об обеспечении единства измерений» состоят в следующем:

- защита прав и законных интересов граждан, установленного порядка и экономики Российской Федерации от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений;

- содействие научно-техническому и экономическому прогрессу на основе применения государственных эталонов единиц величин и использования результатов измерений гарантированной точности, выраженных в допускаемых к применению в стране единицах;

- создание благоприятных условий для развития международных и межфирменных связей;

- регулирование отношений государственных органов управления Российской Федерации с юридическими и физическими лицами по вопросам изготовления, выпуска, эксплуатации, ремонта, продажи и импорта средств измерений;

- адаптация российской системы измерений к мировой практике.

Закон «Об обеспечении единства измерений» устанавливает и законодательно закрепляет основные понятия: единство измерений, средство измерений, эталон единицы величины, нормативные документы по обеспечению единства измерений, метрологическая служба, метрологический контроль и надзор, поверка и калибровка средств измерений, аккредитация на право поверки средств измерений, сертификат о калибровке. В основу определений положена официальная терминология Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ). Основные статьи Закона устанавливают:

- организационную структуру государственного управления обеспечением единства измерений;

- нормативные документы по обеспечению единства измерений;

- единицы величин и государственные эталоны единиц величин;

- средства и методики измерений.

Закон «Об обеспечении единства измерений» устанавливает следующие виды государственного метрологического контроля:

- утверждение типа средств измерений;

- поверка средств измерений, в том числе эталонов;

- лицензирование деятельности юридических и физических лиц на право изготовления, ремонта, продажи и проката средств измерений.

Утверждение типа средств измерений проводится в целях обеспечения единства измерений в стране и постановки на производство и выпуск в обращение средств измерений, соответствующих требованиям, установленным в нормативных документах.

Измерениями в России занимаются десятки миллионов человек. По экспертным оценкам, на деятельность, связанную с измерениями в России, расходуется порядка 3,8 % стоимости валового национального продукта. В таких странах, как США, Япония, Англия, Германия, эти затраты достигают 12 %, и имеется тенденция их постоянного роста, что связано с усложнением производства и выпуском наукоемкой продукции, внедрением современных технологий производства, в том числе нанотехнологий. Например, в электронной промышленности процедуры измерений по объемам работ в стоимости достигают порядка 60–70 %. Без получения посредством измерений достаточно полных и достоверных сведений было бы невозможно достигнуть крупнейших научных и практических результатов в области использования атомной энергии, освоения космоса, в области создания новых материалов с заранее заданными свойствами и обеспечения качества продукции и услуг.

Отметим, что качество – это совокупность характеристик объекта, которые придают ему способность удовлетворять установленные или предполагаемые потребности (ИСО 8402:1994). При этом объектами могут быть продукция, деятельность или процесс, услуги, системы и др.

Надлежащее качество может быть достигнуто совокупной деятельностью стандартизации, метрологии и оценки соответствия.

Каждый из указанных видов деятельности связан с двумя другими, но они имеют общую часть – качество (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Система обеспечения качества

Каждый объект описывается совокупностью характеристик, которые подлежат нормированию, т. е. являются объектами метрологии, а объекты подвергаются различным испытаниям для подтверждения характеристик заданным требованиям, т. е. оценке соответствия.

Результаты испытаний, в свою очередь, основываются на достоверных результатах измерений во время испытаний, единство которых обеспечива-

ется и гарантируется Российской системой измерений. Таким образом, система измерений является объективным инструментом для обеспечения и оценки качества продукции и услуг через стандарты, метрологическое обеспечение производства и испытаний.

Связь метрологии со стандартизацией выражается прежде всего в стандартизации единиц измерений, системы государственных эталонов, средств измерений и методов поверок, в создании стандартных образцов свойств и состава веществ. В свою очередь, стандартизация опирается на метрологию, обеспечивающую правильность и сопоставимость результатов испытаний материалов и изделий, а также заимствует из метрологии методы определения и контроля качества.

В решении задачи обеспечения качества измерений основная роль принадлежит метрологии – науке об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и требуемой точности. Решение задачи достигается путем создания государственных эталонов, «привязки» к ним проводимых измерений, и установления метрологических правил и норм по отношению к измерениям и средствам измерений. Если не соблюдается единство измерений, даже самые «тонкие» измерения, проводимые с помощью правильно подобранных средств измерений, не дадут необходимых результатов.

Единство измерений является одним из важнейших условий эффективности исследования и разработок, управления производством и другими объектами, диагностики и лечения болезней, достоверного учета материальных и энергетических ресурсов, контроля качества продукции, условий безопасности труда и охраны окружающей среды, надежности работы связи и транспорта, обороны государства.

Повышение точности измерений качества нефти на 0,5 % равносильно вовлечению в оборот 2,25 млн тонн нефти.

Единство измерений – это состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

Иными словами, единство измерений основано на четырех основных принципах:

- результаты выражены в узаконенных единицах;
- размер единиц, хранимых средствами измерений, равен размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами;

- погрешности результатов измерений известны;
- погрешности измерений не выходят за установленные пределы.

Без выполнения этих условий невозможно добиться единства измерений. Наиболее важным условием обеспечения единства измерений является «привязка» измерений к государственным эталонам, что в соответствии со стандартами ИСО серии 9000 является обязательным условием обеспечения качества продукции, процессов и услуг (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Прослеживаемость измерений

Прослеживаемость – свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений.

Государственная система измерений (ГСИ) должна трактоваться как система управления деятельностью по обеспечению единства измерений.

Основная цель ГСИ – создание на межотраслевом уровне правовых, нормативных, организационных, технических и экономических условий, необходимых для решения задач по обеспечению возможности всем отраслям, предприятиям, организациям, исследователям, специалистам во всех сферах деятельности правильно оценивать точность выполняемых ими измерений. Не менее важно оценивать влияние точности измерений на правильность, основанную на результатах измерений, информации о свойствах веществ и материалов, о количестве и качестве материальных и энергетических ресурсов, сырья, материалов, полуфабрикатов продукции, о характеристиках процессов и явлений.

Гарантией надежного функционирования ГСИ является взаимодействие составляющих ее подсистем – правовой, организационной и технической. Это взаимодействие осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование).

Комплекс метрологических документов ГСИ тесно связан с Государственной системой стандартизации, которая определяет порядок планирования, разработки, внедрения документов, структуру их построения и содержания.

Документы ГСИ также взаимосвязаны со стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП). В свою очередь, нормы и требования, установленные в метрологических документах, должны учитываться в этих системах.

Техническую подсистему составляют государственные эталоны, установки высшей точности, рабочие эталоны всех разрядов, стандартные образцы и испытательное оборудование, необходимые для осуществления метрологического контроля и надзора.

Для обеспечения единства измерений в нашей стране введена Международная система единиц (СИ). На ее основе разработан ГОСТ 8.417–02 «ГСИ. Единицы физических величин». Все другие системы единиц, действовавшие до его принятия, подлежат изъятию. Допускается применение ограниченного числа внесистемных единиц.

Международная система единиц была принята на XI Генеральной конференции по мерам и весам в октябре 1960 г. Система СИ состоит из семи основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль), двух дополнительных (радиан и стерадиан) и ряда производных, количество которых не ограничено.

Все применяемые средства измерений должны градуироваться только в унифицированных единицах, установленных ГОСТ 8.417-02.

Одной из составляющих системы обеспечения единства измерений является система воспроизведения единиц и передачи их размера рабочим средствам измерений (рис. 3.3). Единица физической величины при централизованной системе воспроизводится государственным эталоном, который характеризует величину с наивысшей точностью.



Рис. 3.3. Классификация эталонов

Эталон единицы физической величины – средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по

поверочной схеме средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Государственный эталон единицы величины – эталон единицы величины, находящийся в федеральной собственности. Статус государственным эталонам присваивается Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии.

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью.

Государственный первичный эталон – первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Рабочий эталон – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

В международной практике государственные эталоны обычно называются национальными, а эталоны, хранимые в Международном бюро мер и весов, – международными. В нашей стране термин «национальный эталон» используется по отношению к государственному в тех случаях, когда отечественные государственные эталоны применяются для сличения с международными эталонами или с эталонами, принадлежащими другим государствам.

К первичным эталонам относят как соответствующие эталоны основных СИ, так и производных единиц СИ.

Размер единицы, воспроизводимой вторичными эталонами, «поддерживается» с помощью первичных (государственных).

Вторичные эталоны утверждаются в зависимости от особенностей их применения Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии или государственными научными метрологическими центрами.

Рабочие эталоны получают размер единицы, как правило, от вторичного эталона и служат для передачи размера единиц другим рабочим эталонам (меньшей точности) и рабочим средствам измерений.

В ряде случаев вторичные эталоны могут быть не только в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии, но и других ведомствах, где они являются исходными средствами измерений в метрологических службах ведомств и обычно называются ведомственными эталонами. В отдельных случаях рабочие средства измерений могут иметь точность, превосходящую точность рабочих эталонов того или иного разряда. В этих случаях размер единицы передается им от рабочих эталонов высших разрядов, вплоть до вторичного эталона. Другими словами, некоторые рабочие средства измерений, не являясь по метрологическому назначению эталонами, по точности могут превосходить некоторые рабочие эталоны. Создание высокоточных рабочих средств измерений диктуется необходимостью измерений параметров и характеристик прецизионных технологических процессов (высоких технологий) или высокоточных технических устройств.

Международные эталоны хранятся в Международном бюро мер и весов, и в соответствии с международными соглашениями с их помощью периодически проводятся сличения национальных эталонов разных стран.

В соответствии с Конституцией Российской Федерации и Законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» государственные эталоны находятся в ведении Российской Федерации (ранее функции собственника выполнял Госстандарт России, ныне – Ростехрегулирование).

В настоящее время в Российской Федерации 123 государственных первичных эталона, из них 6 эталонов основных единиц.

Все производные единицы Международной системы единиц СИ выражаются через основные единицы (*метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела*) по соответствующим уравнениям связи и Государственные первичные эталоны основных единиц, осуществляя воспроизведение этих единиц, и тем самым обеспечивают и возможность воспроизведения всех производных единиц.

Основными направлениями развития эталонной базы России в настоящее время являются:

- оптимизация эталонной базы по составу и структуре;
- создание системы взаимосвязанных эталонов, в том числе «естественных», основанных на фундаментальных физических константах и стабильных физических исследованиях в области воспроизведения основных и важнейших производных единиц;
- создание систем эталонов, в которых разумно сочетается централизованное и децентрализованное воспроизведение единиц;

- поиск, исследование и внедрение новых физических явлений и технологий, способных обеспечить научный прорыв при создании эталонов;
- разработка предельных по точности методов и средств измерений эталонного значения.

Современная тенденция в развитии эталонов – переход на естественные способы воспроизведения единиц, основанные на фундаментальных физических константах. Это, естественно, должно привести к пересмотру Международной системы единиц. Даже сейчас, в XXI веке, одна из основных единиц системы СИ – килограмм определена посредством искусственно созданного объекта. При этом килограмм – не изолированная единица, с ее участием определены еще три основные единицы – ампер, моль, кандела.

Наиболее вероятным для нового определения массы, килограмма, является определение килограмма на основе постоянных Планка и Авогадро. Высокая степень неизменности погрешности воспроизведения единиц величин, получаемая с помощью «квантовых» эталонов, ограниченная точностью фундаментальных физических констант, позволяет значительно повысить точность «квантовых» эталонов. Фундаментальные физические константы с появлением новых методов и средств измерений уточняются. Например, проведенные совсем недавно измерения кванта магнитного потока позволили уменьшить суммарную погрешность с $4 \cdot 10^{-6}$ (1986 г.) до $3 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, соответственно будет возрастать точность квантовых эталонов. Способность воспроизводить единицы физических величин независимо от внешних условий со временем позволит рассматривать квантовые эталоны как «вечные» меры.

3.2. Особенности измерений в волоконной оптике

По оценкам специалистов, к 2030 г. будут созданы волоконно-оптические системы связи и передачи информации со скоростью 1 Петабит (10^{15} бит/с); продолжительность одного импульса света, генерируемого лазером, составляет фемтосекунды (10^{-15} с); структура оптоволокна формируется на микро- и наноуровнях. Поэтому особенности измерений в волоконной оптике пересекаются с измерениями в нанотехнологиях.

Переход к нанотехнологиям поставил перед наукой и техникой ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур, с которыми имеет дело нанотехнология. В этой развивающейся области знаний необходимо опережающее развитие метро-

логии, поскольку именно уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать развитие соответствующих отраслей, либо служить сдерживающим фактором.

Метрология играет важнейшую роль при разработке и коммерциализации нанотехнологий и нанопродукции. Точные, достоверные и прослеживаемые измерения являются основой обеспечения успешного и безопасного развития нанотехнологий, а также подтверждением соответствия продукции nanoиндустрии. Здесь, как нигде более, актуален тезис «Если нельзя измерить, то невозможно создать».

Специфика нанотехнологий привела к развитию нового направления – *нанометрологии*. При этом нанометрология, по мнению специалистов, занимающихся вопросами измерений, должна рассматриваться как обязательная часть всех нанотехнологий.

Нанометрология изучает и использует новые явления и признаки, которые появляются в тех случаях, когда какая-то характерная структура материала имеет нанометрические ($\sim 10^{-9}$ м) размеры. Очевидно, что основная задача нанометрологии – проведение измерений в диапазоне от 1 до 100 нм (в настоящее время с точностью до 0,1 нм) и адаптация существующих или разработка новых методов изучения свойств нанобъектов как функции их размеров.

Нанометрология охватывает измерение длины и определение размеров в нанометрическом диапазоне, а также измерение силы, массы, температуры, электрических, физико-химических и иных свойств нанобъектов.

В табл. 3.1 приведены физические величины, подлежащие измерению в nanoиндустрии (в частности, при производстве изделий микроэлектроники).

Таблица 3.1

Диапазон измерений физических величин в nanoиндустрии

Физическая величина	Диапазон измерений	Физическая величина	Диапазон измерений
Длина, м	$10^{-11} \dots 1$	Доля примесей, %	$10^{-8} \dots 10^{-6}$
Масса, кг	$10^{-15} \dots 10^2$	Сила тока, А	$10^{-16} \dots 10^2$
Время, с	$10^{-16} \dots 10^6$	Напряжение, В	$10^{-11} \dots 10^5$
Температура, К	1...3200	Мощность, Вт	$10^{-17} \dots 10^{10}$
Давление, Па	$10^{-11} \dots 10^3$	Индуктивность, Гн	$10^{-18} \dots 10^2$
Расход, м ³ /с	$10^{-7} \dots 10^{17}$	Емкость, Ф	$10^{-19} \dots 1$
Плотность, кг/м ³	$10^{-1} \dots 10^4$	Сопротивление, Ом	$10^{-7} \dots 10^{17}$
Концентрация, см ⁻³	$10^{10} \dots 10^{22}$	Частота, Гц	$10^{-4} \dots 10^{10}$

В обзоре Европейского форума по нанотехнологиям, проходившего в 2006 г., отмечается важность нанометрологии для развития нанотехнологий:

- нанотехнологии уже являются большим сектором промышленности, ожидается, что они будут и далее развиваться быстрыми темпами;

- точный контроль размеров объектов – ключевой вопрос нанотехнологий и науки о нанобъектах. Размеры этих объектов менее 10 нм, и часто требуется точность до 0,1 нм. Для этого нужно разработать новые методы измерений;

- технологии измерений, разработанные для традиционных материалов, во многих случаях не могут быть применимы к наноструктурам. Должны быть созданы специальные методики измерений для наноструктур и наноматериалов. Невыполнение этого может привести к большим ошибкам при оценке результатов;

- ученые и инженеры хотят исследовать новые физические явления, возникающие при уменьшении размеров систем до нанометрических. Новые явления и свойства, возникающие при нанометрических размерах, требуют понимания и умения проводить измерения физических параметров очень малых объектов;

- наноструктура, под которой понимается особое расположение атомов или частиц, приобретает новые, иногда довольно необычные формы. Примерами могут служить фуллерены, нанотрубки и другие наноструктурные конструкции и материалы. Это ставит новые задачи перед нанометрологией;

- должно быть создано новое оборудование для решения вышеуказанных задач;

- нужно разработать стандарты, соответствующие технологическим достижениям и охватывающие все увеличивающуюся область применения наноструктур.

Таким образом, нанометрология является очень важной областью исследований и разработок, объединяющей в себе возможности для открытий в фундаментальной науке и открывающей перспективы коммерческого применения. При этом основные различия между двумя направлениями нанометрологии (исследовательское и промышленное) касаются точности измерений, стоимости/эффективности типов параметров и условий, в которых происходят измерения, то есть измерительных потребностей.

Измерительные потребности – это совокупность средств и методов измерений, обеспечивающих получение достоверных и признаваемых значений необходимых параметров и характеристик продукции на всех этапах жизненного цикла.

Существуют различные методы измерений физических величин в нанометровом диапазоне: сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, микроскопия ближнего поля, конфокальная, интерференционная и ряд других методов, обеспечивающих наивысшее разрешение.

Приборы, позволяющие проводить измерения физических величин в нанометровом диапазоне, использующие вышеназванные методы измерений, существуют несколько десятилетий. Ими оснащены национальные метрологические институты стран с наиболее развитыми нанотехнологическими направлениями – Национальный институт стандартов и технологий NIST (США), Национальная физическая лаборатория – NPL (Великобритания), Физико-технический институт – PTB (Германия), Национальный метрологический институт – LNE (Франция).

Оснащение данных лабораторий включает в себя ряд приборов, позволяющих проводить измерения физических величин в нанометровом диапазоне. К ним относятся сканирующие электронные микроскопы (СЭМ), просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ), сканирующие туннельные микроскопы (СТМ), атомно-силовые микроскопы (АСМ), микроскопы ближнего поля, конфокальные микроскопы, интерференционные микроскопы, спектрометры и ряд других приборов, обеспечивающих наивысшее разрешение по измеряемым физическим величинам при нанометровых размерах исследуемого объекта.

Однако в процессе исследований различных наноструктур возникло понимание, что для решения задач обеспечения единства измерений параметров наноструктур данной приборной базы недостаточно. Возникла необходимость значительно повысить точность измерений и увеличить количество измеряемых параметров.

Поскольку пока не разработано приборов, основанных на новых физических принципах, повышение точности приборов, названных выше, достигается за счет увеличения стабильности параметров окружающей среды, всесторонней защиты от различных внешних воздействий.

Получение информации о различных физических параметрах нанобъекта во многих случаях может быть достигнуто только путем одновременного измерения ряда физических параметров, поскольку при пе-

реносе объекта от одного прибора к другому ряд его свойств могут существенно измениться.

Это привело к созданию комбинированных приборов, позволяющих, например, без выноса образца в атмосферу исследовать один и тот же участок образца методами сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, ближнепольной оптической микроскопии, дифрактометрии, поляриметрии и т. д.

Приборы подобного типа разработаны и используются в Национальной физической лаборатории. Например, оптико-рентгеновский интерферометр и атомно-силовой микроскоп в комбинации с рентгеновским интерферометром.

Ввиду того, что появляется большое количество наноструктурированных материалов с новыми свойствами, количество нормируемых параметров, требующих проведения измерений, постоянно возрастает. Также возникает необходимость создавать стандартные образцы новых наноструктурированных материалов и аттестовывать их. Поэтому для создания и исследования новых свойств таких материалов необходимо иметь возможность их изготавливать, а также оказывать на них различные воздействия в процессе измерений.

Этим требованиям соответствует измерительно-технологическая установка высшей точности для создания и исследования наноструктур, созданная в NIST (США). Данная установка считается одним из наиболее совершенных инструментов для исследований наноструктурированных материалов.

Для повышения достоверности регистрации параметров нанобъекта его исследование осуществляется непосредственно сразу после изготовления, причем транспорт объекта из технологической камеры в измерительную осуществляется с помощью специального робота в сверхвысоком вакууме. Это позволяет, например, в течение нескольких часов исследовать свойства поверхности, свободной от газового монослоя.

3.3. Метрологическое обеспечение единства и качества измерений

Метрологическое обеспечение единства и качества измерений базируется на Государственной системе обеспечения единства измерений, охватывающей весь комплекс государственных (национальных) стандартов и унифицирующей метрологические нормы, правила и требования.

Достижение единства и требуемой точности измерений является важным фактором обеспечения высокого качества измерений.

Единство измерений, как основной принцип метрологии, устанавливает обязательные требования к применению узаконенных единиц физических величин, стандартизованных и аттестованных средств и методик измерений. Под качеством измерений следует понимать совокупность свойств состояния измерений, обуславливающих получение результатов измерений с требуемыми точностными характеристиками, в необходимом виде и в установленный срок.

К основным свойствам измерений, определяющим их качество, относятся:

- точность, определяемая степенью близости результата измерения к принятому опорному значению величины;

- правильность как степень близости среднего значения, полученного на основании большей серии результатов измерений (испытаний), к принятому опорному значению величины, которая характеризуется близостью к нулю систематической погрешности;

- повторяемость (сходимость) – это прецизионность в условиях повторяемости, при которых независимые результаты измерений (испытаний) получаются одним и тем же методом на идентичных объектах измерения, в одной и той же лаборатории, когда все окружающие факторы не меняются;

- воспроизводимость есть прецизионность в условиях, при которых результаты измерений получают в разных лабораториях, но в одинаковых условиях и одинаковыми методами и измерительными средствами;

- быстрота получения результата измерений, зависящая от рационально составленной методики измерений, уровня автоматизации процесса измерения и обработки полученных данных.

Важными показателями качества измерений являются стабильность и надежность средств измерений. Стабильность средства измерений отражает неизменность во времени его метрологических свойств.

Особенностью средств измерений, оказывающей влияние на их надежность, является вероятность появления так называемых метрологических отказов, заключающихся в потере средством измерения метрологической исправности, наступающей в момент, когда хотя бы одна из метрологических характеристик теряет соответствие установленной для нее норме.

Метрологический отказ протекает скрытно, время его появления есть величина случайная. Состояние средства измерений, определяемое соответствием его нормируемых метрологических характеристик уста-

новленным значениям, называют метрологической исправностью средства измерений, ее обеспечение осуществляется регулярной поверкой и аттестацией средства измерений. Существует много методов метрологического обеспечения надежности и стабильности средств измерений. Например, назначение единого поверочного интервала для типа или вида средства измерений в целом, или установление системы индивидуальных периодически корректируемых поверочных интервалов с учетом анализа результатов эксплуатации приборов-предшественников.

Количественное обоснование поверочных интервалов обосновывается на известных показателях теории надежности.

Существенную роль в системе обеспечения единства измерений играют измерительные лаборатории, в деятельности которых существенное значение имеют два основных направления.

Первое – это объективное установление приписанной характеристики погрешности или ее составляющих для стандартизованных методик измерения (включая методики, оформленные в виде стандартов организации, имеющих ограниченную область применения). Второе направление связано с применением и установлением показателей качества методик (точности, прецизионности, правильности) т.е., по существу, с контролем качества измерений.

Стандарты серии ИСО 5725 совместно с ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000 конкретизируют требования к «Руководству по качеству лабораторий», регламентации процедур контроля стабильности результатов анализа, а также устраняют противоречия между разными системами аккредитации измерительных и испытательных лабораторий. Основными направлениями практической деятельности измерительных лабораторий являются: прямое применение международных правил для оценки качества методик измерений, испытаний, анализа и участие лабораторий в межлабораторных экспериментальных по оценке точности (правильности и прецизионности) измерений (при разработке и последующей аттестации и стандартизации).

В процессе межлабораторных экспериментов выявляется уровень внутрилабораторного контроля качества (точности) измерений и испытаний и подтверждается компетентность лаборатории при их аккредитации. Согласно системе аккредитации аналитических лабораторий компетентность лаборатории доказывается способностью гарантировать и подтверждать качество получаемых результатов в установленных пределах повторяемости (сходимости) r и воспроизводимости R . Эти пределы понимаются как расхождения между двумя результатами измерений, полученными соответственно в условиях повторяемости (т.е.

между двумя повторами или между двумя параллельными определениями) и в условиях воспроизводимости (т.е. в разных лабораториях) и характеризуются значениями, которые с доверительной вероятностью $P = 0,95$ не превышают абсолютной разности между результатами этих измерений (испытаний).

Для двух независимых результатов измерений стандартное отклонение есть $\sigma\sqrt{2}$, а их размах оценивается как $f\sigma\sqrt{2}$, где f – коэффициент критического диапазона, для нормального распределения при $P = 0,95$ значения $f = 1,96$. Тогда сопоставление разностей двух результатов измерений в условиях повторяемости и воспроизводимости должно осуществляться с пределом повторяемости $r = 1,96\sigma_r\sqrt{2}$ и, соответственно, с пределом воспроизводимости $R = 1,96\sigma_R\sqrt{2}$, где σ_r и σ_R – соответственно стандартные отклонения.

Оценка показателей точности измерений производится экспериментальным путем в условиях, когда измерения производятся представительным рядом лабораторий по стандартизованным методикам и на одних и тех же или идентичных объектах, при этом идентичность должна обеспечивать практическое совпадение оценок дисперсий повторяемости.

Межлабораторные эксперименты (сличения), по существу, являются инструментом контроля, позволяющего оценить состояние измерений с точки зрения их эквивалентности в отдельной области измерений, их соответствия заявленным характеристикам точности.

Проведение межлабораторных сличений возможно на различных организационных уровнях: от региональных до межгосударственных (глобальных), что существенно важно в практическом обеспечении единства измерений.

Важной составной частью оценки результатов межлабораторных сличений является регламентация анализа совместимости и процедур нахождения и оценки выбросов, изложенных в ГОСТ О ИСО 5725-2002.

Статистика межлабораторной (h) и внутрилабораторной (k) совместимостей основывается на статистике Манделя, использующей две меры (h и k) для характеристики внутриэлементных результатов определенного уровня.

Выбросами считаются результаты, в определенном смысле несовместимые с остальными. Статистическое тестирование межлабораторных экспериментов и анализ выбросов рекомендуется производить с использованием критериев Кохрена и Граббса.

Критерий Кохрена представляет собой отношение наивысшей дисперсии к средней и определяет степень совместимости внутрелабораторных дисперсий в базовых элементах. Критерий Кохрена можно применять лишь тогда, когда все стандартные отклонения (дисперсии) получены в условиях повторяемости при одном и том же числе результатов измерений в базовом элементе.

Критерий Граббса, как и другие критерии отбраковки результатов, опирается на гипотезу о нормальном законе распределения.

В настоящее время развиваются процессы глобализации экономики и ликвидации барьеров в торговле, что делает воспроизводимость результатов измерений важнейшей характеристикой совместимости измерительных лабораторий и испытательных центров, занимающихся измерениями, испытаниями в определенных областях. Воспроизводимость является также характеристикой степени совершенства той или иной методики измерений, когда измерения выполняются в разных местах и соответственно разными лабораториями.

Оценка и подтверждение соответствия испытательных центров и измерительных лабораторий являются важнейшими этапами метрологического обеспечения как на производстве, так и при эксплуатации технических объектов, практического использования измерительных методов и средств (оборудования) во всех сферах общественной деятельности.

Подтверждение соответствия может быть результатом оценки соответствия только тогда, когда объект или результат соответствует предъявляемым к ним требованиям, что устанавливается результатом измерений, испытаний, анализом фактических данных.

Для метрологических целей разработана целая система ГОСТ Р ИСО 5725-2002, европейская директива по измерительным приборам (MID), где детально проработаны требования к соответствию методов и результатов измерений и испытаний. Цель метрологического обеспечения единства измерений состоит не только в оценке соответствия аналитических лабораторий и центров, методик и средств измерений, но и в упорядочении требований законодательного метрологического контроля, которое означает контроль использования средств измерения для охраны здоровья, общественного порядка и безопасности, защиты окружающей среды, защита потребителей и свободной торговли.

Основные требования к приборам обычно излагаются применительно к характеристикам, например допустимым погрешностям, уровню воспроизводимости, надежности, пригодности и долговечности, на-

личию защиты от искажения. Измерительный прибор обязательно должен иметь следующие надписи для оценки соответствия при его размещении на рынке:

- торговая марка изготовителя;
- информация о точности измерений;
- данные об условиях использования;
- идентификационная маркировка;
- номер сертификата экспертизы типа.

Представлены испытательные программы, которые разделены в зависимости от условий применения: программа 1 – электромагнитная среда, программа 2 – климатическая среда, программа 3 – механическая среда, программа 4 – энергоснабжение, программа 5 – долговечность.

Прибор или подсистема подвергаются испытаниями и проверке соответствия номинальных условий применения требованиям соответствующего инструментального приложения.

Сформулированы основные правила определения погрешностей (неопределенностей). Так, погрешности (неопределенности) должны быть определены при нормальных условиях испытаний. Если подлежит оценке эффект одной влияющей величины, все другие факторы должны сохранять установленные нормальные значения. По правилам испытаний применение каждой влияющей величины и ее эффект оцениваются отдельно.

Метрологическое испытание должно выполняться в течение или после приложения влияющей величины в условиях, соответствующих нормальному эксплуатационному состоянию прибора.

3.4. Вопросы для самоконтроля

1. Какова сфера интересов метрологии как науки?
2. В каком году в России был принят Закон «Об обеспечении единства измерений»?
3. Каковы цели Закона «Об обеспечении единства измерений»?
4. Перечислите основные понятия Закона «Об обеспечении единства измерений».
5. Какие совокупные характеристики обеспечивают надлежащее качество продукции?
6. В чем выражается связь метрологии со стандартизацией?
7. На каких принципах основано единство измерений?

8. Классификация эталонов, обеспечивающих единство измерений, воспроизведение единиц и передачу размера рабочим средствам измерений.

9. Перечислите основные единицы Международной системы единиц СИ.

10. Почему измерения в волоконной оптике относятся к области нанотехнологий?

11. Укажите диапазон измерений основных физических величин в наноиндустрии.

12. Перечислите виды микроскопии в нанотехнологиях.

13. Какие свойства состояния измерений определяют их качество?

14. Каковы цели метрологического обеспечения единства измерений?

15. Какие надписи для оценки соответствия обязательно должен иметь измерительный прибор при его размещении на рынке?

4. КОНТРОЛЬ, ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

4.1. Основные понятия и определения

Известно, что одними из фундаментальных научных понятий являются понятия *физическая величина* и *информация*. При этом первое представляет собой общее в качественном отношении, но индивидуальное в количественном отношении свойство физических объектов – физических систем, их состояний и происходящих в них процессов. Второе же понятие определяет воспринимаемые специальным устройством сведения об окружающем мире и протекающих в нем процессах в виде *сигналов* той или иной физической природы. Следовательно, если физическая величина отражает свойство физического объекта или явления, то сигнал опосредствованно отражает это свойство. При этом как физическая величина, так и сигнал определяются вспомогательными характеристиками, т. е. их *параметрами*. Физический процесс является движущейся материей и характеризуется многомерной интенсивностью, а также протяженностью во времени и пространстве, поэтому сигнал в общем случае является материальным воплощением информации в виде определенного физического процесса, например изменения интенсивности оптического излучения по определенному закону. Следовательно, сигнал также является физической величиной с изменяющимися одним или несколькими параметрами, которые подлежат измерению или могут быть измерены с гарантированной точностью и достоверностью.

Измерением называют определение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. К этим техническим средствам относятся меры, измерительные преобразователи (датчики), измерительные приборы, измерительные системы.

Меры – это эталоны, служащие для хранения и воспроизведения единиц измерений.

Измерительным преобразователем называют средство измерения, служащее для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя. К измерительным преобразователям можно отнести мембрану, пружину, электронный усилитель и др.

Измерительный прибор предназначен для получения сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительная система – совокупность измерительных преобразователей и приборов, обеспечивающих измерение физической величины без участия человека.

В общем случае понятие *измерение* подразумевает нахождение значения *физической величины* опытным путем с помощью специальных технических средств, хранящих в явном или неявном виде единицу этой величины. При этом средство измерений, предназначенное для воспроизведения и/или хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах, носит название *меры*. Здесь размер количественно определяет физическую величину, а значение физической величины является оценкой ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Следует различать *истинное* и *действительное* значения физической величины, первое из которых отражает в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта, а второе находится экспериментальным путем и настолько близко к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить. Значение же величины, полученной путем ее измерения, носит название *результат измерения*, который в той или иной степени соответствует истинному значению физической величины. Поэтому основной характеристикой измерения является *точность*, определяемая таким понятием, как *погрешность измерения*. Погрешность измерения представляет собой отклонение результата измерения X от истинного значения измеряемой величины X_n и в общем случае определяется вероятностью – количественным правдоподобием измеряемой случайной величины результатам измерения.

Другим понятием, часто используемым совместно с измерением, является *контроль*. Контроль в общем случае представляет собой процесс установления соответствия между состояниями и свойствами объекта или процесса заданной норме путем восприятия контролируемых величин, сопоставления их с установками и формирования суждения-вывода. При этом *нормой* называется область в пространстве состояний физического объекта или процесса. Таким образом, контролю подвергается объект или параметры процесса с получением результата, являющегося их качественной характеристикой, – вывода о нахождении объ-

екта контроля в норме или вне нормы (исправен или неисправен, соответствует или не соответствует). В ряде случаев контроль может осуществляться техническими средствами – *устройствами* или *системой контроля*. В последнем случае процедуры измерения и контроля близки по своей информационной сущности и, как будет показано ниже, включают ряд общих операций.

При нахождении параметра в области пространства состояний техническими средствами контролируемый параметр представляется в виде, адекватном заданной области, и выражен физической величиной определенных размеров. *Результат контроля* в этом случае представляет собой соответствие или несоответствие значения контролируемой величины заданной норме. Поэтому контроль характеризуется *достоверностью контроля* – вероятностью нахождения контролируемой величины в норме или вне нормы. Измерение и контроль имеют ряд отличий:

- результатом измерения является количественная характеристика, а результатом контроля – качественная;
- измерение осуществляется в широком диапазоне измеряемой величины, а контроль выполняется в ограниченной области возможных состояний контролируемого параметра;
- основной характеристикой измерения является погрешность измерения, а основной характеристикой процесса контроля является достоверность результата контроля.

В то же время для определения соответствия контролируемой величины норме необходимо сравнить ее значение со значением меры, т. е. вначале выполнить процедуру измерения, а затем результат измерения сопоставить с нормой. Если норма реализована в мере, то результатом контроля является результат измерения, выраженный полученным значением или его знаком. Таким образом, измерение обязательно предшествует контролю.

Учитывая специфику контроля в волоконной оптике, представляется целесообразным в данной области использовать понятие *тестирование*. Его можно сформулировать как процесс установления опытным путем соответствия состояний и свойства *физической величины* заданной норме с помощью специальных технических средств, хранящих в явном или неявном виде единицу или множество единиц этой величины. Полученное путем тестирования отношение порядка или соотношение между размерами однородных величин определяет соответствие вида больше–меньше или приблизительно равно и носит название *ре-*

зультат тестирования, который соответствует или не соответствует заданной норме. Поэтому основной характеристикой тестирования является *достоверность тестирования*, выражаемая из-за наличия процедуры измерения *погрешностью тестирования* – количественным правдоподобием тестируемой случайной величины результатам тестирования на границах нормы.

При использовании волокон в устройствах связи особое место в области контроля занимает понятие *анализ протоколов* передачи данных, которое требует особо тщательного рассмотрения, так как на первый взгляд принципиально отличается от счета, измерения и тестирования. Поэтому вначале определим понятие *протокол* как набор правил или стандартов, регламентирующих соединение и обмен информацией через оптоволокна с минимальными ошибками. Учитывая информационную сущность правил и стандартов, которые в системах связи представляются закодированными соответствующим образом сигналами, анализ протоколов можно рассматривать с позиций выполнения операций над физическими величинами – кодовыми сигналами с помощью специальных технических средств.

В этом случае анализ протоколов передачи данных можно определить как процесс нахождения опытным путем равнозначности физической величины заданной норме с помощью специальных технических средств, хранящих в явном или неявном виде совокупность единиц этой величины. Здесь физическая величина отражает процесс соединения и обмена информационными сигналами при передаче данных в системах телекоммуникаций, а норме соответствует определенная совокупность дискретных состояний этой физической величины. Очевидно, что результат анализа в этом случае является качественной характеристикой процессов и выражен в виде соответствия или несоответствия норме.

Равнозначность или неравнозначность однородных величин, полученная рассматриваемым путем, носит название *результат анализа протоколов*, который может соответствовать или не соответствовать заданной норме. Основной характеристикой анализа протоколов также является *достоверность анализа*, выражаемая из-за наличия элементарных измерительных процедур *ошибкой анализа*, определяемой количественным правдоподобием результата анализа анализируемой величине. Следовательно, в общем случае анализатор протоколов представляет собой техническое средство контроля, однако, учитывая, что под анализом в общем случае можно понимать метод исследования пу-

тем рассмотрения отдельных стадий, свойств и составных частей объекта и что название *анализатор протоколов* уже укоренилось, на практике используется этот термин в контексте средств контроля.

Поскольку контроль включает измерение, тестирование и анализ протоколов и их комбинацию, а с позиций обеспечения *единства контроля* представляет собой *метрологический контроль*, преследующий цель проверки соблюдения установленных метрологических правил и норм, одноименные технические средства называются средствами достижения задачи контроля.

4.2. Методы контроля и измерения физических величин

Физические величины разделяют на *непрерывные* и прерывистые – *дискретные* во времени и пространстве, а также *аналоговые* и *квантованные* величины, которые обладают соответственно бесконечным и конечным множеством значений по размеру. Разновидностью квантованных величин являются *кодовые сигналы*, представляющие собой одну из форм отражения объекта в определенных диапазонах размеров, расположения в пространстве, временного представления или условных символов, и поэтому они по своей сути ограничены и дискретны.

Так как передача информации через волокно осуществляется посредством сигналов, под измеряемой величиной будем подразумевать как физическую величину, определяющую среду распространения сигналов, так и сигнал, имеющие соответствующую форму представления. При этом процессы искусственного создания дискретных, квантованных и кодированных сигналов носят название дискретизации, квантования и кодирования соответственно.

Дискретизация непрерывного во времени сигнала $X(t)$ является линейной операцией умножения этого сигнала на функцию дискретизации во времени $\Delta^*(t)$, т.е.

$$X_{\text{дискр}}(t) = X(t)\Delta^*(t),$$

где $\Delta^*(t)$ является функцией Дирака в виде последовательности единичных импульсов с периодом повторения $T_{\text{ц}}$, длительностью, стремящейся к нулю, и амплитудой, равной единице, т. е.

$$\Delta^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \delta(t - kT_{\text{ц}}), \quad \delta(t - kT_{\text{ц}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } t = kT, \\ 0 & \text{при } t \neq kT. \end{cases} \quad (4.1)$$

В этом случае дискретный сигнал является последовательностью импульсов с площадью $X(kT_{ц})$, равной значению сигнала в моменты времени $kT_{ц} = t_k$, и аналитически описывается как

$$X_{\text{дискр}}(t) = \sum_{k=1}^n X(kT_{ц}). \quad (4.2)$$

Квантование по уровню – это операция создания сигнала, абсолютные или относительные размеры параметров которого имеют ограниченное число заданных значений. Квантованная величина в функции времени может быть выражена посредством ступенчатой функции, равной единице при положительном аргументе, и нулю – при отрицательном, и аналитически может быть представлена в виде

$$X_{\text{кв}}(t) = N_i(t_{Ni}) \Delta X_k \cdot 1(t - t_{Ni}), \quad (4.3)$$

где ΔX_k – ступень квантования представляет собой разность между соседними значениями квантованной величины $X(t)$; N_i – номер ступени квантования; t_{Ni} – момент времени текущего квантования.

Процессы дискретизации и квантования измеряемой величины и меры могут осуществляться как равномерно, так и неравномерно.

Кодирование, в отличие от дискретизации и квантования, – это операция перевода по определенным правилам формального объекта, выраженного совокупностью кодовых символов одного алфавита, в формальный объект, выраженный символами другого алфавита. При этом код является формой представления сообщений по определенным правилам, которые обеспечивают соответствие между кодируемыми сообщениями и совокупностями кодовых символов. При кодировании в качестве символов используют буквы алфавита, цифры в определенной системе счисления и условные знаки. В технике связи применяется *числовое кодирование*, представляющее собой в широком смысле операцию отображения объекта числами с результатом, который может быть как результатом измерения, так и не являться таковым. В общем случае кодовый сигнал можно представить в виде

$$X_{\text{код}} = \sum_{i=1}^{i=n} 2^{n-i} X_i, \quad (4.4)$$

где $X_i = (X_n, \dots, X_i, \dots, X_1)$ совокупность 2^n комбинаций переменных (разрядов кода) $X_i = 0$ или 1, представляющая свойства кодируемого сигнала. Одним из применений кодовых сигналов является создание квантованно-

дискретизированного сигнала, который может быть воспроизведен мерой, управляемой кодом $X_{\text{код}}(kT_{\text{ц}})$, воздействующим в течение определенного времени, и аналитически может быть представлен в виде

$$X_{\text{кв дискр}}(t) = \sum_{k=1}^n X_{\text{код}}(kT_{\text{ц}}) \Delta x_k. \quad (4.5)$$

Методы контроля

Для рассмотрения методов контроля вначале сформулируем понятия методов измерения, тестирования и анализа протоколов, являющихся разновидностью контроля.

Анализ методов измерений является основным разделом метрологии, и в связи с расширением понятия измерения расширяется понятие и метода измерения. В настоящее время *метод измерения* трактуется как прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным *принципом измерений* того физического явления или эффекта, который положен в основу измерений. Последние осуществляются соответствующим *средством измерений*, под которым подразумевается техническое средство, используемое при измерениях и имеющее *нормированные строго различимые* метрологические свойства, установленные для данного вида и типа средств измерений. Так, *вид средств измерений* представляет собой совокупность средств измерений, предназначенных для измерений физической величины одного вида. В то время как *тип средств измерений* представляет собой совокупность средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же конструкторской документации и технологии.

В соответствии с приведенным определением метода измерения можно сформулировать и современное понятие метода тестирования. Это – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее нормой в соответствии с реализованным *принципом тестирования* физического явления или эффекта, который положен в основу тестирования тем или иным *средством тестирования*.

Эти положения позволяют определить и метод анализа протоколов как приема или совокупности приемов нахождения равнозначности физической величины заданной норме в соответствии с реализованным *принципом анализа протоколов*, физического процесса соединения и обмена информационными сигналами, который положен в основу анализа протоколов тем или иным *средством анализа*. Очевидно, что вид и тип средств

тестирования и анализа протоколов будет иметь трактовку, аналогичную виду и типу средств измерений. Это позволяет рассматривать вопросы их использования для метрологического контроля и надзора в отрасли связи с единых позиций.

Таким образом, весь спектр контроля разделяется на измерения, тестирование и анализ протоколов, осуществляемые для механических, акустических, электрических, магнитных, электромагнитных, оптических и других физических величин. При этом следует различать *прямой контроль*, выполняемый в единицах контролируемой физической величины, и *косвенный контроль*, осуществляемый исходя из прямого контроля других величин, которые связаны с искомой величиной известной функциональной зависимостью. Оценка результата контроля в обоих случаях может быть дана в виде искомого значения, соответствия установленным нормам или равнозначности заданной норме. Здесь следует отметить, что при определении текущих значений параметров объекта контроля в установленных границах допусков с оценкой результата по принципу «годен – не годен» контроль называют *допусковым контролем*, а при определении абсолютных или относительных значений параметров или их отклонений от установленных норм – *количественным контролем*.

Как прямой, так и косвенный контроль могут осуществляться для одной или множества аналоговых, дискретных и кодированных величин либо одновременно, либо разновременно с последовательной, параллельной или случайной последовательностью выбора контролируемых величин. Так как последние отличаются мгновенными, средними и вероятностными характеристиками, следует различать и соответствующие методы контроля. Кроме этого, необходимо учитывать и пространственный фактор контроля, например *односторонний* и *двусторонний контроль*, в общем случае *многосторонний контроль*. При этом контроль может осуществляться непрерывно, периодически или в произвольные (случайно выбранные) моменты времени с представлением результата контроля в аналоговом и/или цифровом виде.

Так как для контроля функционирования могут использоваться внешние образцовые воздействия, например сигналы генераторов той или иной формы, различают *активный* и *пассивный контроль*. В последнем случае внешние воздействия отсутствуют.

По режиму выполнения контроля следует различать *ручной, автоматический* и *автоматизированный режимы*, осуществляемые только техническим персоналом, при частичном участии и без участия технического персонала соответственно.

В зависимости от режима работы оборудования системы передачи в процессе контроля следует различать контроль без прекращения функционирования оборудования, с прерыванием его функционирования и с прекращением некоторых функций оборудования.

При организации контроля само контролирующее оборудование может быть расположено непосредственно у объекта контроля или удалено от него на некоторое расстояние, поэтому следует различать *локальный* и *дистанционный контроль*, частным случаем которого является *централизованный контроль*, при котором управление процессом и получение результатов контроля сосредоточено в одном месте.

Учитывая, что контроль может осуществляться по одному или множеству величин с соответствующим числом используемых технических средств, различают *элементарный* и *комплексный контроль*, отличающиеся реализованными в технических средствах методами измерения, счета, тестирования и анализа протоколов. Для понимания измерений и тестирования волоконной оптики необходимо рассмотреть методы, общие для всех видов измерений и тестирования.

Методы измерений

По способу нахождения численного значения физической величины измерения подразделяются на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямые измерения – измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (например, измерение тока амперметром).

Косвенные измерения – измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям (например, определение значения сопротивления резистора $R=U/I$ по измеренным значениям напряжения U и тока I).

Совокупные измерения – измерения, производимые одновременно для нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения – измерения, производимые одновременно для двух или нескольких подготовительных величин при нахождении зависимости между ними. Например, измерение, при котором сопротивление резистора R_{20} при температуре $+20^{\circ}$ С и его температурные коэффициенты α , β находят по данным прямых измерений сопротивления R_t и температуры t , выполненных при разных температурах: $R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$.

Измерения могут выполняться с однократными или многократными наблюдениями.

Наблюдения при измерении – экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение из группы значений величин, подлежащих совместной обработке для получения результатов измерений. Результат наблюдения – результат величины, получаемой при отдельном наблюдении.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на *статические*, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени в процессе измерения, и *динамические*, при которых измеряемая величина изменяется в процессе измерения и является непостоянной во времени.

По способу выражения результатов различают *абсолютные* и *относительные* измерения.

Различают методы измерения двух видов: непосредственной оценки и сравнения с мерой.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, заранее градуированного в единицах измеряемой физической величины. Данный метод прост, наиболее распространен, хотя точность его невысока.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод по сравнению с методом непосредственной оценки более точен, но несколько сложен. Метод сравнения с мерой имеет следующие модификации:

- противопоставления;
- дифференциальный;
- нулевой;
- замещения;
- совпадения.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами. Метод применяют при измерении ЭДС, напряжения, тока. Характерным является наличие двух источников энергии.

Дифференциальный метод – метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод приме-

няют при измерении параметров цепей (сопротивления, индуктивности, взаимной индукции, емкости) напряжения и др.

Нулевой метод – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля.

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой в сочетании с явлением резонанса на высоких частотах. Он позволяет исключить паразитные параметры и обеспечить высокую точность.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов. Метод применяют при измерении частот, приеме точных сигналов времени.

Все методы измерения разделяются на абсолютные и относительные (сравнительные), прямые и косвенные, комплексные и дифференцированные, контактные и бесконтактные. Кроме того, измерения, проводимые после изготовления детали, относятся к пассивным методам, а измерения, выполняемые непосредственно в процессе изготовления продукции, когда оборудованию дается команда по введению поправки на износ инструмента, – к активным. Основными средствами измерения являются меры универсальные, измерительные средства и специальные измерительные средства.

Меры длины выпускаются в виде плоскопараллельных концевых мер (прямоугольных параллелепипедов и цилиндров) по четырем классам точности. Их погрешности очень малы. Например, срединное отклонение длины концевой меры номинального размера, равного 100 мм, составляет 0,0005 мм для 1-го класса и 0,0003 мм для 0-го класса. Для измерения углов применяют угловые меры (плитки), изготавливаемые по двум классам – 1 и 2.

Абсолютные измерения можно выполнять следующими инструментами: штангенциркулем, штангенглубиномером, микрометром, угломером и др., которые относятся к универсальным измерительным средствам. Все эти инструменты имеют штриховые шкалы (линейки или лимбы). Повышение точности отсчета, связанное с оценкой доли деления шкалы, осуществляется с помощью специальных устройств – нониусов. Специальные измерительные средства изготавливают для определенных, конкретных контрольных операций.

К приборам для абсолютного измерения относятся универсальные и инструментальные микроскопы, проекторы. Для относительных (срав-

(сравнительных) измерений используются индикаторы часового типа, миниметры, микрометры, интерферометры и др.

Методы тестирования

При тестировании контроль основан на сопоставлении физической величины X и заданной нормы X_0 с получением результата в виде соответствует-не соответствует. Выходная функция тестирования принимает значение, равное 0, только при равенстве тестируемой величины X и X_0 . В противном случае результат сравнения равен 1, что свидетельствует об отрицательном результате тестирования.

Методы анализа протоколов

В отличие от методов измерений и тестирования процедура анализа протоколов осуществляется только с использованием логических операций. Поэтому данные методы делятся по виду сравниваемых кодов, особенностям протоколов, способам их выделения из битовых потоков и др.

Выходная функция анализа протоколов принимает значение, равное 0, только при равенстве одноименных битов X , и N_m или при полном совпадении тестируемого протокола заданному (определяемому стандартом) протоколу. В противном случае результат сравнения может быть представлен в виде неких кодов неравнозначности блоков протокола, в соответствии с которыми формируются сообщения о результате анализа.

4.3. Оценка погрешности измерений

Отличие результата измерения от истинного значения объясняется несовершенством средств измерений, несовершенством способа применения средств измерений, влиянием условий выполнения измерения, участием человека с его ограниченными возможностями. Разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины называется *погрешностью измерений (ошибкой измерений)*.

Различают три типа погрешностей измерений: грубые ошибки (промахи), систематические и случайные погрешности.

Грубые ошибки, или *промахи*, обусловлены неисправностью измерительной аппаратуры либо ошибками экспериментатора в отсчете или записи показаний приборов. Эти результаты нужно отбрасывать и взамен проводить новые измерения.

Систематическими погрешностями измерений называются погрешности, которые при многократном измерении одной и той же величины остаются постоянными либо изменяются по определенному зако-

ну. Систематические погрешности включают в себя методические и инструментальные (приборные) погрешности измерений.

Методические погрешности вызываются недостатками применяемого метода измерений, несовершенством теории физического явления и неточностью расчетной формулы, используемой для нахождения измеряемой величины. Эти погрешности можно уменьшить путем совершенствования метода измерений, а также путем введения уточнений в расчетную формулу.

Инструментальные, или приборные, погрешности вызываются несовершенством конструкции и неточностью изготовления измерительных приборов (например, небольшое различие в длинах плеч рычажных весов, изменение хода стрелки прибора при изменении температуры и т.п.). Уменьшение этих погрешностей достигается применением более совершенных и точных приборов, однако полностью устранить эти погрешности невозможно.

Случайными погрешностями измерений называются погрешности, абсолютная величина и знак которых изменяются при многократных измерениях одной и той же физической величины. Эти погрешности вызываются многими факторами, не поддающимися учету. Полностью избавиться от случайных погрешностей невозможно, но их можно уменьшить путем многократного повторения измерений. При этом происходит частичная компенсация случайных отклонений результатов измерений в сторону завышения и в сторону занижения. Расчет случайных погрешностей производится методами теории вероятностей и математической статистики.

За наиболее достоверное значение непосредственно измеряемой физической величины x принимают среднее арифметическое $\langle x \rangle$ (иногда обозначают как (\bar{x})) из всех n результатов ее измерений – x_1, x_2, \dots, x_n :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.6)$$

Окончательный результат измерения величины x представляют в форме

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x, \quad (4.7)$$

где Δx – положительная величина, называемая *абсолютной погрешностью* найденного значения x .

Относительной погрешностью значения x называется отношение

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}. \quad (4.8)$$

Надежностью полученного результата измерения физической величины X называется вероятность P того, что истинное значение величины x лежит в интервале от $\langle x \rangle - \Delta x$ до $\langle x \rangle + \Delta x$.

Систематические погрешности

Систематические погрешности оцениваются на основе анализа метода измерения и используемых средств измерения. Все систематические погрешности, поддающиеся исключению, должны быть устранены еще до начала обработки экспериментальных данных путем введения соответствующих поправок к ним. Инструментальная (приборная) погрешность определяется на основе паспортных данных прибора, его класса точности, точности нониуса, шкалы прибора и т.д.

Формула для расчета максимальной абсолютной приборной погрешности $\Delta x_{\text{приб}}$ имеет вид

$$\Delta x_{\text{приб}} = K \cdot x_{\text{max}} / 100, \quad (4.9)$$

где K – класс точности прибора; x_{max} – верхний предел измерений прибора (либо данного его диапазона).

Применяются следующие классы точности приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Обозначение класса точности прибора записывается на его шкале в виде соответствующего числа. Например, для амперметра класса $K = 0,5$ в диапазоне измерений до $I_{\text{max}} = 2$ А $\Delta I_{\text{приб}} = 0,5 \cdot 2 / 100 = 0,01$ А. В качестве стандартной систематической погрешности этого амперметра можно принять половину от $\Delta I_{\text{приб}}$, то есть 0,005 А.

Если класс точности прибора не указан и в паспорте прибора нет данных относительно его инструментальной погрешности, то считают, что эта погрешность равна половине цены наименьшего деления шкалы прибора. В случае прибора, стрелка которого перемещается не равномерно, а «скачками» (например, у ручного секундомера), приборную погрешность считают равной цене деления шкалы.

Погрешность округления при измерениях равна произведению надежности на половину цены наименьшего деления шкалы прибора. Погрешность округления приближенных чисел при вычислениях равна половине единицы того разряда, который имеет сомнительные цифры.

Случайные погрешности

Если каждое из n измерений физической величины проделать N раз, то непрерывный диапазон возможных значений величины x разбивается на некоторое количество интервалов. При $N \rightarrow \infty$ распределение измерений стремится к непрерывной симметричной колоколообразной кривой, называемой *предельным распределением*.

График предельного распределения определяет непрерывную гладкую функцию $f(x)$, представленную на рис. 4.1. Доля измерений, которые попадают в любой малый интервал dx (от x до $x+dx$), равна площади на графике $f(x)dx$. Доля измерений, которые попадают в конечный интервал между $x = a$ и $x = b$, равна площади под кривой, ограниченной на оси Ox отрезком ab (рис. 4.1). Но эта площадь вычисляется с помощью определенного интеграла от $f(x)$. Таким образом, мы получили

важный результат: значение интеграла $\int_a^b f(x) dx$ равно доле измерений,

попадающих в интервал от $x = a$ до $x = b$. Таким образом, значение интеграла есть вероятность того, что результат любого единичного измерения попадет в интервал $[a; b]$. Тогда $f(x)dx$ – вероятность того, что любое единичное измерение приведет к результату, лежащему в интервале от x до $x + dx$, то есть внутри dx .

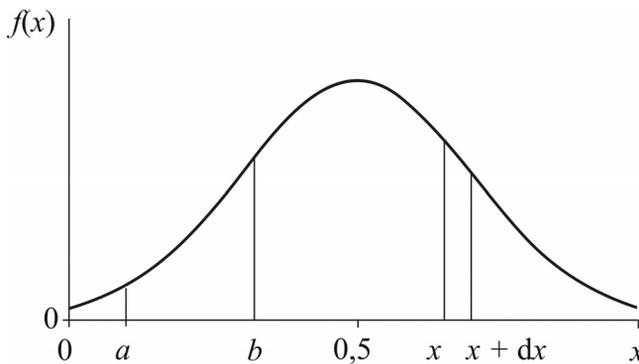


Рис. 4.1. График предельного распределения

Условие нормировки предельного распределения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (4.10)$$

означает, что вероятность получения любого единичного измерения в пределах изменения измеряемой величины от $-\infty$ до $+\infty$ равна 1. Гео-

метрически это означает, что площадь под всей кривой предельного распределения равна 1.

В нормировочном интеграле стоят бесконечные (в математическом смысле) пределы. Применительно к нашему случаю это означает, что мы не знаем действительной величины конечных пределов измеряемой переменной x и поэтому берем «с запасом», кроме того, сама функция распределения $f(x) \rightarrow 0$ достаточно быстро у границ диапазона разброса измеренных значений величины x . Функция предельного распределения $f(x)$ предсказывает, как были бы распределены результаты после очень многих измерений величины x с помощью данной измерительной аппаратуры.

Зная математическое выражение функции $f(x)$, можно рассчитать ряд важных величин:

а) среднее значение величины

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx ; \quad (4.11)$$

б) величину стандартного отклонения

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 \cdot f(x) dx . \quad (4.12)$$

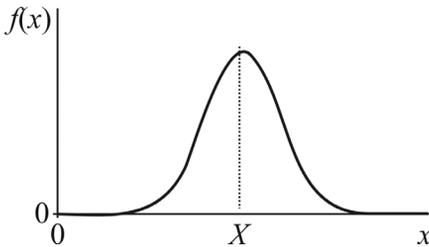


Рис. 4.2. Функция Гаусса

В этом случае измеренные значения распределяются по колоколообразной кривой, центр которой совпадает с истинным значением X физической величины x (рис. 4.2). В математике функция, график которой имеет форму колоколообразной кривой, называется функцией Гаусса или функцией нормального распределения. Вид этой функции:

$$\Phi = e^{-x^2/2\sigma^2} = \exp\{-x^2/2\sigma^2\} , \quad (4.13)$$

где σ – параметр распределения, который называется *параметром ширины* или *шириной*. График функции представлен на рис. 4.3.

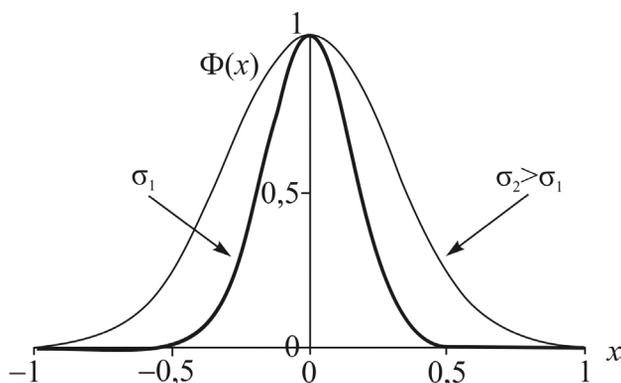


Рис. 4.3. Функция Гаусса при различных параметрах ширины

Перечислим некоторые свойства функции Гаусса:

- 1) при $x = 0$ $\Phi = 1$ для любого σ ;
- 2) функция симметрична относительно $x = 0$, т.е. $\Phi(x) = \Phi(-x)$;
- 3) при увеличении $|x|$ функция Φ убывает быстрее при меньших значениях параметра σ .

Чтобы центр кривой приходился не на $x = 0$, как в предельном распределении (см. рис. 4.2), а на $x = X$, сделаем замену: $x \rightarrow x - X$, тогда вид функции Гаусса изменится:

$$\Phi_X = e^{-(x-X)^2/2\sigma^2}. \quad (4.14)$$

Теперь $\Phi_X = 1$ при $x = X$. Нижний индекс X у обозначения функции означает, что максимум (центр) функции находится в точке $x = X$.

Пока ни функция Φ , ни функция Φ_X не описывают предельное распределение множества измерений величины x . Это связано с тем, что предельное распределение $f(x)$ должно быть нормировано, то есть должно удовлетворять условию

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1. \quad (4.15)$$

Введем нормировочный множитель A и представим функцию нормального распределения в виде

$$f(x) = A \cdot e^{-(x-X)^2/2\sigma^2}. \quad (4.16)$$

Значение коэффициента A найдем из условия нормировки

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} A \cdot e^{-(x-X)^2/2\sigma^2} dx = 1. \quad (4.17)$$

Сделаем замену переменных: $z = (x - X) / \sigma$ и условие нормировки преобразуем к виду

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = A\sigma \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz = 1. \quad (4.18)$$

В результате получился известный интеграл математической физики – *интеграл Пуассона*

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz = \sqrt{2\pi}. \quad (4.19)$$

Теперь условие нормировки преобразуем к виду

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = A\sigma\sqrt{2\pi} = 1, \text{ откуда } A = 1/\sigma\sqrt{2\pi}. \quad (4.20)$$

Окончательно *нормированная функция Гаусса*, или *нормированная функция нормального распределения случайных величин*, – результатов измерений физической величины x – имеет вид

$$f_{X,\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-X)^2/2\sigma^2}, \quad (4.21)$$

где два нижних индекса у f являются *параметрами распределения* и означают следующее: X – *центр функции*; σ – *ширина распределения*.

График функции представлен на рис. 4.4. Здесь кривая с σ_1 имеет более острый пик, что соответствует более точным измерениям, которые «собраны» возле истинного значения X ; кривая с $\sigma_2 > \sigma_1$ имеет более пологий вид, это соответствует измерениям, проведенным с меньшей точностью. Площади под обеими кривыми равны 1, что следует из условия нормировки, поэтому высота кривых разная.

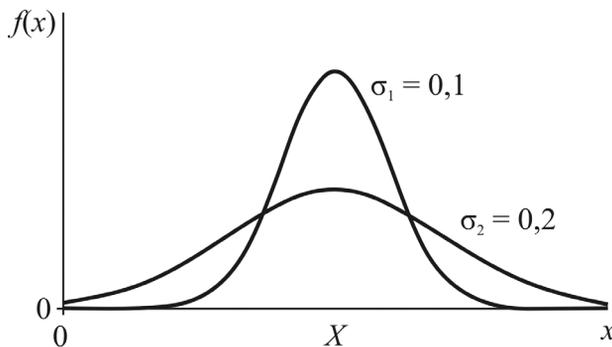


Рис. 4.4. Нормированная функция Гаусса при разной ширине распределения

Говорят, что результаты измерений x распределены нормально, если их предельное распределение описывается нормированной функцией Гаусса с центром на истинном значении X , а на результаты оказывали влияние только случайные ошибки.

Если известно предельное распределение для очень большого числа измерений – значения X и σ функции Гаусса, то можно вычислить \bar{x} :

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_{X,\sigma}(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x e^{-(x-X)^2/2\sigma^2} dx. \quad (4.22)$$

Сделаем замену переменных $y = x - X$ и исходный интеграл разобьем на два интеграла:

$$\bar{x} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} y e^{-y^2/2\sigma^2} dy + X \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2/2\sigma^2} dy \right\}. \quad (4.23)$$

Первый интеграл равен нулю, так как подынтегральная функция нечетная, второй интеграл нам уже встречался ранее при нормировке функции распределения. Сделаем еще одну замену переменных $z = y / \sigma$, после чего получим интеграл Пуассона

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2/2\sigma^2} dy = \sigma \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz = \sigma\sqrt{2\pi}. \quad (4.24)$$

Окончательно получим

$$\bar{x} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} X \sigma\sqrt{2\pi} = X; \quad \bar{x} = X. \quad (4.25)$$

Таким образом, если результаты измерений получены в соответствии с распределением Гаусса, то в случае очень большого числа измерений среднее арифметическое \bar{x} равно истинному значению X , которое соответствует центру функции Гаусса.

Вычислим стандартное отклонение, зная вид функции Гаусса:

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 f_{X,\sigma}(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - X)^2 e^{-(x-X)^2/2\sigma^2} dx. \quad (4.26)$$

Здесь мы воспользовались полученным результатом $\bar{x} = X$. Для вычисления интеграла сделаем замену переменных $z = (x - X) / \sigma$, тогда

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} z^2 e^{-z^2/2} dz. \quad (4.27)$$

Получился еще один известный интеграл математической физики

$$\int_{-\infty}^{+\infty} z^2 \hat{a}^{-z^2/2} dz = \sqrt{2\pi}. \quad (4.28)$$

Окончательно получаем

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{2\pi} = \sigma^2; \quad \sigma_x^2 = \sigma^2. \quad (4.29)$$

Таким образом, параметр ширины σ функции Гаусса $f_{X,\sigma}(x)$ есть просто стандартное отклонение, которое мы получили бы в результате очень многих измерений.

Вычислим вероятность $P(\sigma)$ того, что результат единичного измерения (если результаты измерений распределены нормально) окажется в пределах одного стандартного отклонения σ от истинного значения X : $X - \sigma \leq x \leq X + \sigma$. Обозначим $P(\sigma) = P(X - \sigma \leq x \leq X + \sigma)$, тогда

$$P(\sigma) = \int_{X-\sigma}^{X+\sigma} f_{X,\sigma}(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{X-\sigma}^{X+\sigma} \hat{a}^{-(x-X)^2/2\sigma^2} dx. \quad (4.30)$$

Величина интеграла равна площади фигуры S на рис. 4.5. Для вычисления интеграла сделаем подстановку $z = (x-X) / \sigma$, тогда в новых переменных получим

$$P(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^{1} \hat{a}^{-z^2/2} dz. \quad (4.31)$$

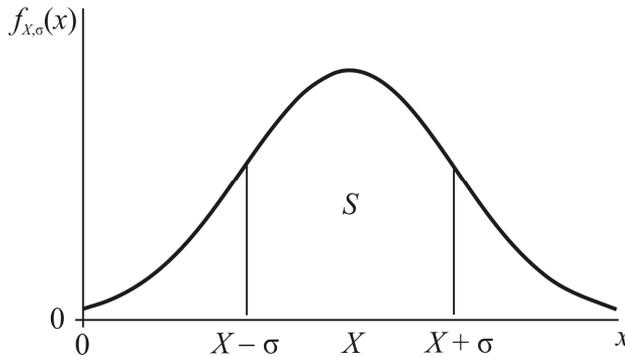


Рис. 4.5. К определению вероятности

Обобщим рассмотрение. Будем искать вероятность $P(t\sigma)$ того, что единичный результат будет лежать в пределах $X - t\sigma \leq x \leq X + t\sigma$, где t – любое положительное число. Тогда после аналогичных преобразований получим

$$P(t\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^t e^{-z^2/2} dz. \quad (4.32)$$

Это стандартный интеграл математической физики называется *интегралом (функцией) ошибок* и обозначается как $\text{erf}(t)$.

График функции $P(t\sigma)$ изображен на рис. 4.6, из которого следует, что с увеличением t вероятность $P(t\sigma)$ быстро стремится к 100 %. При $t = 1$ $P(t\sigma) = 68$ %. Это означает, что вероятность того, что результат единичного измерения окажется в пределах одного стандартного отклонения от истинного значения X : $X - \sigma \leq x \leq X + \sigma$, составляет 68 %.

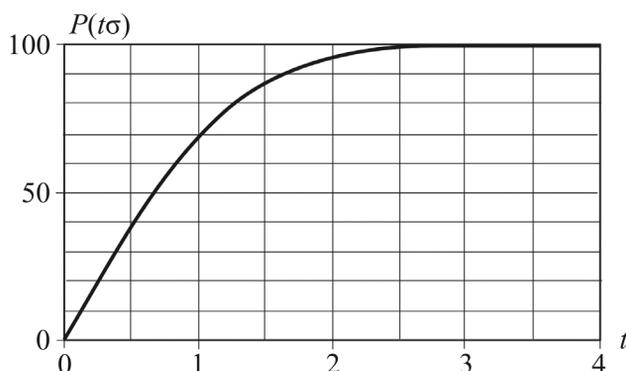


Рис. 4.6. Функция ошибок

Для результатов измерений, которые распределены нормально, вводится еще одно понятие – *вероятная ошибка*: $P(t\sigma) = 50$ % при значении $t = 0,674$.

На практике число измерений ограничено ($n \approx 10$). Интервал $\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$, в который с определенной вероятностью α попадает истинное значение X (или x_0), называется *доверительным интервалом*, а вероятность α называется *доверительной вероятностью* или *надежностью*.

При недостаточно большом числе измерений распределение случайных величин имеет несколько иной, отличный от гауссовского, характер. В этом случае вместо коэффициента t вводится *коэффициент Стьюдента* $t_{\alpha,n}$, зависящий от числа проведенных измерений n и от величины надежности α

$$t_{\alpha,n} = \Delta x_{\text{случ}} / \Delta S,$$

где $\Delta S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n(n-1)}$ – среднеквадратичная погрешность всей серии измерений.

Распределение Стьюдента было введено в 1908 г. английским математиком и химиком В. Госсетом, опубликовавшим свои работы под псевдонимом Student – студент. Значения $t_{\alpha,n}$ табулированы.

При $n \rightarrow \infty$ $\Delta S \rightarrow \sigma_{\bar{x}}$, то есть переходит в стандартное отклонение среднего, а $t_{\alpha,n} \rightarrow t$.

Естественно, что при заданной надежности α доверительный интервал $2\Delta x = 2t_{\alpha,n} \cdot \Delta S$ при малом числе измерений n должен быть шире, чем в случае нормального распределения. Например, в случае распределения Гаусса при $P = 95,4\%$ значение $t = 2$, тогда как распределение Стьюдента при $\alpha = 95\%$ дает: $t_{\alpha,n} = 2,78$ при $n = 5$; $t_{\alpha,n} = 2,26$ при $n = 10$; $t_{\alpha,n} = 2,09$ при $n = 20$.

Если результаты измерений описываются нормальным распределением $f_{x,\sigma}(x)$ и нам известны параметры X и σ , то вероятность получения результата вблизи x_1 в малом интервале dx_1 , то есть от x_1 до $x_1 + dx_1$, есть (рис. 4.7)

$$dP(x_1) = f_{x,\sigma}(x_1) dx_1 = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x_1-x)^2/2\sigma^2} dx_1 \quad (4.33)$$

или

$$P(x_1) \approx \frac{1}{\sigma} e^{-(x_1-x)^2/2\sigma^2} .$$

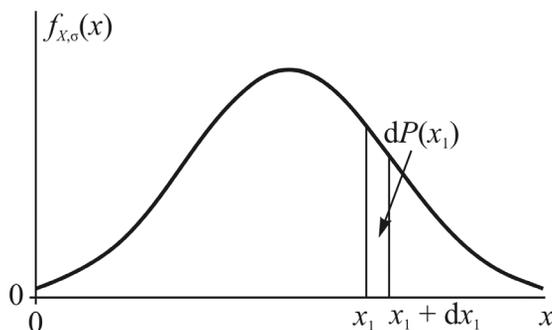


Рис. 4.7. Геометрическая интерпретация вероятности

Вероятность получения второго результата x_2 есть

$$P(x_2) \approx \frac{1}{\sigma} e^{-(x_2 - X)^2 / 2\sigma^2}$$

На практике обычно имеется конечное число N измеренных значений какой-либо величины x , и мы не знаем предельного распределения. Чтобы найти наилучшие оценки для X и σ , основываясь на этих имеющихся N измеренных x : x_1, x_2, \dots, x_N , необходимо решить обратную задачу.

Введем *статистический принцип максимального правдоподобия*. Вероятность возможности получения всей совокупности N независимых измерений равна произведению отдельных вероятностей для каждого отсчета x_1, x_2, \dots, x_N . (Вероятность одновременной реализации нескольких независимых событий равна произведению вероятностей каждого события в отдельности.) Таким образом, можно записать

$$P_{X,\sigma}(x_1, \dots, x_N) = P(x_1) \cdot \dots \cdot P(x_N) \approx \frac{1}{\sigma^N} e^{-\sum_{i=1}^N (x_i - X)^2 / 2\sigma^2}. \quad (4.34)$$

В соответствии с принципом максимального правдоподобия для данных N значений x_1, x_2, \dots, x_N наилучшими оценками X и σ будут такие, для которых значения величин x_1, x_2, \dots, x_N наиболее вероятны, то есть $P_{X,\sigma}(x_1, \dots, x_N) = \max$. Это возможно, если сумма в показателе экспоненты достигает \min , то есть наилучшая оценка для X будет при

$\min \left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - X)^2 / 2\sigma^2 \right\}$, что означает $\partial \{ \dots \} / \partial X = 0$, откуда получаем

$$\sum_{i=1}^N x_i - NX = 0.$$

Наилучшая оценка $X = \bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N$, то есть $X = \bar{x}$. Эта оценка для

X равна среднему значению имеющихся N измерений: x_1, x_2, \dots, x_N .

Найдем наилучшую оценку для σ из условия $\partial P_{X,\sigma} / \partial \sigma = 0$. Введем

временное обозначение $R = \sum_{i=1}^N (x_i - X)^2$ и преобразуем производную

к виду

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma^{-N} \cdot e^{-R/2\sigma^2} \right) = \sigma^{-(N+3)} (R - N\sigma^2) e^{-R/2\sigma^2} = 0. \quad (4.35)$$

Откуда $\sigma^2 = R / N$ или, если вернуться к начальным переменным,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - X)^2 / N. \quad (4.36)$$

Ранее показали, что $X = \bar{x}$, следовательно,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / N = \sigma_x^2. \quad (4.37)$$

Полученная оценка σ – ширины предельного распределения – есть стандартное отклонение N единичных измеренных значений x_1, x_2, \dots, x_N . Наилучшая оценка

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (N - 1). \quad (4.38)$$

Большинство физических величин невозможно измерить непосредственно с помощью приборов, поэтому их определяют в два этапа:

- 1) измеряют величины, которые могут быть непосредственно измерены в экспериментах, то есть проводят прямые измерения;
- 2) с использованием результатов прямых измерений по формуле вычисляют искомую косвенную величину.

Оценку погрешностей косвенных измерений также проводят в два этапа:

- 1) оценивают погрешности прямых измерений;
- 2) эти погрешности «распространяют» на погрешность рассчитываемой косвенной величины.

Рассмотрим правила расчета погрешности косвенного измерения q по известным погрешностям прямых измерений x и y . Пусть между величиной q , которую мы определяем, и переменными x и y имеется функциональная зависимость: $q = q(x, y)$. Предполагаем, что на первом этапе работы измерены величины x и y , после чего подсчитаны соответствующие погрешности Δx и Δy . Теперь, на втором этапе работы, необходимо вычислить наилучшую оценку величины q и определить, как Δx и Δy приводят к Δq , то есть определить зависимость $\Delta q = \Delta q(\Delta x; \Delta y)$.

Пример. Для функции вида $q = x + y$ известно, что: $x = \bar{x} \pm \Delta x$; $y = \bar{y} \pm \Delta y$ или $x = \bar{x}(1 \pm \epsilon_x)$; $y = \bar{y}(1 \pm \epsilon_y)$, где $\epsilon_x = \Delta x / \bar{x}$; $\epsilon_y = \Delta y / \bar{y}$ – относительные погрешности. Представим: $q = \bar{q} \pm \Delta q$ или $q = \bar{q}(1 \pm \epsilon_q)$, где $\epsilon_q = \Delta q / \bar{q}$. Требуется найти \bar{q} ; Δq ; ϵ_q .

Чтобы оценить погрешности, достаточно определить их предельные значения, для чего необходимо учесть наибольшие и наименьшие значения, которые может принять функция q . Максимальное значение функции q : $q_{\max} = \bar{x} + \bar{y} + (\Delta x + \Delta y)$. Минимальное значение функции q : $q_{\min} = \bar{x} + \bar{y} - (\Delta x + \Delta y)$. Наилучшая оценка для q : $\bar{q} = \bar{x} + \bar{y}$. Погрешность для функции q : $\Delta q \approx (\Delta x + \Delta y)$.

Полученное выражение переоценивает величину погрешности. Если измерения x и y выполнены независимо и если результаты замеров обеих величин подчиняются нормальному распределению, то погрешности складываются квадратично:

для $q = x + y$ $\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$; воспользовавшись известным неравенством $\sqrt{a^2 + b^2} < (a + b)$, запишем следующее выражение для ошибок:

$$\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} < (\Delta x + \Delta y). \quad (4.39)$$

Докажем квадратичное сложение погрешностей функции $q = x + y$. Для упрощения предположим, что истинные значения величин x и y таковы: $x = 0$ и $y = 0$.

Тогда

$$P(x) \sim e^{-x^2/2\sigma_x^2} = \exp\{-x^2/2\sigma_x^2\},$$

$$P(y) \sim e^{-y^2/2\sigma_y^2} = \exp\{-y^2/2\sigma_y^2\}.$$

Поскольку x и y измерялись независимо, вероятность получения любых данных x и y равна произведению вероятностей:

$$P(x, y) = P(x) \cdot P(y) \sim \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right\}.$$

Выразим теперь показатель экспоненты через переменную $(x + y)$. Для этого воспользуемся следующим тождеством (справедливость которого можно проверить простыми преобразованиями правой части):

$$\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} = \frac{(x + y)^2}{a + b} + \frac{(bx - ay)^2}{ab(a + b)} = \frac{(x + y)^2}{a + b} + z^2,$$

где $z^2 = \frac{(bx - ay)^2}{ab(a + b)}$ – слагаемое, не зависящее от переменной $(x + y)$.

Применим это тождество к формуле для вероятности $P(x, y)$:

$$P(x + y, z) \sim \exp \left\{ -\frac{(x + y)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} - \frac{z^2}{2} \right\} = \exp \left\{ -\frac{(x + y)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} \right\} \exp \left\{ -\frac{z^2}{2} \right\}.$$

Но нам нужно выражение $P(x + y)$, не зависящее от какого-либо значения z . Чтобы избавиться от z , проинтегрируем $P(x + y, z)$ по всем возможным значениям переменной z :

$$P(x + y) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x + y, z) dz = \exp \left\{ -\frac{(x + y)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} \right\} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -\frac{z^2}{2} \right\} dz.$$

С полученным интегралом мы уже ранее встречались, его значение

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -\frac{z^2}{2} \right\} dz = \sqrt{2\pi}$$

равно константе и не учитывается в наших оценочных расчетах. Тогда

$$P(x + y) \sim \exp \left\{ -\frac{(x + y)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} \right\} = \exp \left\{ -\frac{(q - 0)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} \right\}.$$

Таким образом, значения функции $q = x + y$ распределены нормально с центром в $X = 0, Y = 0$ и с шириной $\sigma_q = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$.

В общем случае необходимо принять во внимание как случайные, так и систематические погрешности. При этом стандартная погрешность измеряемой величины x рассчитывается по формуле

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x)_{\text{сист}}^2 + (\Delta x)_{\text{случ}}^2}.$$

Основы корреляционного и регрессионного анализа

В функциональной связи $Y = f(X)$ каждому значению *независимой* переменной X отвечает одно вполне определенное значение *зависимой* переменной Y . Если независимой переменной соответствует *несколько* значений Y , то связь между переменными X и Y приобретает статистический характер и называется *корреляционной*.

Простейшей и распространенной зависимостью между величинами X и Y является *линейная регрессия*. Оценка *тесноты* или силы связи между величинами X и Y осуществляется методами *корреляционного анализа*.

Рассмотрим линейную регрессию от одного параметра (рис. 4.8). Пусть для произвольного фиксированного значения x получено несколько значений Y . Предполагается, что величина Y распределена нормально с математическим ожиданием

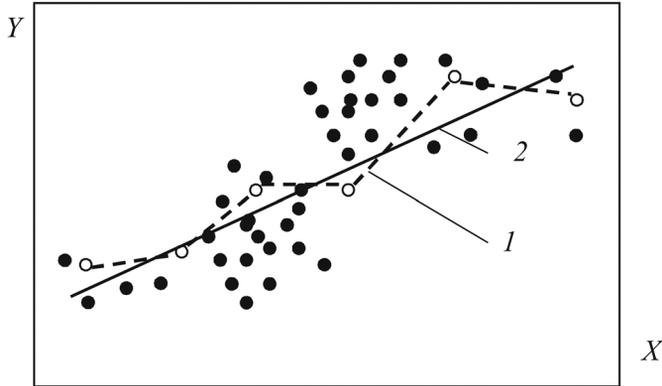


Рис. 4.8. Корреляционное поле зависимости $Y = f(x)$ с эмпирической (1) и теоретической (2) линиями регрессии

$$M_y = kx + b \quad (4.40)$$

и дисперсией σ_y^2 , не зависящей от X . Примем, что случайная величина Y в среднем линейно зависит от фиксированного значения x , а параметры k , b и σ_y^2 являются неизвестными параметрами генеральной совокупности.

Для оценки этих неизвестных величин по выборке объемом n сопряженных пар значений $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_n, y_n$ в декартовой системе координат можно построить корреляционное поле, содержащее n точек. Если нанести на поле средние значения \bar{y}_i , соответствующие всем значениям переменной x_i , то зависимость y от x станет более очевидной.

Ломаная линия, соединяющая точки \bar{y}_i , отнесенные к серединам интервалов $x_{срi}$, называется *эмпирической линией регрессии*. С увеличением числа измерений ломаная линия сглаживается и приближается к предельной линии – *теоретической линии регрессии*.

Метод наименьших квадратов

Для линейной зависимости линия регрессии задается уравнением прямой

$$y = kx + b, \quad (4.41)$$

неизвестные коэффициенты которой определяются по *методу наименьших квадратов*. В соответствии с этим методом квадрат расстояния по вертикали между опытными точками с координатами x_i, y_i и соответствующими точками на линии регрессии должен быть минимальным:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min. \quad (4.42)$$

Из уравнений для определения неизвестных коэффициентов k, b

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n [y_i - (b + kx)]^2 = 0, \quad \frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n [y_i - (b + kx)]^2 = 0 \quad (4.43)$$

следует

$$\sum_{i=1}^n (y_i - b - kx_i) = 0, \quad \sum_{i=1}^n (y_i - b - kx_i) x_i = 0, \quad (4.44)$$

откуда

$$\sum_{i=1}^n y_i = nb + k \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sum_{i=1}^n y_i x_i = b \sum_{i=1}^n x_i + k \sum_{i=1}^n x_i^2. \quad (4.45)$$

С учетом обозначений $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2,$

$\overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i$ следует

$$b = \bar{y} - k\bar{x}, \quad (4.46)$$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i / n \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.47)$$

Таким образом, уравнение линейной регрессии принимает вид

$$y = kx + b = \bar{y} + k(x - \bar{x}). \quad (4.48)$$

Пример. Построить линейную зависимость регрессии по семи экспериментальным точкам:

Значения аргумента, i	1	2	3	4	5	6	7
Значения функции, y	2,35	2,41	2,60	2,73	2,90	3,11	3,25

Решение

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 y_i = \frac{19,35}{7} = 2,764; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 x_i = 4.$$

По формуле (4.47)

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^7 (x_i - 4)(y_i - 2,764)}{\sum_{i=1}^7 (x_i - 4)^2} = 0,157.$$

По формуле (4.48) получаем искомую зависимость

$$y = \bar{y} + k(x - \bar{x}) = 2,764 + 0,157(x - 4)$$

Выборочный коэффициент корреляции

Коэффициент корреляции является количественной мерой, учитывающей стохастическую долю колебаний y_i относительно средней \bar{y} под влиянием x_i и вычисляется по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1) \sigma_x \sigma_y}, \quad (4.49)$$

где σ_x и σ_y – стандартные отклонения.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}. \quad (4.50)$$

Коэффициент корреляции не может быть использован для оценки важности фактора. Его величина указывает только на тесноту связи между переменными, а знак – на характер влияния. Значения коэффициента корреляции находятся в пределах $-1 \leq r \leq 1$:

при $r < 0$ – увеличение x вызывает уменьшение y ;

при $r > 0$ – увеличение x вызывает увеличение y ;

при $|r| = 1$ – связь между x и y линейная функциональная;

при $|r| = 0$ – корреляционной связи между x и y нет или она нелинейная.

Если выражение (4.45) преобразовать к виду

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = r \sigma_x \sigma_y (n-1) \quad (4.51)$$

и подставить в формулу (4.47), то получим

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{r\sigma_x\sigma_y(n-1)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{r\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (4.52)$$

Отсюда видна непосредственная связь коэффициента корреляции r и коэффициента k в уравнении линейной регрессии, их знаки всегда совпадают.

Выражения (4.49), (4.51) выражают тесноту и вид связи между переменными x и y .

4.4. Вопросы для самоконтроля

1. Какова связь и различия между фундаментальными научными понятиями «физическая величина» и «информация»?

2. Истинное и действительное значения физической величины, абсолютная и относительная погрешности измерений.

3. Перечислите различия между измерением и контролем.

4. Тестирование, достоверность и погрешность тестирования.

5. Отличие протокола от счета, измерения и тестирования.

6. Что включает в себя контроль, чем обеспечивается единство контроля?

7. Отличия между дискретизацией, квантованием и числовым кодированием оптического сигнала.

8. Виды контроля: прямой, косвенный, допусковый, односторонний, многосторонний, активный, пассивный, локальный, дистанционный. Приведите примеры.

9. Виды измерений: прямые, косвенные, статические, динамические.

10. Модификации метода сравнения с мерой.

11. Типы погрешностей измерения.

12. Расчет систематических погрешностей, классы точности приборов.

13. Закономерности распределения случайных погрешностей, функция нормального распределения, стандартное отклонение.

14. Надежность ограниченной серии измерений, распределение Стьюдента.

15. Статистический принцип максимального правдоподобия. Корреляционная функция, коэффициент корреляции, его смысл.

16. Метод наименьших квадратов для определения линейной регрессии.

5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

5.1. Измерения параметров оптического волокна

В общем случае весь спектр измерений в волоконно-оптических системах передачи можно разделить на два основных типа: это системные и эксплуатационные измерения. Первые заключаются, например, в определении целостности волокна при помощи оптического рефлектометра, а вторые – в определении функционирования системы с позиций параметров передачи, примерами которого являются измерение потерь, измерение дисперсии и измерение ширины линии лазера. Для обеспечения работоспособности и соответствия проектным параметрам волоконно-оптических систем передачи необходимо проводить множество как системных, так и эксплуатационных измерений, которые, в свою очередь, отличаются методикой и используемыми средствами измерений. Рассмотрим основные виды измерений параметров оптического волокна (рис. 5.1).

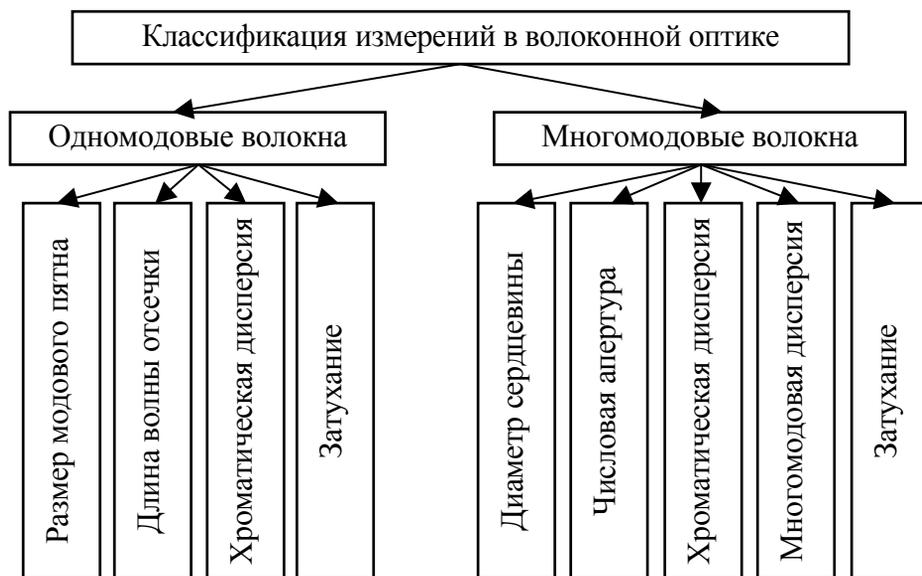


Рис. 5.1. Основные виды измерений параметров оптического волокна

Измерения в зависимости от типа волокна включают измерение затухания, межмодовой и хроматической дисперсии, цифровой апертуры, диаметра сердцевины, длины волны отсечки и размера модового пятна.

Наиболее важным параметром оптических волокон является *затухание*, измерение которого осложняется распространением большого количества мод в данном волокне, каждая из которых имеет свои собственные характеристики распространения. Для тестирования ослабления волокно должно быть возбуждено в режиме равновесного распределения мод (EMD), представляющем собой распределение мод для достаточно большой длины волокна, а измерение должно быть проведено путем сравнения вносимых потерь короткого эталонного волокна с потерями всего тестируемого волокна. Для этой цели могут использоваться источник и измеритель оптической мощности, а при необходимости получения дополнительной информации о *равномерности* ослабления на всей протяженности волокна необходимо проводить анализ обратно-рассеянного сигнала при помощи оптического рефлектометра.

Межмодовая дисперсия – это технический термин для обозначения расширения импульса (сужения полосы пропускания) вследствие неравных скоростей распространения различных мод. Основная концепция измерения межмодовой дисперсии заключается в возбуждении волокна коротким EMD-импульсом с последующим измерением ширины импульса на конце волокна. При этом для измерения должен быть использован источник с узкой шириной спектра, например, как у лазерного диода.

Хроматическая дисперсия – это расширение импульса вследствие отличия скоростей различных длин волн, содержащихся в спектре источника, которое отражает свойство материала волокна. Поэтому при хроматической дисперсии расширение импульса непосредственно зависит от ширины спектра источника. Так как хроматическая дисперсия не может быть непосредственно измерена, для ее определения необходимо к результату измерения добавить значение межмодовой дисперсии.

Числовая апертура (NA) и диаметр сердцевинки определяют то значение мощности, которое можно ввести в многомодовое волокно. Числовая апертура определяет максимальный угол направленных лучей в волокне и всегда измеряется на выходе волокна. При этом предполагается, что максимальный угол, наблюдаемый на выходе, приблизительно равен максимальному углу на входе, а в волокно введены все моды.

Диаметр сердцевинки измеряется на выходном конце волокна путем измерения распределения мощности при полном возбуждении на входе.

Длина волны отсечки одномодового волокна определяет самую низкую длину волны, которую следует использовать, если особую важность имеет высокая полоса пропускания, зависящая только от хрома-

тической дисперсии, поэтому для ее определения влияние межмодовой дисперсии можно не принимать в расчет. Основная идея измерения полосы пропускания заключается в измерении импульсной характеристики волокна путем сравнения импульсов на его входе и выходе, а также в измерении амплитуды выходного сигнала при возбуждении волокна модулированным переменной частотой гармоническим сигналом.

Ниже длины волны отсечки будет распространяться большее количество мод. Поэтому длина волны отсечки измеряется вводом в короткое волокно широкого спектра излучения, например, от вольфрамовой лампы, а затем осуществляется измерение ослабления каждой спектральной составляющей. Длина волны отсечки в этом случае определяется как отсутствие непрерывности кривой ослабления, ибо наличие большего количества мод позволяет большему объему возбужденной мощности достичь конца волокна. Другой метод измерения основан на условии, что моды высокого порядка более чувствительны к изгибам волокна, чем фундаментальные моды. Для проведения этих измерений источник должен обеспечивать стабильность интенсивности излучения и постоянство длины волны, согласованной со спектральной чувствительностью детектора.

Диаметр модового пятна характеризует расстояние между двумя точками, в которых измеренная мощность составляет $1/e$ от максимальной мощности при условии аппроксимации излучения фундаментальной моды одномодового волокна лучом с распределением Гаусса как внутри него, так и снаружи. Особенностью луча Гаусса является то, что он полностью определяется только двумя показателями: радиусом точки и длиной волны. Поэтому характеристики излучения, в частности поле на выходе волокна, могут быть определены исходя из этих показателей.

Если длина волны измерения больше длины волны отсечки одномодового волокна, в нем будет распространяться только одна мода. При таком условии измерения ослабления одномодового волокна значительно проще, чем аналогичные измерения многомодовых волокон, и согласно методу обрыва выполняются в два этапа: сначала измеряется выходная мощность на удаленном конце волокна с повторным измерением на части отрезанного у входного конца волокна. Разность уровней мощности, выраженная в оптических дБ, и является ослаблением. При необходимости получения дополнительной информации о равномерности ослабления на всей протяженности волокна необходимо проводить анализ обратнорассеянного сигнала при помощи оптического рефлектометра.

5.2. Методы определения размеров волокна

Стандарт регламентирует практическое измерение длины и размеров поперечного сечения оптического волокна. Размеры оптических волокон определяют путем проведения испытаний образцов в соответствии с табл. 5.1, в которую включены все категории волокон, но не все виды испытаний для данной категории волокон.

Таблица 5.1

Категории волокон и виды испытаний

Номер метода испытания	Наименование метода испытания	Определяемые характеристики
A1	Преломление в ближнем поле	Диаметр сердцевины, диаметр оболочки, некруглость, неконцентричность
A2	Распределение света в ближнем поле	Диаметр сердцевины, диаметр оболочки, диаметр первичного покрытия, диаметр защитного покрытия, некруглость, неконцентричность
A3	Четыре концентрических круга	Диаметр сердцевины, диаметр оболочки, некруглость, неконцентричность
A4	Механическое измерение	Диаметр оболочки, диаметр первичного покрытия, диаметр защитного покрытия, некруглость
A5	Измерение длины путем определения времени задержки переданного и (или) отраженного импульса	Длина волокна

Примечания:

1. Метод ближнего поля непосредственно реализует определение сердцевины через профиль показателя преломления. Данный метод позволяет получить профиль показателя преломления, по которому могут быть определены размеры и числовая апертура.

2. С помощью распределения света в ближнем поле получаемые размеры связаны с профилем показателя преломления, но не имеют точного соответствия определению диаметра сердцевины.

3. Метод четырех концентрических кругов является контрольным испытанием, обычно основанным на распределении света в ближнем поле. Он не может использоваться для измерения действительных значений размеров волокна.

4. Для практических целей диаметр сердцевины одномодовых волокон, как правило, не нормируется.

Метод преломления в ближнем поле

Метод ближнего поля непосредственно реализует определение сердцевины через профиль показателя преломления. Данный метод позволяет получить профиль показателя преломления, по которому могут быть определены размеры и числовая апертура.

Измерение в ближнем поле является прямым, точным и позволяет непосредственно измерить показатель преломления в волокне (сердцевине и оболочке). Измерение обеспечивает разрешающую способность, и при калибровании могут быть получены абсолютные значения показателей преломления. Оно может быть использовано для получения профилей как одномодовых, так и многомодовых волокон.

На рис. 5.2 представлена схема устройства для проведения испытаний. В качестве источника излучения требуется лазер со стабильным излучением, мощность которого составляет несколько милливатт. Может быть использован гелиево-неоновый лазер с длиной волны 633 нм, но с применением поправочных коэффициентов с целью экстраполяции на других длинах волны. Следует отметить, что измерение на 633 нм может не дать полную информацию для больших длин волн.

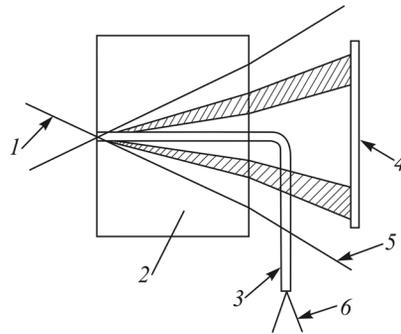


Рис. 5.2. Схема метода преломления в ближнем поле: 1 – падающий свет, переполняющий числовую апертуру волокна; 2 – ячейка с жидкостью; 3 – волокно; 4 – диск; 5 – только преломленные моды; 6 – излучение удержанных мод

В частности, неоднородное распределение добавок в волокне может отрицательно повлиять на коррекцию.

Четвертьволновая пластина используется для изменения линейно-поляризованного излучения на излучение с круговой поляризацией, поскольку отражение на границе воздух–стекло зависит от угла падения и поляризации света. Точечное отверстие в фокусе линзы 1 служит пространственным фильтром.

Устройство ввода излучения фокусирует луч света на плоском торце волокна, переполняя числовую апертуру волокна. Оптическая ось луча света не должна отклоняться от оси волокна более чем на 1° . Разрешающая способность оборудования определяется размером фокусно-

го пятна, которое для получения максимальной разрешающей способности должно быть как можно меньше, например менее 1,5 мкм. Оборудование позволяет сканировать по диаметру волокна фокусным пятном.

Жидкость в ячейке должна иметь показатель преломления, несколько превышающий показатель преломления оболочки волокна.

Преломленные лучи света собираются в детекторе любым известным способом, причем должно быть собрано все излучение. С помощью расчетов можно определить требуемый размер диска и его положение на центральной оси.

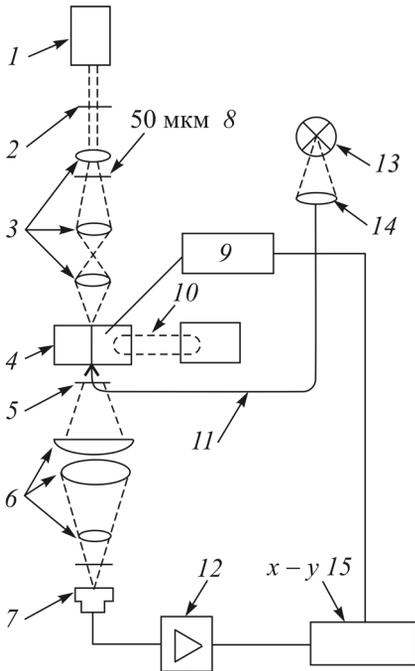


Рис. 5.3. Типовое устройство установки для измерения в ближнем поле: 1 – лазер; 2 – четвертьволновая пластинка; 3 – линзы; 4 – ячейка с жидкостью; 5 – диск; 6 – линзы; 7 – фотодиод; 8 – точечное отверстие, 50 мкм; 9 – электронный микрометр; 10 – двигатель; 11 – волокно; 12 – усилитель; 13 – лампа; 14 – линза; 15 – двухкоординатный самописец

В качестве образца необходим отрезок волокна длиной около 1 м. С участка волокна, помещенного в иммерсионную жидкость, должны быть удалены все покрытия, концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными к оси волокна.

Схема испытательного устройства представлена на рис. 5.3. Конец волокна, на котором должны выполняться измерения, помещается в ячейку с жидкостью, показатель преломления которой немного превышает показатель преломления оболочки волокна. Волокно подсвечивается сзади вольфрамовой лампой. Линзы 3 воспроизводят сфокусированное изображение волокна. С помощью линз 3 центрируется и фокусируется изображение волокна и одновременно лазерный луч центрируется и фокусируется на волокне. Диск центрируется на выходном конусе. В многомодовом волокне диск устанавливается на оптической оси с целью устранения вытекающих мод.

В одномодовых волокнах диск устанавливается для получения оптимальной разрешающей способности. Преломленные моды, проходящие через диск, собираются и фокусируются на фотодиоде. Сфокусированное лазерное пятно перемещается по торцу волокна, в результате чего можно непосредственно получить распределение изменений показателя преломления волокна.

Калибровка оборудования проводится с помощью волокна, извлеченного из ячейки с жидкостью. В процессе измерений угол конуса света изменяется в соответствии с показателем преломления в точке входа в волокно (соответственно изменяется энергия, поступающая на диск). Если волокно удалено, а показатель преломления жидкости и толщина ячейки известны, изменение угла может быть воспроизведено путем параллельного переноса диска вдоль оптической оси. Передвигая диск через ряд заранее определенных положений, можно определить профиль через относительный показатель преломления.

Абсолютные значения показателей преломления, т.е. n_1 и n_2 , могут быть определены только в том случае, если точно известен показатель преломления покрытия или жидкости для данной длины волны и температуры, при которой проводятся измерения.

В результате испытаний должны быть представлены идентификация волокна, а также профили по центру сердцевины и покрытия, по большой и малой осям сердцевины, по большой и малой осям покрытия, калиброванные на данной длине волны.

С помощью растрового сканирования поперечного сечения профили могут быть вычислены значения следующих величин:

- диаметр сердцевины;
- диаметр оболочки;
- погрешность концентричности сердцевины и оболочки;
- некруглость сердцевины;
- некруглость оболочки;
- максимальная теоретическая числовая апертура;
- разность показателей преломления;
- разность относительных показателей преломления;
- подтверждение точности и воспроизводимости измерений.

Метод распределения света в ближнем поле

С помощью распределения света в ближнем поле получаемые размеры связаны с профилем показателя преломления, но не имеют точно-го соответствия определению диаметра сердцевины. Изображение уве-

личивается с помощью выходной оптики, например микроскопа, и регистрируется (непосредственный осмотр, фотокамера, цифровой видеоанализатор, сканирующий детектор и т.д.). Выходная оптика и датчики могут быть объединены в одном устройстве.

Образец должен представлять собой короткий отрезок оптического волокна, на котором проводятся измерения. Длина должна быть зафиксирована. Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными к оси волокна.

Источник для освещения сердцевины должен быть некогерентным, с регулируемой интенсивностью; второй источник может быть использован для освещения волокна при проведении измерений оболочки. Для регистрации могут использоваться различные системы в зависимости от типа выполняемых измерений (визуальный осмотр, фотографирование, математическая обработка полученного распределения излучения). Используется инвертированный металлургический или биологический микроскоп с разрешающей способностью, близкой к дифракционному пределу (например, он должен иметь калиброванное увеличение до $600\times$ и должен быть снабжен нитяным микрометром). Микроскоп может быть снабжен камерой для микрофотографирования, телекамерой или другими регистрирующими устройствами.

При проведении испытаний конец образца, с которого получают изображение, должен быть подготовлен и установлен перпендикулярно к оси образца. Числовая апертура и, следовательно, разрешающая сила линзы объектива должны соответствовать требуемой точности измерения. Увеличение должно соответствовать размеру волокна и полю зрения. Источник света должен быть подведен к другому концу образца, который может быть обработан так же, как и первый конец, и установлен так, чтобы изображение на конце волокна было полным и четким. В случае необходимости можно использовать иммерсионную жидкость для подведения оптической мощности от источника к образцу.

Метод «Четыре концентрических круга»

Метод четырех концентрических кругов является контрольным испытанием, обычно основанным на распределении света в ближнем поле. Он не может использоваться для измерения действительных значений размеров волокна.

Метод позволяет определить, соответствуют ли параметры волокна требованиям технических условий. Метод следует использовать для проверки распространения светового импульса от входа к выходу световода.

Используя четыре концентрических круга, образующих две круговые зоны, имеющие диаметры оболочки и сердцевины соответственно $D_{CL} + \Delta D_{CL}$, $D_{CO} + \Delta D_{CO}$ и $D_{CL} - \Delta D_{CL}$, $D_{CO} - \Delta D_{CO}$, определяют поле допуска. Волокно считают выдержавшим испытание, если может быть найдено такое положение волокна в поле допуска, чтобы контуры оболочки и сердцевины полностью находились внутри двух круговых зон. Значения D_{CL} , ΔD_{CL} , D_{CO} , ΔD_{CO} устанавливают в технических условиях.

Образец должен представлять собой короткий отрезок оптического волокна. Длина образца должна быть отражена в документации. Сравнение между концентрическими кругами и контурами сердцевины и оболочки можно осуществить путем расчета визуально или путем печатного отображения данных. В оптической измерительной системе следует использовать маску с четырьмя концентрическими кругами. Точность маски должна позволять получить на образце точность, предусмотренную техническими условиями.

Подготовленный образец фиксируется в зажиме и с помощью источника света в него подается световое излучение так, чтобы контуры сердцевины и оболочки вырисовывались наиболее отчетливо. Если после манипулирования образцом контуры сердцевины и оболочки одновременно окажутся в двух круговых зонах, то это означает, что образец волокна выдержал испытание. Если необходимо, можно получить фотографию, на которой будет отражена степень соответствия параметров волокна установленным требованиям.

Метод механического измерения диаметра

Настоящий метод применим для механического измерения диаметра оболочки стеклянного или кварцевого оптического волокна. На практике для гладких и круглых волокон результат измерений аналогичен результатам, полученным по методам $A1$ и $A2$, которые также позволяют определить некруглость волокон. Данный метод может быть использован для измерения диаметра покрытия некоторых типов волокон с покрытием или защитной оболочкой или волокон категории $A3$ или $A4$.

В данном методе обе стороны изделия контактируют с плоскими параллельными поверхностями, расстояние между которыми точно измеряется.

Диаметры волокна без покрытия и волокна с покрытием являются основными значениями, которые должны быть известны для выполнения последующих операций, таких как переработка, сращивание, установка соединителей, изготовление кабелей и измерения.

Для выполнения измерений используются два плоских контакта, по одному с каждой стороны волокна. Поверхности контактов должны быть параллельны друг другу, и сила, с которой контакты прижимаются к волокну, должна контролироваться во избежание деформации образца или контактов.

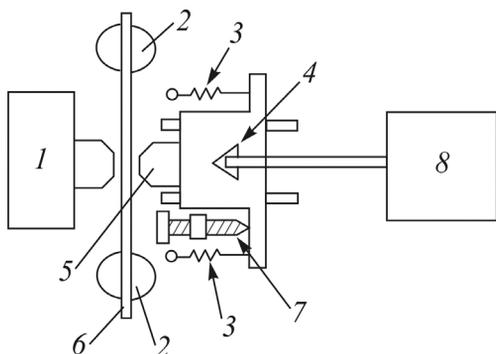


Рис. 5.4. Вид электронной микрометрической системы сверху: 1 – неподвижный контакт; 2 – держатель образца; 3 – пружина; 4 – щуп; 5 – контакт на прецизионной платформе; 6 – образец; 7 – микрометрический винт; 8 – электронный микрометр

Схема испытательного устройства приведена на рис. 5.4. Имеются два контакта: один неподвижный, другой установлен на прецизионной платформе. Поверхности контактов параллельны друг другу и перпендикулярны к направлению движения платформы. Они изготавливаются из твердых, коррозионностойких материалов, например из нержавеющей стали или плавленного кварца.

Прецизионная платформа удерживает подвижный контакт и щуп электронной микрометрической системы. Платформа

передвигается с помощью микрометрического винта; платформа удерживается на винте с помощью пружин. Пружины позволяют сводить контакты вплотную.

Электронная микрометрическая система, такая как интерферометр двойного хода Михельсона, может использоваться со щупом для точного измерения перемещения платформы, и, следовательно, подвижного контакта. Держатели удерживают образец между поверхностями контактов.

Диаметр образца измеряют с помощью контактов, которые прижимаются к противоположным сторонам образца. Сила, с которой контакты прижимаются к образцу и которая определяется натяжением пружины платформы и площадью соприкосновения с контактами, регулируется таким образом, чтобы деформация образца или контактов была минимальной. Потребитель и изготовитель оговаривает между собой указанные значения для различных материалов. Например, для волокна диаметром 125 мкм из расплавленного кварца данное значение обычно со-

ставляет 0,2 Н для контактов с длиной касания с волокном 1 мм. Промежуток, разделяющий контакты, точно измеряется электронным микроскопом.

Поверхности контактов зачищают и микрометрический винт завинчивают до соприкосновения поверхностей контактов друг с другом. Микрометрический винт завинчивают на дополнительный оборот так, чтобы контакты удерживались вместе только натяжением пружины. Показания расстояния на электронном микрометре регистрируют. Затем микрометр регулируют таким образом, чтобы промежуток между поверхностями контактов был больше диаметра образца. Образец волокна устанавливают на держателях между поверхностями контактов. Микрометрический винт медленно поворачивают так, чтобы поверхности контактов соприкоснулись с волокном и удерживались в контакте с ним только за счет натяжения пружин. Показания расстояния на электронном микрометре регистрируют. Разность между первым и вторым показаниями есть диаметр образца. Измерение повторяют несколько раз.

Для подтверждения воспроизводимости измерений необходимо указывать средний диаметр образца и стандартное отклонение, полученное в результате нескольких измерений. Некруглость волокна может быть определена с помощью ряда измерений, в процессе выполнения которых волокно вращают после каждого измерения.

Метод измерения длины по времени задержки переданного и (или) отраженного импульса

Метод применяют для измерений длины волокна путем измерения времени распространения оптического импульса или серии импульсов на основе известного значения группового показателя преломления волокна. Кроме этого, метод используется для определения группового показателя преломления волокна известной длины. Поэтому на практике, при применении данного метода измерения длины волокна производится калибровка относительно известной длины волокна того же типа.

Длина оптического волокна, являясь одним из основных параметров, должна быть известна для определения передающих характеристик, таких как потери и ширина полосы частот.

Время задержки прохождения оптического импульса (Δt) по волокну длиной L , имеющему показатель преломления N , вычисляют по формуле

$$\Delta t = N \cdot L/c, \quad (5.1)$$

где Δt – время задержки, c – скорость распространения света в вакууме.

Если N известен, то при измерении Δt можно определить L ; с другой стороны, если известна L , то при измерении Δt можно определить N . При этом необходимо учитывать допустимые отклонения группового показателя преломления, обусловленные допустимыми отклонениями числовой апертуры.

Образцом служит волокно (возможно в кабеле). Значение N следует определить при условиях, установленных при испытании образцов (например, натяжении, температуре).

Существуют два метода измерения времени распространения оптического импульса:

а) измерение времени задержки прохождения оптического импульса (Δt);

б) измерение времени задержки отраженного импульса ($2 \Delta t$).

На рис. 5.5, 5.6 представлены две различные схемы, соответствующие двум методам с применением осциллографа для отбора образцов.

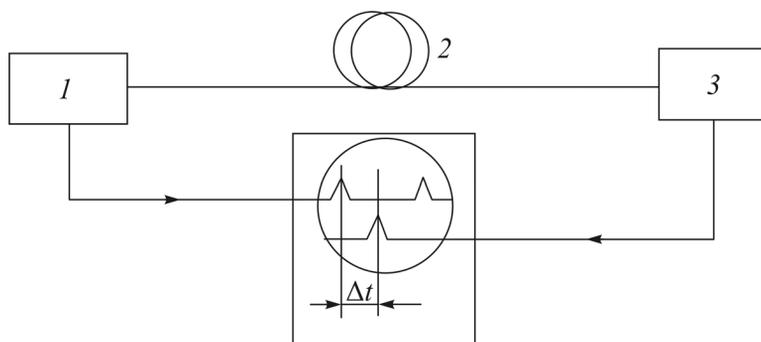


Рис. 5.5. Схема измерения времени передачи импульса: 1 – генератор оптических импульсов, 2 – волокно ($N.L.$), 3 – оптический приемник

Вместо осциллографа может быть использовано оборудование, применяемое при обратном рассеянии, или счетчик с отдельным переключателем пуск (остановка) и с усредняющей способностью (например, не менее 10^4 одиночных импульсов).

При измерении с помощью осциллографа генератор оптических импульсов должен представлять собой лазерный диод большой мощности, возбуждаемый генератором серий электрических импульсов, с настраиваемой частотой и шириной импульсов. Длина волны и ширина спектра должны быть зафиксированы в документации.

При измерении с помощью счетчика или оборудования, применяемого при обратном рассеянии, генератор оптических импульсов должен представлять собой лазерный диод большой мощности, возбуждаемый генератором серийных электрических импульсов с настраиваемой шириной. Промежуток между двумя импульсами должен быть больше, чем время распространения переданного (Δt , со счетчиком) или отраженного импульса ($2\Delta t$, с оборудованием, применяемым при обратном рассеянии). Длина волны и ширина спектра лазерного диода должны быть зафиксированы в документации.

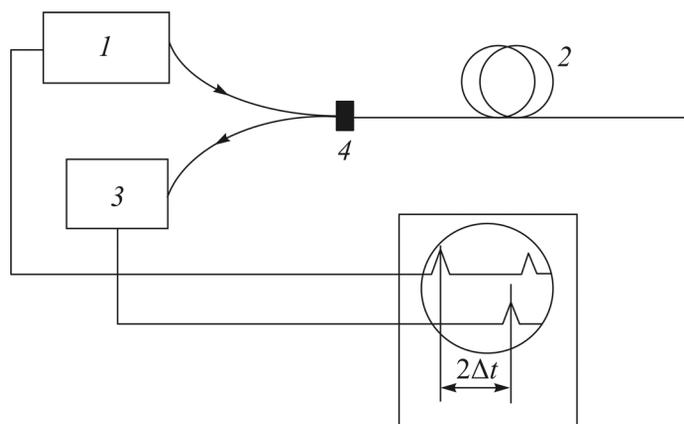


Рис. 5.6. Схема измерения времени отражения импульса:
 1 – генератор оптических импульсов, 2 – волокно ($N.L.$),
 3 – оптический приемник, 4 – соединительная муфта

В качестве приемника используют высокоскоростной лавинный фотодиод. Чувствительность датчика оптических импульсов должна быть адекватна измеряемой длине волны, а полоса частот должна быть достаточно широкой для того, чтобы избежать искажений импульсов.

В процессе проведения испытаний:

а) калибруют, т.е. определяют время задержки импульса между источником излучения и вводом в волокно (время задержки самого измерительного прибора);

б) находят среднее значение группового показателя преломления оптического волокна N , определяя Δt на отрезке волокна известной длины;

в) измеряют длину волокна, это измерение длины заключается в определении временного интервала, значение которого отражается на экране осциллографа или представлено в виде показаний электронного счетчика (рис. 5.7).

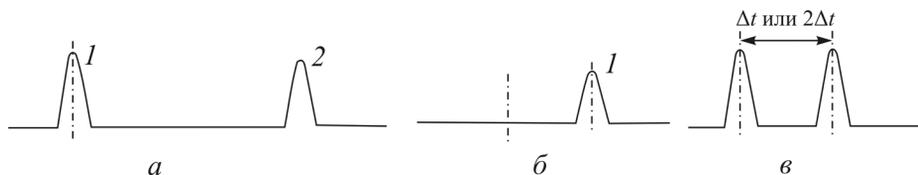


Рис. 5.7. Принцип измерения длины волокна: *a* – луч 1– испускаемый импульс: 1 – первый импульс; 2 – второй импульс с настраиваемой частотой повторения; *б* – луч 2– передаваемый импульс: 1 – первый импульс; *в* – луч 1– испускаемый импульс после регулирования частоты повторения таким образом, чтобы второй импульс в луче 1 совпадал с переданным импульсом луча 2

Для определения длины волокна используют следующие уравнения:

а) в методе передаваемого импульса $L = \Delta t \cdot c / N$;

б) в методе отраженного импульса $L = \Delta t \cdot c / 2N$,

где L – длина волокна, м; Δt – время передачи или отражения, нс; c – скорость света в вакууме, м/нс; N – средний групповой показатель преломления.

5.3. Методы измерения механических характеристик

Приведенные методы предназначены для испытаний на механическую прочность, определения возможности применения или выявления физических дефектов оптического волокна с первичным покрытием или с первичным буферным покрытием. Методы используют для контроля волокон, предназначенных для поставки.

Механические характеристики оптических волокон проверяют на соответствие установленным требованиям путем проведения на образцах испытаний, указанных в табл. 5.2. Проводимые испытания, критерии годности и число образцов указывают в технических условиях.

Таблица 5.2

Механические характеристики оптических волокон

Номер метода испытания	Наименование метода испытания	Определяемые характеристики
В1	Перемотка под натяжением	
В2	Прочность на разрыв короткого отрезка волокна	Механическая прочность

Механическая прочность отрезка стеклянного волокна зависит от глубины самой глубокой трещины, имеющейся на данном отрезке. При

определенной температуре и влажности окружающей среды и приложенном напряжении α глубина трещины будет возрастать в соответствии с соотношением, предложенным Чарльзом:

$$\frac{d\alpha}{dt} AK_1^n,$$

в котором K_1 по Гриффитсу выражается как $K_1 = Y\alpha\alpha^{1/2}$, где K_1 – коэффициент интенсивности напряжения; Y – коэффициент, зависящий от формы (константа); α – напряжение; n – показатель, учитывающий зависимость скорости возникновения дефектов от напряжения (константа); a – глубина трещины; A – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Если трещины за время Δt достигли размера, при котором K_1 переходит в K_{1C} (критический коэффициент интенсивности напряжения), происходит разрушение волокна.

Например, если волокно подвергается действию напряжения α_1 в течение времени $\Delta t = t_2 - t_1$, трещина увеличится от α_{t_1} до α_{t_2} (рис. 5.8). Однако с точки зрения коммерции необходимо учитывать, что после того, как волокно прошло перемотку при напряжении α_1 , а трещина почти достигла размера α_C (т.е. размера, при котором происходит разрушение волокна), последующее напряжение α_2 (при $t > t_2$) должно быть меньше α_1 во избежание разрушения волокна.

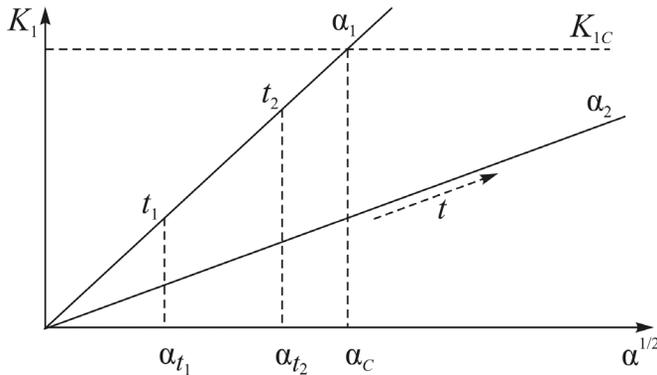


Рис. 5.8. График увеличения трещины в оптическом волокне под действием напряжения

Физические дефекты, такие как примеси и пузыри, могут присутствовать в волокне и оказывать влияние на оптические и механические характеристики. Определенные типы дефектов могут быть обнаружены с помощью методов отражения или других измерительных методов.

Метод перемотки оптического волокна под натяжением

При испытании вся длина оптического волокна подвергается перемотке под натяжением с целью исключения точек, в которых механическая прочность равна или ниже заданного уровня.

Пробное испытание должно соответствовать одному из следующих способов:

- а) постоянное напряжение;
- б) постоянное удлинение;
- в) постоянная деформация изгиба.

Перемотку при постоянном напряжении и постоянном удлинении применяют для волокон с первичным и вторичным покрытиями, модуль упругости и толщина которых достаточны для того, чтобы выдержать действующие на них линейные и радиальные силы и защитить поверхность волокна от действия разрушительных радиальных напряжений. В противном случае применяют испытание на постоянную деформацию изгиба.

Уровень нагрузки при перемотке устанавливают с учетом поправки на влияние защитных покрытий оптического волокна. Колебания напряжения в отдающем и приемном устройствах для волокна не должны передаваться в испытательную зону устройства. Скорость прохождения волокна через устройство и конструкция устройства должны быть таковы, чтобы волокно было нагружено в течение времени, установленного в технических условиях.

Устройство для перемотки с постоянным напряжением представлено на рис. 5.9, где A и C – ведущие колеса или шкивы, B – свободно вращающееся колесо или шкив, лежащее в плоскости двух других, свободное перемещение которого ограничивается вертикальной линией, проходящей через его ось. Груз W , приложенный к шкиву B , создает растягивающее усилие T . Важно, чтобы коэффициент трения покоя между оптическим волокном и колесами A , B и C был высок, и для того, чтобы свести к минимуму проскальзывание, могут использоваться, например, прижимные ремни. Одно из колес имеет постоянную угловую скорость, причем положение по вертикали колеса B достигается варьированием скорости колеса C . Натяжение за пределами участка T_i не должно превышать 10% испытательного натяжения T . Диаметр колес должен быть таков, чтобы напряжение, возникающее при изгибе в любой точке, не превышало 10% испытательного значения.

При проведении испытаний оптическое волокно должно проходить через устройство, как показано на рис. 5.9, со скоростью, соответствующей продолжительности испытания, указанной в технических условиях. Масса груза W , действующего на колесо или шкив B , должна соответствовать указанной в технических условиях.

После испытания проверяют целостность оптического волокна с помощью оптического рефлектометра или другого средства для обнаружения трещин. В волокне не должно быть трещин.

На схеме устройства для перемотки с постоянным удлинением (рис. 5.10) A и B – колеса или шкивы, у которых при вращении разность окружных скоростей создает требуемое напряжение. Разность скоростей достигается за счет установки колес одинакового номинального диаметра, вращающихся с разностью угловых скоростей, обеспечивающей требуемый уровень удлинения, или установкой колес с диаметрами в соотношении, обеспечивающем требуемый уровень удлинения, при этом колеса должны вращаться с одинаковой угловой скоростью.

Коэффициент статического трения между оптическим волокном и колесами должен быть достаточно высок для того, чтобы снизить до минимума проскальзывание; допускается использование прижимных ремней или других приспособлений подобного типа. Удлинение за пределами участка T_i не должно превышать 10% испытательного значения. Диаметры колес должны быть такими, чтобы удлинение при изгибе в любой точке не превышало 10% испытательного значения.

После испытания необходимо проверить на целостность оптическое волокно с помощью оптического рефлектометра или другого средства для обнаружения обрывов.

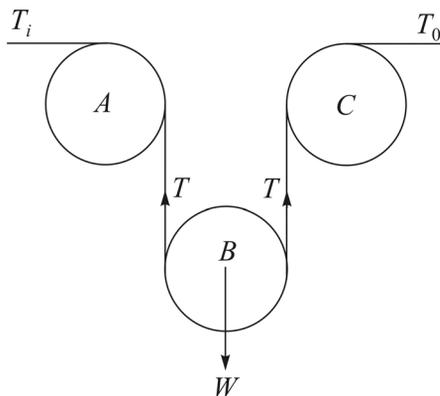


Рис. 5.9. Устройство для перемотки с постоянным напряжением

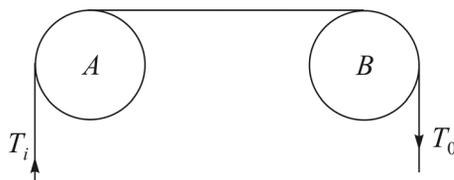


Рис. 5.10. Устройство для перемотки с постоянным удлинением

Устройство для перемотки с постоянной деформацией изгиба показано на рис. 5.11. Здесь ролики *A*, *B* и *C* свободно вращаются вокруг параллельных осей. Волокно изгибается свободно вращающимися роликами при достаточном натяжении, следуя геометрии роликов. Диаметры роликов выбирают так, чтобы вызванная изгибами максимальная деформация на поверхности волокна была равна требуемой деформации с учетом толщины защитных или буферных покрытий.

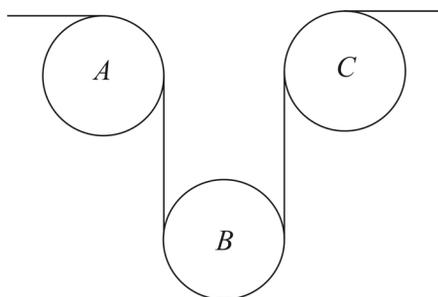


Рис. 5.11. Устройство для перемотки с постоянной деформацией изгиба

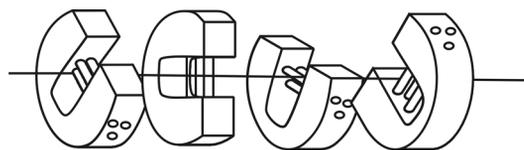


Рис. 5.12. Группы роликов

Для обеспечения практически постоянной максимальной деформации всех участков поверхности волокна используют группы роликов, установленных под углом к первому. Обычно используют четыре группы роликов, установленных под углом 45° друг к другу (рис. 5.12). Отдающее и приемное устройства должны предотвращать кручение волокна при его прохождении. После испытания оптическое волокно должно быть проверено на отсутствие обрывов с помощью оптического рефлектометра или другого средства для обнаружения обрывов.

Метод прочности на разрыв коротких отрезков оптических волокон

Цель испытания заключается в получении значений прочности на разрыв коротких отрезков оптических волокон (длина образцов не должна превышать 1 м). Распределение значений прочности на разрыв волокна зависит от длины образца, скорости нагружения и условий окружающей среды. Испытание проводят в случаях, когда требуются статистические данные о прочности волокна. Результаты представляют в виде статистического распределения. Обычно испытание проводят после выдержки образцов при необходимой температуре и влажности. В некоторых случаях бывает достаточно определить эти характеристики при температуре и влажности окружающей среды.

Устройство для испытания на растяжение должно иметь зажимы, которые не повреждают образец и предотвращают его повреждение. Скорость растяжения должна составлять 5% длины образца в минуту. Устройство для испытания на растяжение может иметь вертикальное или горизонтальное расположение растягиваемого образца. Волокно зажимается с помощью зажимных цилиндров или каких-либо других приспособлений.

При необходимости образцы могут выдерживаться в ванне с водопроводной водой при температуре 20 °С или в камере искусственного климата (например, с регулируемой температурой, равной 23 °С, и относительной влажностью 95%). Время выдержки – не менее 24 ч.

При проведении испытания без предварительной выдержки образец должен быть установлен в устройстве для испытания на растяжение таким образом, чтобы свободная длина между зажимами составила не более 1 м. Скорость указывают в технических условиях на волокно.

Испытание с предварительной выдержкой должно начинаться не позднее чем через 5 мин после извлечения образца из устройства, где проводилась предварительная выдержка, тем же способом.

В результате испытаний должны быть представлены следующие данные: контрольная длина, тип зажимов, скорость растяжения, относительная влажность и температура окружающей среды, тип волокна, длина образца, значения прочности. Значение, при котором происходит обрыв волокна, определяется как прочность волокна.

В качестве эталона распределение качества той же категории должно быть представлено, например, с помощью распределения по Вейбулу. Соответствие графика распределения зависит от общей длины испытываемого волокна, а также от длин испытываемых образцов. В случае обрывов в зоне зажимов (например, от 10 до 15 мм) значение не должно включаться в статистическое распределение контроля качества, а должно быть указано отдельно.

5.4. Методы измерения затухания

Данные методы измерения применяются при испытаниях, представленных в табл. 5.3.

Затухание является мерой уменьшения оптической мощности в волокне. Оно зависит от характера и длины волокна, на него также влияют условия измерения. При неконтролируемых условиях ввода обычно возникают моды утечки высшего порядка, которые вызывают переходные потери и приводят к затуханию, не пропорциональному длине во-

локна. Контролируемые условия ввода, создающие распределение мод, соответствующее установившемуся состоянию, приводят к затуханию, пропорциональному длине волокна. В таких условиях установившегося состояния может быть определено линейное значение затухания волокна. Затухания соединенных волокон складываются линейным путем.

Таблица 5.3

Методы измерения передающих и оптических параметров

Номер метода испытания	Наименование метода испытания	Определяемые характеристики
C1A	Метод обрыва	Затухание
C1B	Метод вносимых потерь	
C1C	Метод обратного рассеяния	
C2A	Импульсная характеристика	Полоса пропускания
C2B	Частотная характеристика	
C4	Передаваемая или излучаемая мощность	Оптическая непрерывность
C5A	Фазовый сдвиг	Обратная дисперсия
C5B	Задержка импульса	
C6	Распределение света в дальнем поле	Числовая апертура
C7A	Метод передаваемой мощности	Длина волны отсечки
C7B	Зависимость диаметра модового пятна от длины волны	
C9A	Метод поперечного сдвига	Диаметр модового поля
C9B	Метод проходящих полей	Диаметр модового поля. Нецентричность
C10A	Контроль передаваемой мощности	Изменение коэффициента передачи в течение испытаний механических параметров и испытаний на воздействие внешних факторов
C10B	Контроль обратного рассеяния	

Затухание $A(\lambda)$ (дБ) на длине волны λ между двумя плоскостями поперечного сечения 1 и 2, расстояние между которыми равно L , определяется следующим образом:

$$A(\lambda) = \left| 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \right|, \quad (5.2)$$

где P_1 – оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения 1; P_2 – оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения 2.

Для однородного волокна в состоянии равновесия можно определить затухание (дБ) на единицу длины, или коэффициент затухания:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} (\text{ед. длины})^{-1}, \quad (5.3)$$

который не зависит от выбранной длины волокна.

Для измерения затухания применяют три метода:

- 1) обрыва;
- 2) вносимых потерь;
- 3) обратного рассеяния.

Метод обрыва применяется непосредственно для определения затухания, причем уровни мощности P_1 и P_2 измеряются в двух точках волокон без изменения условий ввода. P_2 является мощностью, излучаемой в конце световода, а P_1 – мощность, излучаемая у ввода в точке среза волокна. Принцип измерения не позволяет получить информацию о распределении затухания вдоль волокна. Трудно также измерить изменения затухания под действием различных условий. Но в определенных условиях этот метод обеспечивает наиболее точное измерение затухания, строго отвечающее его определению. В некоторых случаях разрушающий характер этого метода делает его неприемлемым.

Метод вносимых потерь в принципе аналогичен методу обрыва, но P_1 является мощностью, излучаемой на выходе системы ввода. Измеренное значение затухания испытываемого волокна, включающее влияние измерительной аппаратуры, должно быть скорректировано по дополнительным потерям в соединении, соответствующим потерям на эталонной длине волокна. Этот метод также не позволяет анализировать затухание по длине волокна, но по предварительно известной мощности P_1 возможно непрерывно измерять изменение затухания в зависимости от изменений условий окружающей среды, таких как температура или прикладываемая нагрузка. Этот метод применим также для измерений на кабелях, имеющих соединители.

Методом обратного рассеяния измеряется оптическая мощность, которая рассеивается в обратном направлении к началу волокна из различных его точек. Измерение проводится с одной стороны. На измерение влияют скорость распространения света в волокне и его поведение в режиме обратного рассеяния. Если эти два параметра являются постоянными, что обычно наблюдается для отдельных длин волокон, то ре-

результат измерения затухания может быть достаточно точным, если соблюдаются установленные условия ввода. Измерение позволяет анализировать затухание вдоль всего волокна или на отдельных отрезках, а также на линиях, образованных соединенными волокнами, и определять затухание соединений. В некоторых случаях следует проводить измерение с обоих концов, чтобы исключить эффекты обратного рассеяния, зависящего от направления распространения. Кроме того, этим методом может быть измерена длина волокна.

Метод обрыва

Условия ввода должны быть такими, чтобы избежать ввода мощности в переходные моды высшего порядка. При отсутствии ввода в эти переходные моды испытываемого волокна будут измерены затухания отдельных участков, суммирующиеся практически линейным образом. Поскольку эти распределения мощности существенно не изменяются волокном, они называются распределениями в установившемся состоянии.

Существуют два метода для обеспечения условий ввода в установившемся состоянии для измерения затухания: фильтры мод и ввод с помощью систем геометрической оптики. При соответствующем применении этих методов могут быть получены сравнимые результаты. Типовой пример схемы ввода, использующей фильтр мод, приведен на рис. 5.13.

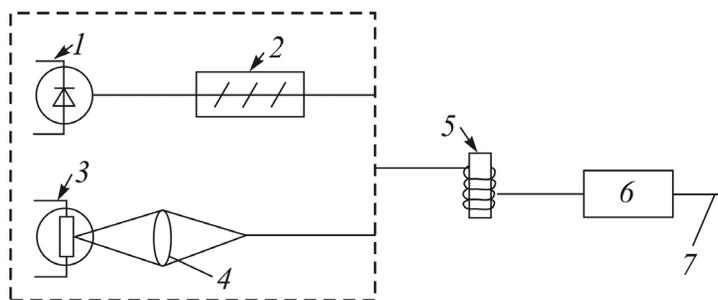


Рис. 5.13. Аппаратура для измерения затухания на установленной длине волны: 1 – светоизлучающий диод или лазер; 2 – смеситель мод; 3 – лампа; 4 – линза; 5 – фильтр мод; 6 – устройство выделения мод оболочки; 7 – ввод

Вывод мод оболочки обеспечивает то, что ни одна из мод излучения, распространяющаяся в зоне оболочки, не может быть обнаружена после короткого расстояния по длине волокна. Часто для вывода мод оболочки применяется материал, показатель преломления которого равен или более показателя преломления оболочки волокна. Это может быть достигнуто применением жидкости для согласования показателей

преломления на отрезке волокна, с которого снята оболочка, вблизи его концов; само покрытие волокна также может обеспечивать вывод мод оболочки.

Мощность, вводимая до фильтра мод, должна представлять существенно однородное распределение. При таком источнике как светодиод или лазер, не удовлетворяющем этому условию, необходимо использовать смеситель мод. Он должен иметь соответствующее устройство из волокна (например, цепочку профилей показателей преломления: ступенчатый – градиентный – ступенчатый).

В качестве примера условий ввода можно использовать фильтр мод в виде иницирующего волокна. Волокно выбирается того же типа, что и испытываемое волокно. Его длина должна быть достаточной (обычно равной или более 1 км), чтобы распределение мощности, передаваемой по этому волокну, было стабильным при применении соответствующего источника ввода.

Другой тип фильтра мод представляет собой стержень с несколькими витками (обычно 3–5 витков) испытываемого волокна, намотанными со слабым натяжением. Диаметр стержня выбирается таким, чтобы обеспечить затухание переходных мод, возбуждаемых в испытываемом волокне, до достижения устойчивого состояния.

Измерение в поле дальней зоны должно проводиться для сравнения распределения мощности, излучаемой на выходе испытываемого волокна большой длины (более 1 км), когда она возбуждается источником, обеспечивающим однородное насыщение, с распределением мощности, излучаемой на выходе волокна короткой длины, намотанного на стержень. Диаметр стержня выбирается таким, чтобы получить распределение в поле дальней зоны на короткой длине, приблизительно соответствующее распределению в поле дальней зоны на большой длине волокна. Числовая апертура (измеряемая в соответствии с методом распределения света в дальнем поле) диаграммы излучения на конце короткой длины должна находиться в диапазоне 94–100 % числовой апертуры диаграммы, соответствующей большой длине.

Диаметр стержня может быть различным в зависимости от типа волокна и покрытия. Обычно диаметр стержня составляет 15–40 мм с пятью витками волокна, при длине стержня около 20 мм.

Сочетание функций смесителя и фильтра мод может быть реализовано с помощью устройства, содержащего определенное число металлических шариков (размером 1–5 мм), расположенных произвольно, но

с выровненной общей поверхностью. Волокно такого же типа, что и испытываемое, кладется на эту поверхность шариков и прижимается сверху на длине около 0,5 м. Регулированием силы нажима можно обеспечить регулирование распределения мощности, излучаемой на конце волокна короткой длины.

Ввод с пространственным ограничением (ПО) определяется как ввод, производимый геометрической оптикой, заполняющий одинаково 70 % диаметра сердечника и 70% числовой апертуры испытываемого волокна. Это максимальное геометрическое распределение мощности, которое не вводит мощность в быстро затухающие моды. Так, в случае многомодового градиентного волокна 50/125 мкм с числовой апертурой 0,2 условия ввода ПО соответствуют диаметру однородного пятна 35 мкм и числовой апертуре 0,14.

На рис. 5.14 приведен пример оптической схемы, используемой для ввода ПО. Следует обеспечить совпадение оси вводимого пучка с осью волокна, при этом пятно и конус падающего света должны быть сцентрированы с сердечником волокна. Кроме того, оптическая система ввода должна быть рассчитана на используемые длины волн для обеспечения правильного измерения.

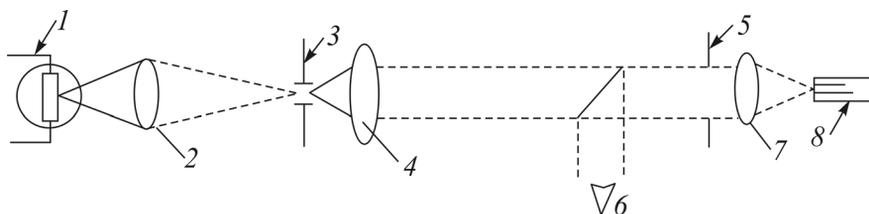


Рис. 5.14. Аппаратура для измерения спектрального затухания: 1 – лампа; 2 – промежуточная линза; 3 – апертура, определяющая пятно; 4 – линза; 5 – апертура, определяющая числовую апертуру; 6 – ИК визир; 7 – линза; 8 – ввод

Измерения могут проводиться на одной или нескольких длинах волн. В качестве варианта может потребоваться спектральная кривая затухания для всего диапазона длин волн. На рис. 5.13, 5.14 в качестве примера представлены схемы монтажа испытательной аппаратуры.

Выбор оптического источника (лампа, лазер или светоизлучающий диод) зависит от типа измерения. Источник должен быть устойчивым по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного периода, во время которого проводится измерение. Ширина спектральной линии (между точками при 50 % оптической интенсив-

ности используемого источника) должна быть определена таким образом, чтобы она была узкой по отношению к любой характеристике спектрального затухания волокна. Это волокно должно быть ориентировано по конусу ввода или соединено коаксиально с волокном ввода.

Должна использоваться большая детектирующая поверхность, чтобы захватывать любое излучение конуса или конусов на выходе. Если приемное устройство уже имеет приемный вывод, то он должен иметь диаметр сердечника и числовую апертуру, достаточные для поглощения всего света, выходящего из эталонного и испытываемого волокон. Спектральная чувствительность должна быть совместимой со спектральными характеристиками источника. Детектирование должно быть однородным и иметь линейные характеристики.

Как правило, источник света модулирует с целью улучшения соотношения сигнала (шум при приеме). Если принимается такой метод, то детектор должен быть соединен с системой обработки сигнала, синхронизированной с модулирующей частотой источника. При этом необходимо, чтобы система обнаружения была практически линейной или имела известные характеристики.

Для подавления оптической мощности, распространяющейся в оболочке, должна использоваться соответствующая техника, если это оказывает заметное влияние на принимаемый сигнал.

При проведении измерений испытываемое волокно монтируют на измерительном устройстве, фиксируют выходную мощность P_2 . Поскольку условия ввода сохраняются постоянными, волокно обрезают на требуемой длине (например, в двух метрах от точки ввода). Фиксируют выходную мощность P_1 для длины обрезанного волокна. Затухание волокна между точками, в которых измерены P_1 и P_2 , может быть вычислено по известным P_1 и P_2 .

Метод вносимых потерь

Альтернативным методом измерения затухания является метод вносимых потерь. В этом методе, как и в предыдущем, условия ввода в эталонное и испытываемое волокно должны быть одинаковыми.

Измерения могут проводиться на одной или нескольких длинах волн; в качестве варианта спектральный отклик может быть рекомендован по всему диапазону длин волн. Схемы монтажа испытательной аппаратуры представлены в качестве примера на рис. 5.15 (калибровка) и 5.16 (измерение).

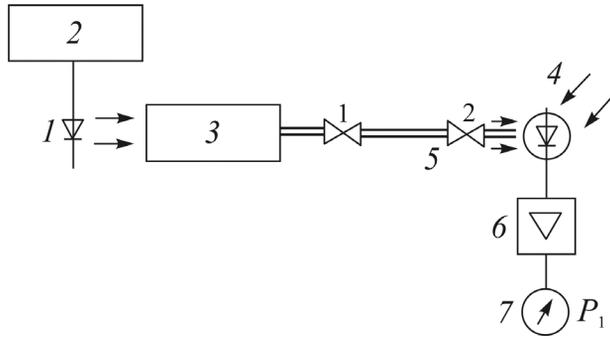


Рис. 5.15. Калибровка при измерении вносимых потерь: 1 – светоизлучающий источник; 2 – цепь питания; 3 – система ввода; 4 – детектор с дополнительным подводящим волокном; 5 – эталонное волокно; 6 – усилитель; 7 – измеритель уровня

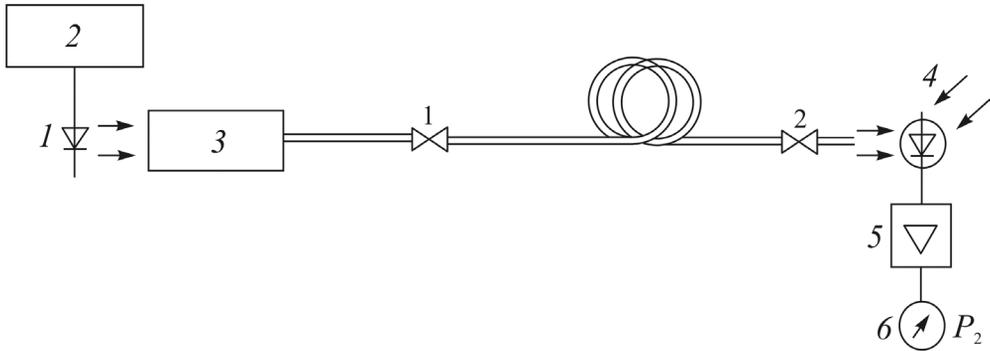


Рис. 5.16. Измерение вносимых потерь: 1 – светоизлучающий источник; 2 – цепь питания; 3 – система ввода; 4 – детектор с дополнительным подводящим волокном; 5 – усилитель; 6 – измеритель уровня

Метод вносимых потерь требует применения очень точного устройства соединения волокна с волокном, чтобы свести до минимума потери, вносимые соединением, и обеспечить надежные результаты. Это соединительное устройство может быть в виде механической подвижной системы, контролируемой визуально, или в виде соединителя с сердечник–сердечник. Эталонное волокно может быть того же типа, что и испытываемое.

При проведении измерений измерительное устройство калибруют для получения эталонного уровня на входе P_1 . Для начальной калибровки используют тот же тип волокна, что и эталонное волокно. Длина эталонного волокна должна быть незначительной (например, 2 м), чтобы можно было пренебречь его затуханием. Испытываемое волокно соединяют с измерительным устройством, и соединение регулируют с целью

получения максимального уровня на оптическом детекторе. Мощность на выходе P_2 фиксируют. Затухание испытываемого волокна (дБ) вычисляют по формуле

$$A = \left| 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \right|. \quad (5.4)$$

Если затуханием эталонного волокна нельзя пренебречь, его следует прибавить к вычисленному значению.

В результате испытаний фиксируют спектральное затухание, дБ, или линейное затухание, дБ/км, в зависимости от длины волны или одной или нескольких заданных длин волн, в соответствии с установленным в технических условиях.

Метод обратного рассеяния

Другим альтернативным методом измерения затухания в однородном образце оптического волокна является метод обратного рассеяния. Он может быть использован для контроля оптической целостности, физических дефектов, мест сварки и обратного рассеяния в оптических волокнах, а также для определения длины волокна.

Для измерения затухания может быть использована методика, описанная в методе обрыва. Для контроля других параметров условия ввода излучения могут зависеть от параметров, которые подвергаются проверке. Во всех случаях, для того чтобы снизить френелевское отражение на входе волокна, могут быть использованы различные устройства, например поляризаторы или материалы с близкими показателями преломления. Вносимые потери должны быть минимальными.

Уровень оптического сигнала обратного рассеяния обычно невелик и близок к уровню шума. Для улучшения отношения сигнал–шум и динамического диапазона измерений используют мощный источник света совместно с устройством для обработки детектированного сигнала. Кроме того, для получения компромиссного значения между разрешающей способностью и энергией импульса точная пространственная разрешающая способность может потребовать регулирования ширины импульса. Особое внимание должно быть уделено минимизации френелевского отражения. Оптические нелинейные эффекты должны быть исключены для волокна, подвергаемого испытанию.

Пример устройства показан на рис. 5.17. Источник оптического излучения должен быть стабильным мощным источником с соответствующей длиной волны, таким как полупроводниковый лазер. Длина

волны источника должна быть зафиксирована. Ширина импульса и частота повторения импульсов должны соответствовать требуемой пространственной разрешающей способности и длине волокна. Детектор

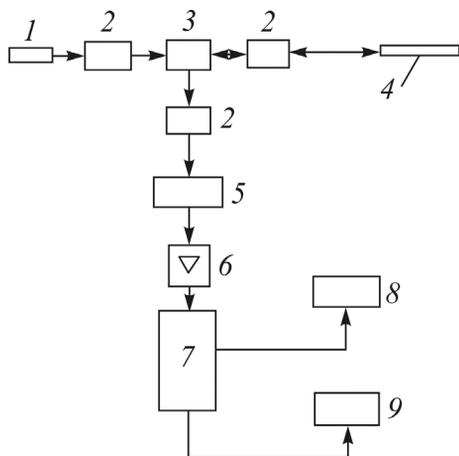


Рис. 5.17. Схема устройства обратного рассеяния: 1 – источник света; 2 – оптическая система; 3 – устройство соединения; 4 – испытываемое волокно; 5 – оптический детектор; 6 – усилитель; 7 – устройство обработки сигналов; 8 – осциллограф; 9 – система сбора данных

должен обеспечивать максимальный захват мощности обратного рассеяния. Чувствительность детектора должна соответствовать уровню и длине волны детектируемых сигналов. При изменении затухания чувствительность детектора должна быть, в основном, линейной.

Для улучшения соотношения сигнал–шум необходима обработка сигнала и желательно иметь в системе детектирования логарифмическую чувствительность. За оптическим детектором должен быть установлен соответствующий усилитель, что делает уровень сигнала достаточным для его обработки. Ширина полосы пропускания усилителя выбирается как среднее между временной разрешающей способностью и требованиями по снижению уровня шума.

При проведении испытаний испытываемое волокно устанавливают на одном уровне с устройством соединения. Мощность, рассеянную в обратном направлении, анализируют с помощью устройства для обработки сигналов и регистрируют на логарифмической шкале. На рис. 5.18 представлена типичная кривая. Если зарегистрированная кривая имеет приблизительно постоянный наклон (зона *b*), затухание (дБ) между двумя точками *A* и *B* кривой, соответствующими двум площадям поперечного сечения волокна, можно выразить следующим образом:

$$A(\lambda)_{A-B} = \frac{1}{2}(P_A - P_B), \quad (5.5)$$

где P_A и P_B – соответствующие уровни мощности, представленные на логарифмической шкале. В приведенном уравнении в точках *A* и *B* использованы одни и те же коэффициенты обратного рассеяния. При не-

обходимости могут быть проведены двунаправленные измерения совместно с числовыми расчетами с целью повышения точности результата и учета влияния на затухание дефектов волокна.

В результате измерений регистрируется кривая на логарифмической шкале, указывающая затухание в образце в децибелах, и, при необходимости, коэффициент затухания (дБ/км). Анализ этой кривой (см. рис. 5.18) показывает, что кроме измерения затухания, с помощью метода обратного рассеяния могут контролироваться:

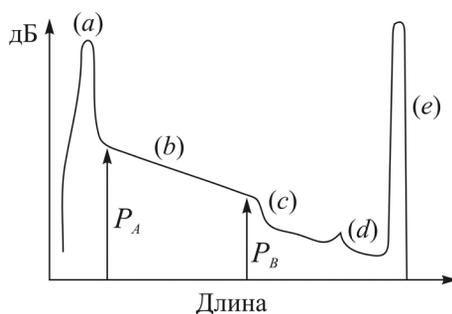


Рис. 5.18. Кривая мощности, рассеянной в обратном направлении

- отражение, причиной которого является устройство соединения на входном конце волокна;
- прерывность за счет локальных дефектов, сростков или соединений;
- отражение за счет диэлектрических дефектов;
- отражение на конце волокна.

Метод обратного рассеяния является одним из основных методов измерения как для многомодовых, так и для одномодовых волокон. По сравнению с другими методами измерения затухания, такими как метод вносимых потерь, данный метод позволяет получить единое значение полных потерь, а также произвести оценку волокна или соединений волокон по всей длине.

Поскольку метод обратного рассеяния дает не только прямые потери, но и потери при обратном рассеянии, измеренное значение включает в себя значение потерь волокна и характеристики рассеяния. Характеристики обратного рассеяния зависят от длины волны, в результате чего измерения на различных длинах волны дают различные результаты.

Рассмотрим интерпретацию характеристик обратного рассеяния.

На рис. 5.19 представлена кривая обратного рассеяния, отражающая большую часть наиболее часто встречающихся явлений. В приведенных примерах вертикальная ось (Y) логарифмическая. Поэтому кривая обратного рассеяния с постоянным наклоном характерна для волокна с постоянным коэффициентом затухания. В диапазоне от A до B (диапа-

зон *a*) кривая обратного рассеяния имеет постоянный наклон. Это свидетельствует об однородности волокна и поэтому, хотя измерения должны выполняться в обоих направлениях, позволяет провести измерение с одного конца. Затухание вычисляется между двумя точками *A* и *B*, причем обе должны находиться вне вероятных мертвых зон. Измерен-

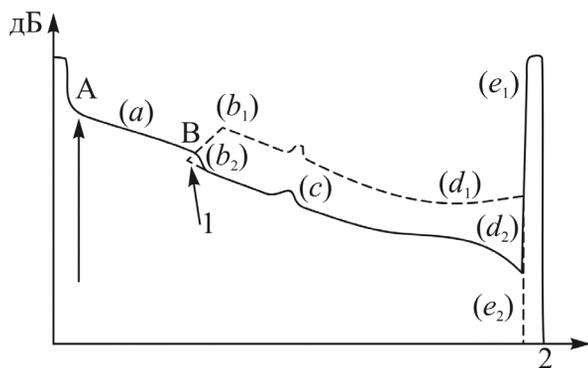


Рис. 5.19. Пример кривой обратного рассеяния: 1 – экстраполяция; 2 – длина

ное с обеих сторон среднее значение есть затухание. В этом случае может быть определен также коэффициент затухания. Даже если наклон по всей длине волокна не является строго постоянным (*a*)–(*d*), характеристики волокна могут быть аппроксимированы с помощью общих средних квадратических расчетов с учетом коэффициента корреляции.

В диапазоне *b* перепад в точке *B* свидетельствует об изменении локализованных потерь, вызванных внешними воздействиями, например сращиванием, или внутренними причинами. Если этот диапазон вызван сращиванием, он может быть положительным (b_2) или отрицательным (b_1). Он суммирует потери при сращивании и различия обратного рассеяния у двух волокон. По этой причине измерения должны выполняться на обоих концах. Локальные потери определяются как среднее значение двух измерений.

Для точного определения результата достаточно экстраполировать кривые на обеих сторонах относительно точки *B*. При этом длина перепада зависит от ширины импульса. Если данный перепад длиннее рассчитанного по ширине импульса, дефект может располагаться в участке волокна с более высоким затуханием или же может быть несколько перепадов, расстояние между которыми настолько мало, что его невозможно определить путем таких измерений.

Нерегулярности, подобные представленным на участке (*c*) (см. рис. 5.19), образованы за счет резкого увеличения обратного рассеяния. Их вклад в затухание может быть определен тем же путем, что и для диапазона (*b*).

В диапазоне (d) в некоторых случаях наклон кривой непостоянен по длине волокна, в результате чего появляется изгиб, который может быть или выпуклым (d_2) или вогнутым (d_1). Такой изгиб для ближнего конца волокна может образоваться в результате распространения оболочечных мод вследствие недостаточной их фильтрации. Изгиб может быть вызван внутренними и внешними воздействиями. Если воздействие является внутренним и не вызывает изменения затухания за счет поглощения, то причина заключается в постоянном изменении числовой апертуры для многомодовых волокон или в постоянном изменении диаметра поля моды для одномодовых волокон. Если воздействие является внешним, то причина может быть связана с увеличивающимся воздействием на волокно покрытия или кабеля в процессе его прокладки.

Внутренние и внешние воздействия обычно можно различить, приложив к волокну или кабелю дополнительную силу или изменив температуру. Характеристики, не изменяющиеся в этом случае, присущи самому волокну, изменяющиеся характеристики определяются внешними воздействиями.

В диапазоне (e) конец волокна или любая неоднородность волокна вызывают сильное положительное отражение (e_1) за счет эффектов Френеля или большие потери мощности обратного рассеяния (e_2) при отсутствии эффектов Френеля. Отражение также свидетельствует об изменении значения показателя преломления, которое может иметь место при механическом сращивании.

В некоторых случаях наклон непостоянен, и на кривой имеют место пульсации продолжительностью порядка одной ширины импульса. Обычно такого рода пульсации не формируются под действием периодических флуктуаций профиля показателя преломления, например числовой апертуры в многомодовых волокнах и диаметра поля моды в одномодовых волокнах. Они связаны со свойствами измерительного оборудования, и предполагается, что они могут усиливаться по мере приближения испытываемой длины волокна к предельной длине, определяемой динамическим диапазоном оборудования для обратного рассеяния. Указанные нерегулярности могут быть исключены с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов. В этих случаях измерения должны выполняться на обоих концах волокна.

Внешние воздействия влияют на кривую обратного рассеяния. Внешние воздействия – это растягивающие усилия или поперечные нагрузки, прилагаемые к кабелю и передаваемые волокну или волокнам в кабеле, или температурные изменения.

Изменения затухания (обычно только на одном конце волокна) измеряют до, во время и после воздействия внешних сил на волокно или кабель.

Характеристики кривой обратного рассеяния, которые являются следствием внутренних эффектов в волокне, остаются неизменными. Это такие неоднородности, как (*b*) и (*c*), волнистость и изгибы (*d*) внутреннего происхождения. Изгиб (*b*), вызванный сращиванием, может измениться. Изгиб, образовавшийся вследствие приложенных ранее внешних сил, может также измениться под действием дополнительных внешних сил.

По изменению кривизны изгиба можно определить, вызван он внутренними или внешними воздействиями. Если изгиб является результатом внутренних причин, его кривизна остается постоянной на участке (рис. 5.20, *a*, *б*), хотя средний наклон всей кривой (пунктирная линия) может линейно возрастать вдоль ее длины вследствие равномерных внешних воздействий. Изменения кривизны изгиба происходят в результате внешних причин (рис. 5.20, *a* и *в*).

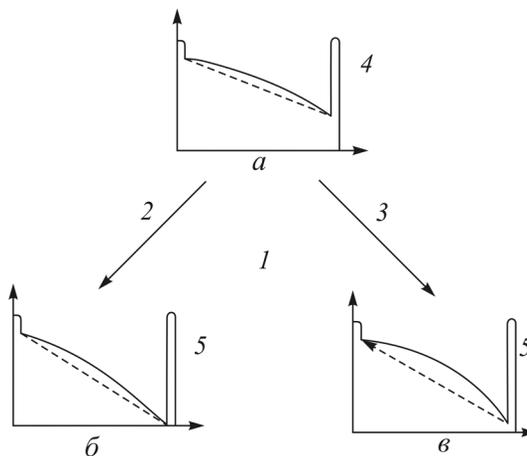


Рис. 5.20. Исследование изгиба: 1 – причина образования изгиба; 2 – внутренняя; 3 – внешняя; 4 – до воздействия; 5 – после воздействия

В случае постоянного наклона кривой до воздействия внешних сил (см. участок (*a*) на рис. 5.20) может происходить следующее:

- 1) наклон остается неизменным, затухание без изменения;
- 2) наклон изменяется, но остается плавным линейное увеличение затухания (рис. 5.21, *a*);
- 3) участок с постоянным наклоном превращается в дугу вдоль длины волокна – постоянное увеличение затухания, которое может быть вызвано слишком плотной намоткой кабеля. Количественная оценка в данном случае невозможна (рис. 5.21, *б*);

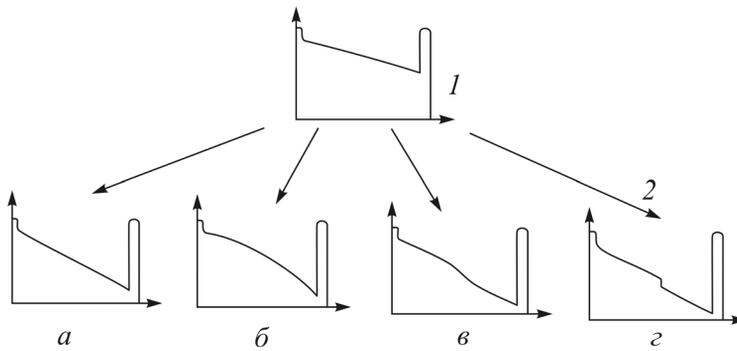


Рис. 5.21. Изменение обратного рассеяния:
1 – до воздействия; 2 – после воздействия

4) наклон увеличивается вдоль длины, постоянное увеличение затухания на отдельном участке волокна (рис. 5.21, в);

5) в дополнение к вышеуказанному на кривой обратного рассеяния образуется ступенька – волокно зафиксировано, и давление на волокно создается в определенном месте (рис. 5.21, з). Необходимо исследовать, вызвано это внешними или внутренними причинами.

5.5. Методы измерения ширины полосы пропускания

Модовая ширина полосы пропускания является составляющей полной полосы пропускания, которая может быть представлена выражением

$$B_T = (B_m^{-2} + B_{ch}^{-2})^{-1/2}, \quad (5.6)$$

где B_T – общая ширина полосы пропускания (включая модовую и хроматическую дисперсии); B_m – ширина полосы, связанная с модовой дисперсией; B_{ch} – ширина полосы, связанная с хроматической дисперсией. При этом предполагается, что характеристика в основном диапазоне модовой дисперсии и спектр источника имеют распределение Гаусса.

Ширина полосы B_{ch} , (МГц) связанной с хроматической дисперсией, обратно пропорциональна длине образца и при предположении, что источник имеет распределение Гаусса, может быть выражена формулой

$$B_{ch} = \frac{0,44 \times 10^6}{\Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L}, \quad (5.7)$$

где $\Delta\lambda$ – спектральная ширина источника на уровне половины амплитуды, нм; $D(\lambda)$ – коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм·км); L – длина образца, км.

Измерение модовой ширины полосы пропускания достигается путем сведения до минимума $\Delta\lambda$, так что разница между V_T и V_m становится менее 10%. Модовая ширина полосы пропускания может быть выражена через временную или частотную характеристики.

Временная характеристика (импульсная характеристика) $g(t)$ есть функция, определяемая оптической мощностью, вводимой в волокно, и оптической мощностью на выходе.

Частотная характеристика (частотный отклик) $G(\omega)$ определяется как функция

$$G(\omega) = \frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)}, \quad (5.8)$$

где $P_1(\omega)$ – энергетический спектр модулирующего сигнала в поперечном сечении 1, $P_2(\omega)$ – энергетический спектр модулирующего сигнала в поперечном сечении 2. Амплитудная и фазовая характеристики являются абсолютными величинами, составляющими $G(\omega)$. При этом частотная и импульсная характеристики в линейной системе связаны между собой следующим образом:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (5.9)$$

Для измерения ширины полосы пропускания используются два метода.

1. Метод импульсной характеристики, когда импульсная характеристика измеряется путем сравнения входного и выходного импульсов испытываемого волокна. При этом частотная и импульсная характеристики могут быть определены с помощью преобразования Фурье для входного и выходного импульсов.

2. Метод частотной характеристики, в котором амплитуда измеряется как функция частоты двумя способами:

– с помощью спектрального анализа выходного сигнала при его возбуждении входным импульсом;

– с помощью выходного анализа сигнала качающейся частоты или дискретных частот.

Метод импульсной характеристики

Система ввода излучения с целью воспроизводимости должна обеспечить незначительное искажение импульса по сравнению с искажением импульса в испытуемом волокне. В противном случае форма

выходного импульса системы ввода излучения должна регистрироваться и затем использоваться для расчета ширины полосы пропускания волокна. Могут применяться два способа ввода излучения.

1. «Полное возбуждение», при котором «конус возбуждения» больше максимальной теоретической числовой апертуры волокна. При таком возбуждении диаметр светового пятна приблизительно равен диаметру сердечника волокна. Испытываемое волокно не должно иметь микроизгибов. Распределение светового потока на выходе системы возбуждения должно быть достаточно постоянным и не зависеть от устройства, соединяющего источник света с волокном (это свидетельствует о равномерном возбуждении всех мод).

Полные условия возбуждения могут обеспечивать следующие устройства:

- система линз;
- волоконная система возбуждения (например, генератор мод ступень-градиент-ступень).

2. «Ограниченное возбуждение», при котором размер светового пятна и угол конуса позволяют моделировать характеристики волокон большой длины. Примером условий возбуждения такого типа могут быть условия возбуждения, представленные, реализуемые в схеме на рис. 5.22. Система возбуждения должна быть подготовлена таким образом, чтобы изменения в распределении мод в волокне при юстировке волокна были минимальны.

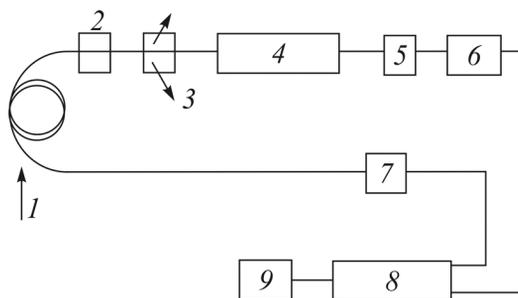


Рис. 5.22. Измерение характеристики в основном диапазоне. Пример измерения импульсной характеристики: 1 – испытываемое волокно; 2 – дополнительный фильтр мод; 3 – устройство выделения мод; 4 – смеситель мод; 5 – светящийся источник; 6 – импульсный генератор; 7 – детектор; 8 – осциллограф; 9 – блок обработки данных

Оптический источник должен иметь известную заданную длину волны и спектральную ширину. У инжекционных лазерных диодов лазерное излучение должно значительно превышать спонтанное излуче-

ние. Для поддержания мощности, длины волны и спектральной ширины излучения на постоянном уровне в течение всего испытания следует принять необходимые меры. Необходимо указать частотную характеристику и нелинейность источника.

Необходимо учитывать частотную характеристику оптического детектора. Предпочтительнее использовать высокоскоростной фотодиод. Обычно ширина полосы частот детектора значительно превышает ширину полосы испытываемого волокна. Однако могут быть введены поправки, поэтому должны быть указаны чувствительность полосы пропускания и нелинейность детектора. Чувствительность поверхности детектора должна быть равномерной.

В измерениях используется вспомогательное оборудование: перестраиваемый генератор серии оптических импульсов (с перестраиваемой шириной и частотой повторения), стробирующий осциллограф, графопостроитель. Принятые меры должны обеспечивать калибровку, линейность и стабильность системы.

При проведении измерений волокно должно быть сцентрировано с осью конуса ввода, проведена юстировка детектора: выходной конец волокна должен быть сцентрирован с поверхностью детектора так, чтобы все испускаемые лучи были приняты детектором. Входной и выходной импульсы волокна фиксируют и определяют модовую ширину полосы пропускания.

Метод частотной характеристики

Схема устройства для измерения частотной характеристики представлена на рис. 5.23.

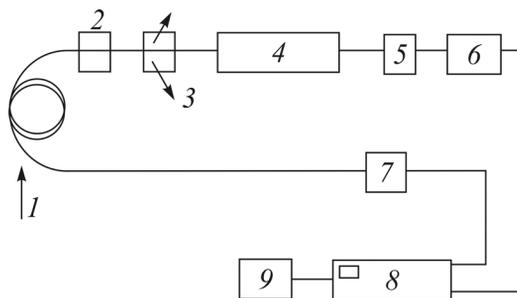


Рис. 5.23. Измерение характеристики в основном диапазоне. Пример измерения частотной характеристики: 1 – испытываемое волокно; 2 – факультативный фильтр мод; 3 – устройство выделения мод; 4 – передатчик помех моды; 5 – светозлучающий источник; 6 – генератор качающейся частоты; 7 – детектор; 8 – спектральный анализатор или анализатор с решеткой; 9 – блок обработки данных

Помимо используемых в предыдущих схемах источника излучения, фильтра оболочечных мод, оптического детектора добавляется вспомогательное оборудование: анализатор спектра, оптический синусоидальный генератор. Принимаемые меры должны обеспечивать калибровку, линейность системы и стабильность.

При проведении измерений волокно должно быть сцентрировано с осью конуса ввода, проведена юстировка детектора: выходной конец волокна должен быть сцентрирован с поверхностью детектора так, чтобы все испускаемые лучи были приняты детектором.

Входные и выходные сигналы волокна фиксируют и вычисляют модовую ширину полосы пропускания (BW), определенную точкой при 3 дБ (оптических) кривой амплитуда–частота.

Метод передаваемой или излучаемой мощности

Оптическая непрерывность длины волокна определяется его способностью передавать оптическую энергию. Непрерывность можно проверить путем введения светового луча на одном конце волокна и измерения световой энергии на выходе на другом.

Нарушение оптической непрерывности (часто рассматриваемое как разрыв) в непрерывном волокне имеет место, когда фактическая мощность, измеренная на выходном конце волокна, меньше уровня мощности на входе на установленное значение при использовании определенного оборудования для запуска луча и измерений. Это значение устанавливается по соглашению между потребителем и изготовителем.

Испытание для определения оптической непрерывности предназначено для того, чтобы определить, является ли оптическое волокно непрерывным и не произошло ли значительное увеличение затухания.

При испытании не проводится измерение, а только обнаруживается целостность или разрыв. Это необходимо, когда короткие длины волокна подвергаются механическому воздействию, например во время испытаний на растяжение, изгибы, кручение, когда аппаратура для измерения обратного рассеяния не может быть применена из-за ограничений разрешающей способности длины волокна.

Если испытываемое волокно имеет достаточную длину, применяются методы, основанные на использовании аппаратуры для измерения обратного рассеяния.

Обнаружение разрывов может быть необходимо:

- а) в испытываемом образце перед механическим воздействием;
- б) в волокне после механического воздействия.

Устройство для проведения измерений состоит из отдельных передающих и приемного блоков. Передающее устройство состоит из источника света, работающего от регулируемого стабилизированного источника постоянного тока. Приемное устройство включает в себя оптоэлектронный детектор, стабилизированный усилитель и измеритель уровня принимаемой мощности. Возможно применение приемного устройства с электронной схемой, которая включает индикаторную лампу, если передаваемая энергия ниже установленного уровня.

На рис. 5.24 представлена типичная схема для проведения испытаний. Для ускорения испытаний передающее и приемное устройства могут быть независимыми друг от друга. Позиции 6–10 могут быть заменены соответствующим измерителем мощности *11*.

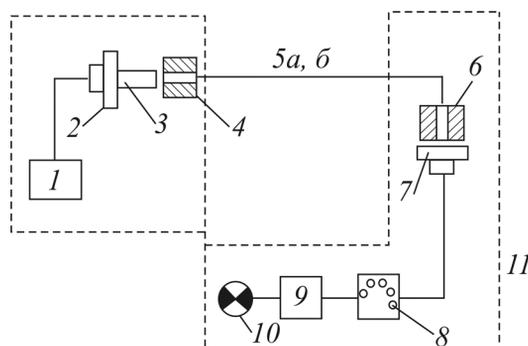


Рис. 5.24. Типичная схема для проведения испытаний по передаче или излучению мощности: 1 – стабилизированный источник постоянного тока; 2 – лампа или светодиод; 3 – возбуждающее волокно; 4 – приспособление для установки волокна; 5 – (а) контрольное волокно, (б) испытываемое волокно; 6 – приспособление для установки волокна (при необходимости); 7 – PIN-фотодиодный детектор; 8 – прибор для регулирования чувствительности; 9 – пороговый детектор; 10 – индикатор; 11 – измеритель мощности

Источник оптического излучения представляет собой излучающее волоконно-оптическое оконечное устройство с большой излучающей поверхностью, например лампа или светодиод 2. Излучающее волоконно-оптическое оконечное устройство питается от источника постоянного тока. Для удобства оно может быть сопряжено с возбуждающим волокном 3. Для исключения колебания потерь на излучающей стороне волоконно-оптического оконечного устройства возбуждающее волокно, если оно используется, должно иметь ступенчатый показатель преломления и диаметр, значительно превышающий диаметр сердцевины испытываемого волокна.

Оптический детектор представляет собой приемное устройство, согласованное с используемым источником 7, например PIN-фотодиод с пороговым детектором 9, настраиваемое с помощью потенциального делителя 8 и соединенное с индикатором 10. Может использоваться любое эквивалентное устройство. Чувствительная поверхность детектора должна иметь большие размеры.

Концевые устройства приспособлений для установки волокна 4 и 6 на сторонах передающего и приемного волоконно-оптических оконечных устройств должны обеспечивать быструю установку волокна.

Контрольное волокно 5, а соединяется с источником и детектором и используется для определения нулевой калибровочной точки.

При проведении испытаний устройство регулируют:

а) проверяют работу устройства с помощью короткого отрезка контрольного волокна 5, а;

б) при использовании устройства в соответствии с рис. 5.24 следует установить ручку контроля чувствительности 8 так, чтобы порог чувствительности детектора 9 был превышен и индикатор 10 действовал. (Если используется измеритель мощности, следует проверить, чтобы показания были достаточного уровня).

При первоначальном измерении испытуемого образца необходимо:

а) заменить контрольное волокно 5, а испытуемым волокном 5, б;

б) увеличить чувствительность 8 на предполагаемое значение затухания испытуемого волокна 5, б;

в) убедиться, что индикатор 10 действует. Действующий индикатор свидетельствует о целостности волокна;

г) если индикатор 10 не действует, увеличивать чувствительность, пока он не начнет действовать. Определить значение (дБ), на которое пришлось повысить чувствительность. (Если используется измеритель мощности, определить значение роста затухания при изменении мощности);

д) если увеличение затухания превышает заданное значение, волокно разрушено.

Измерение после механического воздействия выполняется только на длине волокна, которое не было повреждено до начала механического воздействия, при этом следует:

а) подвергнуть волокно требуемому механическому воздействию;

б) при необходимости заменить волокно в испытательном устройстве;

в) увеличивать чувствительность 8, пока не начнет действовать индикатор 10. Вычислить требуемую чувствительность относительно полученной ранее. (Если используется измеритель мощности, выполните

расчет, используя относительные показания.) Если рост затухания превышает заданное значение вследствие механических воздействий, волокно считается разрушенным.

Метод фазового сдвига

Метод позволяет определить коэффициент дисперсии одномодовых и многомодовых волокон путем измерения групповой задержки на различной длине волны.

Для определения дисперсии используют два метода, отличающиеся по типу оптического источника и по методу измерения задержки: фазового сдвига и задержки импульса.

Метод фазового сдвига предусматривает использование лазерных диодов или светоизлучающих диодов, работающих в требуемом диапазоне длин волн.

Испытание образца проводят на строительной длине волокна. Волокно должно находиться на соответствующем накопительном устройстве и перед испытанием должно быть подвергнуто кондиционированию.

Принципиальные схемы расположения испытательного оборудования, работающего по методу фазового сдвига, в котором используются лазерные и светоизлучающие диоды, приведены на рис. 5.25 и 5.26.

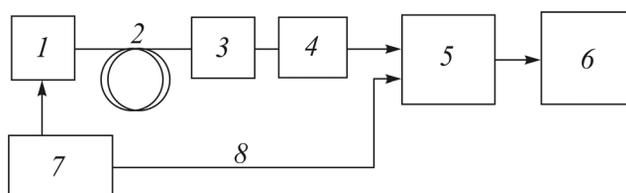


Рис. 5.25. Расположение испытательного оборудования, в котором используются лазерные диоды (фазовый сдвиг): 1 – лазерные диоды; 2 – испытываемое волокно; 3 – аттенюатор; 4 – оптический детектор; 5 – векторный вольтметр; 6 – ЭВМ; 7 – генератор импульсов; 8 – контрольный сигнал

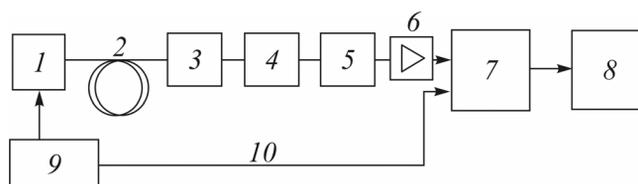


Рис. 5.26. Расположение испытательного оборудования, в котором используются светодиоды (фазовый сдвиг): 1 – светодиоды; 2 – испытываемое волокно; 3 – селектор длины волны; 4 – аттенюатор; 5 – оптический детектор; 6 – усилитель; 7 – векторный вольтметр; 8 – ЭВМ; 9 – генератор импульсов; 10 – контрольный сигнал

В качестве оптического источника используют несколько лазерных светоизлучающих диодов, работающих на различной длине волны и перекрывающих весь требуемый диапазон длин волн. Чувствительность и диапазон оптического детектора должны соответствовать выбранному диапазону длин волн. Генератор импульсов используют для модулирования оптического источника на требуемой частоте, а также для выработки контрольного сигнала для векторного вольтметра. Сдвиг фаз на различных длинах волн измеряется векторным вольтметром.

Если используют источник с широким спектром, то для выбора требуемой длины волны, на которой измеряют групповую задержку, следует применять селектор. Для этих целей можно использовать монохроматор или набор фильтров интерференции. В зависимости от типа измерений селектор используют на входе или выходе измеряемого волокна.

При проведении испытания:

- а) волокно подсоединяют к лазерному диоду или светодиоду;
- б) с помощью векторного вольтметра измеряют сдвиг фазы между контрольным сигналом и сигналом, полученным на выходе на различных длинах волн. Групповая задержка в зависимости от длины волны $\tau_g(\lambda)$ определяется по формуле

$$\tau_g(\lambda) = \varphi(\lambda) / (2\pi f_0), \quad (5.10)$$

где f_0 – рабочая частота, Гц; $\varphi(\lambda)$ – измеренный сдвиг фазы, рад;

в) на основе измеренных значений групповой задержки вычерчивается соответствующая кривая, затем путем взятия производной рассчитывается коэффициент дисперсии в зависимости от длины волны. На рис. 5.29 и 5.30 изображена относительная временная задержка и коэффициент дисперсии в зависимости от длины волны. Правильное построение кривой очень важно, так как кривая влияет на значение дисперсии, получаемое в результате измерений.

В результате измерений фиксируют наряду с другими данными график времени относительной задержки, а также коэффициент дисперсии во всем рассматриваемом спектральном диапазоне. Кроме этого, указывают длину волны нулевой дисперсии и тип используемой кривой.

Метод задержки импульса

Метод задержки импульса предусматривает использование лазерных диодов или лазера, выполненного на рамановских волокнах, работающих в требуемом диапазоне длин волн.

Испытательное оборудование метода задержки импульса, в котором используются лазерные диоды или рамановские лазеры, представлено на принципиальных схемах (рис. 5.27 и 5.28).

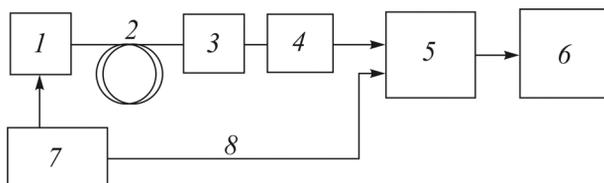


Рис. 5.27. Расположение испытательного оборудования, в котором используются лазерные диоды (метод определения задержки): 1 – лазерные диоды; 2 – испытываемое волокно; 3 – аттенюатор; 4 – оптический детектор; 5 – осциллограф; 6 – ЭВМ; 7 – синхронизирующая цепь; 8 – триггер

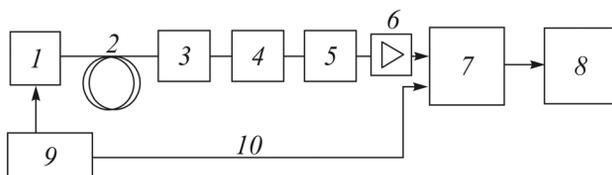


Рис. 5.28. Расположение испытательного оборудования, в котором используется рамановский лазер (метод определения задержки): 1 – лазер на алюмоиттриевом гранате; 2 – рамановское волокно; 3 – аттенюатор; 4 – монохроматор; 5 – испытываемое волокно; 6 – оптический детектор; 7 – осциллограф; 8 – ЭВМ; 9 – синхронизирующая цепь; 10 – триггер

Оптическим источником может быть рамановский лазер или лазерный диод.

Рамановский лазер можно изготовить на основе ИАГ-лазера, кристалл которого легирован Nd, оптического волокна, генерирующего рамановское излучение, и оптического аттенюатора. Такой лазер будет генерировать сигналы в широком диапазоне длин волн. В качестве рамановского волокна используют соответствующее оптическое волокно. Оптический аттенюатор необходим для регулирования мощности возбуждения рамановского волокна.

Лазерные диоды используются различных типов, работающих на разной длине волны для того, чтобы обеспечить требуемый диапазон длин волн.

Сигналы, генерируемые высокостабильным синтезатором частоты, используются для управления оптическим источником. Синхронизирующая цепь подает также с определенной задержкой триггерные импульсы на осциллограф.

Чувствительность и ширина полосы частот оптического детектора должны быть согласованы с выбранной длиной волны в требуемом диапазоне.

Для наблюдения за оптическими импульсами используется широкополосный осциллограф, работающий в режиме реального времени, или стробоскопический осциллограф. В сочетании с осциллографом может использоваться процессор сигналов, предназначенный для устранения помех или фазового дрожания формы импульса.

Если используется рамановский лазер, то монохроматор применяется для выбора длины волны оптических сигналов, подаваемых в испытываемое волокно.

При проведении испытаний:

а) испытываемое волокно подсоединяют к лазерному диоду или рамановскому лазеру;

б) время задержки сигнала, проходящего по испытываемому волокну при различной длине волны, определяют с помощью осциллографа. Если используют рамановский лазер, то требуемую длину волны выбирают с помощью монохроматора;

в) на основе измеренных значений групповой задержки строят кривую и путем деривации получают коэффициент дисперсии в зависимости от длины волны. На рис. 5.29 и 5.30 изображены относительная задержка и коэффициент дисперсии в зависимости от длины волны.

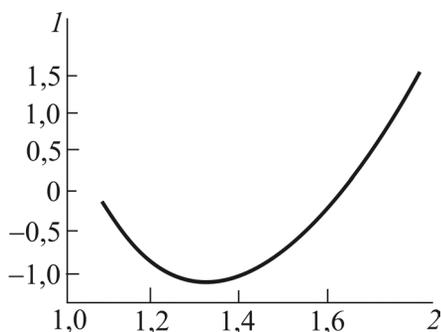


Рис. 5.29. Время относительной задержки в зависимости от длины волны: I – время относительной задержки (нс); 2 – длина волны (мкм)

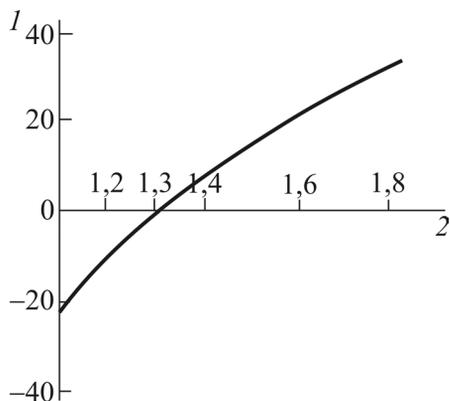


Рис. 5.30. Коэффициент хроматической дисперсии в зависимости от длины волны: I – коэффициент (хроматической) дисперсии (пс·нм·км); 2 – длина волны (мкм)

В результате измерений фиксируют наряду с другими данными график времени относительной задержки и рассчитанную общую дисперсию во всем интересующем спектральном диапазоне, а также длину волны нулевой дисперсии (при необходимости).

5.6. Числовая апертура. Распределение света в дальнем поле

Числовая апертура (NA) градиентного многомодового волокна является важным параметром, который показывает способность волокна улавливать свет. Он используется для прогнозирования эффективности ввода, потерь в местах сращивания и стойкости к микро- и макроизгибам. Теоретическая максимальная числовая апертура градиентного многомодового волокна NA определяется по формуле $NA_{th} = \sin\Theta_m$, где Θ_m является наибольшим углом меридианного луча, который может направляться волокном. Выражение NA через профиль показателя преломления волокна выглядит следующим образом:

$$NA_{th} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{или} \quad NA_{th} = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (5.11)$$

где $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ при $\Delta \ll 1$, n_1 – максимальный показатель преломления сердечника, n_2 – показатель преломления оптической оболочки.

NA может быть определена по диаграмме излучения в поле дальней зоны, измеряемой на короткой длине волокна, или по профилю показателя преломления волокна. При использовании метода поля дальней зоны получают диаграмму интенсивности излучения волокна $I(\Theta)$. NA_{ff} определяют как синус половины угла, при котором эта интенсивность соответствует 5% ее максимального значения.

Отношение между числовой апертурой в поле дальней зоны (NA_{ff}) и максимальной теоретической числовой апертурой (NA_{th}) зависит также от длины волны, используемой при измерениях в поле дальней зоны, и от профиля показателя преломления. Чаще всего измерения в поле дальней зоны проводят на длине волны 850 нм, тогда как измерения профиля показателя преломления проводят на 540 или 633 нм.

Для этих длин волн отношение между NA_{ff} и NA_{th} задается формулой

$$NA_{ff} = kNA_{th}, \quad (5.12)$$

где $k = 0,95$, если измерение проводят на 540 нм, и $k = 0,96$, если измерение проводят на 633 нм. NA_{ff} на 850 нм будет числовой апертурой волокна. Это значение можно получить непосредственно при измерении в поле дальней зоны на 850 нм или косвенно на базе измерения профиля, используя уравнение (5.12).

Метод распределения света в дальнем поле

Метод описывает измерение углового распределения интенсивности излучения. Числовая апертура многомодового оптического волокна может быть вычислена на основе результатов этого измерения с использованием уравнения (5.12) для NA_{ff} .

Применяют некогерентный источник света, чтобы получить по всей поверхности конца образца устойчивую освещенность (изменение интенсивности освещенности менее 10%). Он должен быть стабильным по интенсивности излучения и по положению в течение всего времени проведения измерений.

Используют систему оптических компонентов для создания монохроматического пятна (общая ширина на половине максимальной амплитуды менее 100 нм) с устойчивой яркостью, диаметром, превышающим диаметр конца образца, на котором проводят измерения, и числовой апертурой, превышающей числовую апертуру этого образца. Кроме отдельно оговоренных случаев, центральная длина волны должна составлять (850 ± 25) нм.

Используют средства проверки центровки конца. Можно использовать оптические фильтры для ограничения спектральной ширины источника.

Средства удержания вводного конца образца, на котором проводят измерения, должны обеспечивать устойчивое и воспроизводимое регулирование его положения без значительной деформации волокна. Соответствующие средства применяют для центровки поверхности ввода с вводимым светом.

Соответствующие средства должны обеспечить устранение передачи света в оболочку образца, на котором проводятся измерения. Как правило, эту роль выполняет покрытие волокна. В противном случае необходимо использовать подавитель мод оболочки на обоих концах образца.

Могут применяться три (A , B , C) эквивалентных метода для детектирования углового распределения (в поле дальней зоны) интенсивности излучения образца, на котором проводятся измерения. Методы A и B являются угловым сканированием диаграммы в поле дальней зоны, метод C заключается в сканировании пространственного результата преобразования угловой диаграммы интенсивности излучения (может использоваться сканирующий детектор малой или большой поверхности).

Схема углового сканирования по методу A представлена на рис. 5.31. Средства удержания и центровки выходного конца образца, на котором проводятся измерения, должны быть такими, чтобы плоскость

выходного торца волокна была перпендикулярна к оси вращения оптического детектора и чтобы ось волокна совпадала с этой осью вращения. Например, возможно применение вакуумного зажима, смонтированного на микрометрическом позиционере X-Y-Z микроскопа, позволяющего сцентрировать конец волокна. Устройство может иметь гониометр или плиту, приводимую во вращение шаговым двигателем.

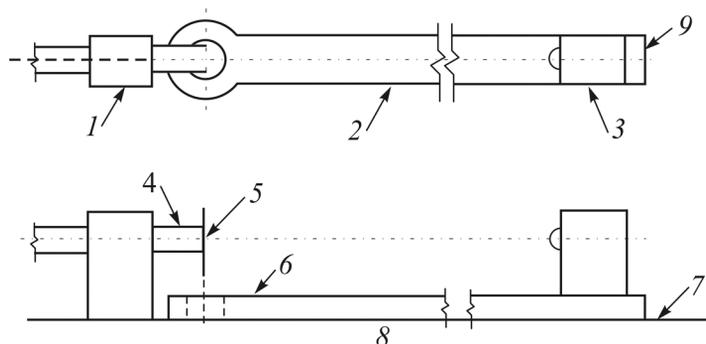


Рис. 5.31. Угловое сканирование методом *A*: 1 – зажим; 2 – вид сверху; 3 – детектор; 4 – образец; 5 – выходной конец; 6 – подвижный кронштейн; 7 – основание; 8 – вид сбоку; 9 – ноль

Применяют такие устройства для вращения оптического детектора, чтобы детектор описывал дугу, достаточную для практического охвата угла излучения, выходящего из испытываемого образца (например, тарированный гониометр). Ось вращения механизма должна совпадать с поверхностью конца образца, а плоскость вращения механизма должна быть параллельна оси образца. Должна быть возможность зафиксировать относительное угловое положение детектора к оси испытываемого образца.

Схема углового сканирования по методу *B* представлена на рис. 5.32. Испытываемый образец удерживают таким образом, чтобы выходной торец детектора был на оси вращения оптического волокна и чтобы ось детектора совпадала с осью вращения. Этот механизм (например, гониометр или прецизионная плита вращения) должен описывать такую дугу, чтобы все излучение на выходе испытываемого образца в плоскости вращения попадало на неподвижный детектор. То есть угол вращения должен быть больше полного угла излучения на выходе испытываемого образца. Угол между осью образца и линией, соединяющей детектор и выходной торец образца, должен фиксироваться в документации.

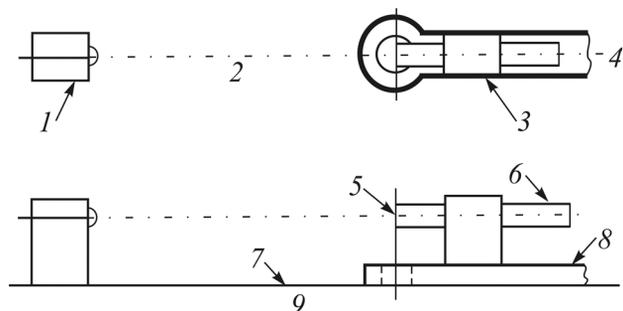


Рис. 5.32. Угловое сканирование, методом В: 1 – детектор; 2 – вид сверху; 3 – зажим; 4 – ноль; 5 – выходной конец; 6 – образец; 7 – основание; 8 – подвижный кронштейн; 9 – вид сбоку

Схема сканирования диаграммы пространственного поля по методу С представлена на рис. 5.33.

В качестве держателя конца волокна следует использовать устройство, поддерживающее и ориентирующее выходной конец испытуемого образца и позволяющее проводить устойчивую и воспроизводимую регулировку положения.

Для пространственного изображения поля испытуемого образца в дальней зоне применяют соответствующие устройства, например объектив микроскопа или другие хорошо скорректированные объективы, при этом получают Фурье-образ выходной диаграммы волокна в поле ближней зоны. Эта диаграмма или ее изображение анализируют с помощью диафрагмированного детектора так, чтобы зарегистрировать силу излучения поля в дальней зоне. Диаметр диафрагмы менее или равен половине предела дифракции системы:

$$d \leq \frac{1,22M \lambda f}{2D}, \quad (5.13)$$

где d – диаметр диафрагмы, мкм; λ – длина волны, выходящей из волокна, нм; f – фокусное расстояние преобразующего объектива, мм; D – диаметр сердечника волокна, мкм; M – увеличение задней фокусной плоскости преобразующего объектива по сравнению с анализируемой плоскостью.

В сканирующем устройстве используют метод анализа диаграммы в поле дальней зоны в зависимости от диафрагмированного детектора. Должна быть проведена калибровка с целью измерения степени преобразования, дающей перемещение сканирующего устройства в зависимости от реального перемещения при сканировании в задней фокальной

плоскости преобразующего объектива в поле дальней зоны. В связи с этим может использоваться градуированная мера, точно установленная в задней фокальной плоскости L_1 .

Кроме того, соотношение между положением анализатора в плоскости пространственного преобразования (задняя фокальная плоскость L_1 на рис. 5.33) и углом излучения (Θ) относительно выходной оси образца выражается следующим образом:

$$y = f \sin \Theta, \quad (5.14)$$

где y – расстояние от оптической оси до плоскости пространственного преобразования; f – фокусное расстояние преобразующего объектива L_1 ; Θ – угол относительно оптической оси.

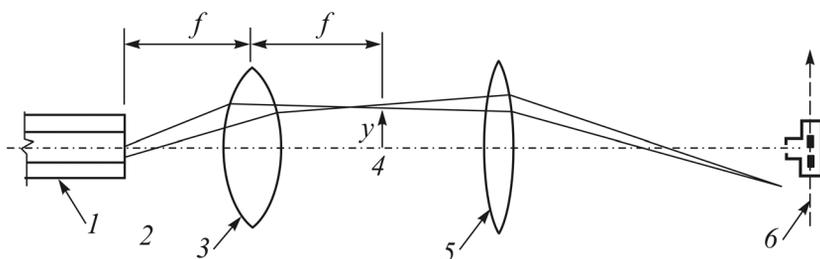


Рис. 5.33. Сканирование диаграммы пространственного поля, метод *C*: 1 – образец; 2 – поле ближней зоны; 3 – объектив L_1 (преобразователь); 4 – поле дальней зоны; 5 – объектив L_2 (транслятор); 6 – сканирующий детектор (типовой)

С помощью соответствующих средств регистрируют $E(y)$ обнаруженную интенсивность излучения в зависимости от положения y анализатора и корректируют обнаруженную интенсивность излучения по формуле

$$I(\Theta) = E(y) / \cos \Theta, \quad (5.15)$$

где $I(\Theta)$ – распределение угловой интенсивности излучения, обнаруженной угловым анализатором; y – расстояние от диафрагмированного детектора до оптической оси; $E(y)$ – энергетическая светимость на расстоянии y от оптической оси; Θ – угол относительно оси образца.

Используют оптический детектор с линейностью не хуже 5 % в измеряемом диапазоне интенсивности падающего излучения. Может применяться диафрагма для уменьшения эффективного размера детектора и улучшения разрешения. Детектор или диаметр диафрагмы определяют на основе требуемого углового разрешения по формуле

$$D = \frac{\Theta R}{0,006}, \quad (5.16)$$

где D – диаметр апертуры детектора, мкм; Θ – желаемое угловое разрешение, °; R – расстояние от выходного конца образца до детектора или до диафрагмы, см.

Обычно используется разрешение менее или равное $0,5^\circ$.

Расстояние R , мм, должно удовлетворять ограничительному условию поля дальней зоны:

$$R \geq \frac{d^2}{\lambda}, \quad (5.17)$$

где d – диаметр излучения испытываемого образца, мкм; λ – длина центральной волны оптического источника, нм.

Образец для проведения измерений должен быть длиной $(2,0 \pm 0,2)$ м и быть характерным для данного волокна. Концы измеряемого образца должны быть гладкими, плоскими и перпендикулярными к оси волокна. Точность измерений не может быть получена при неперпендикулярности выходного торца. Рекомендуемые концевые углы – менее 2° .

При проведении измерений концы образца закрепляют в держателях. Входной торец образца должен быть приблизительно в центре входной зоны сфокусированного изображения с постоянной яркостью. Оптический источник регулируют на требуемую длину волны и спектральную ширину. Диаграмму излучения в поле дальней зоны анализируют вдоль диаметра и фиксируют интенсивность излучения в зависимости от углового положения.

При расчетах используют угол с 5-процентной интенсивностью излучения Θ_5 . Анализируемая диаграмма должна быть нормирована по отношению к пиковому значению. Фиксируют точки диаграммы, для которых интенсивность излучения составляет 5 % максимума. Половину угла между этими двумя точками фиксируют как Θ_5 .

Числовая апертура в поле дальней зоны определяется по формуле $NA_{ff} = \sin \Theta_5$.

В документации должна фиксироваться помимо основной информации следующая дополнительная:

- длина центральной волны и спектральная ширина интерференционных фильтров, если они применяются;
- вид калибровки устройства обнаружения и угловое разрешение;
- размер и числовая апертура излучаемого светового пятна;
- метод подавления мод оболочки.

Принцип проведения измерений показан на рис. 5.34. Интенсивность излучения (количество света на единицу телесного угла) определяется как функция полярного угла в одной плоскости с осью волокна (диаграмма направленности излучения). Расстояние между концом образца и детектором должно быть большим по сравнению с диаметром сердечника оптического волокна. Методика детектирования соответствует описанной в методе «Распределение света в ближнем поле».

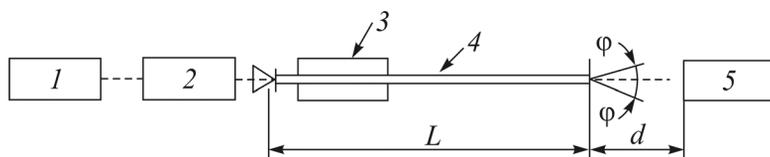


Рис. 5.34. Принцип измерения: 1 – источник света; 2 – устройство для возбуждения волокна; 3 – фильтр оболочечных мод; 4 – волокно; 5 – детектор

При измерении образец закрепляют в держателе, и на него направляют пучок света в соответствии с рис. 5.34. Интенсивность излучения определяется как функция полярного угла в одной плоскости, совпадающей с осью волокна. Строится график полной интенсивности излучения. В многомодовых оптических волокнах числовая апертура ($=\sin \varphi$) вычисляется по углу φ , соответствующему 5%-му уровню значений интенсивности излучения от максимального (см. рис. 5.34).

Метод длины волны отсечки

Метод предназначен для измерения длины волны отсечки в одномодовых оптических волокнах. Эта длина волны является предельной, выше которой мода второго порядка уже не распространяется. Измеренное значение, в общем, зависит от длины образца. Длину волны отсечки измеряют на образце длиной 2 м. Испытуемый образец изгибают в виде одной петли радиусом 140 мм.

Одномодовый режим работы оптического волокна определяется длиной волны отсечки, которую можно измерить методами передаваемой мощности и по диаметру модового пятна.

Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности основано на измерении передаваемой мощности в зависимости от длины волны и заключается в сравнении сигнала, передаваемого по волокну небольшой длины, с образцовым сигналом, который получают на выходе либо испытываемого волокна, согнутого в кольцо диаметром менее 140 мм, либо многомодового волокна длиной от 1 до 2 м. При

этом следует использовать модулированный источник излучения с шириной спектра, не превышающей 10 нм, а приемник должен быть выполнен по фазочувствительной схеме детектирования с тем, чтобы получить наилучшее отношение сигнал/шум.

Процедура измерений включает два этапа, на первом из которых производят измерение образцовой оптической мощности $P_1(\lambda)$, на втором – измеряют мощность $P_2(\lambda)$ на выходе испытываемого волокна, изогнутого меньшим радиусом, обычно составляющим 30 мм, или мощность $P_3(\lambda)$ на выходе 1–2 м многомодового волокна. При этом выходную мощность $P_1(\lambda)$ регистрируют на каждой длине волны диапазона, предположительно включающего длину волны отсечки.

Отношение передаваемой мощности $P_1(\lambda)$ к $P_2(\lambda)$ или $P_1(\lambda)$, к $P_3(\lambda)$ рассчитывают согласно выражению

$$\xi(\lambda) = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (5.18)$$

где $i = 2$ или 3 в зависимости от метода.

Если используется первый метод, длину волны отсечки определяют (рис. 5.35) по максимальной длине волны, при которой $\xi(\lambda) = 0,1$ дБ, если используется второй метод – длину волны отсечки определяют (рис. 5.36) при пересечении прямой 1 , проведенной на $0,1$ дБ выше линейного участка 2 кривой $\xi(\lambda)$.

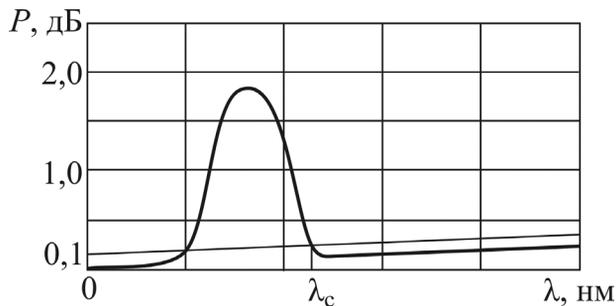


Рис. 5.35. График, отражающий измерение длины волны отсечки с использованием одномодового волокна

Данный метод может быть развит для измерения коэффициента затухания моды HE_{11} , для этого одномодовое волокно длиной около 2 м укорачивают до 0,5 м, сохраняя условия возбуждения и измеряя мощность на его выходе $P_4(\lambda)$ в том же диапазоне длин волн. Коэффициент затухания линейной моды определяют по формуле

$$\alpha_{11}(\lambda) = \frac{10}{L} \lg \frac{P_1/P_2 - 1}{P_4/P_2 - 1}, \quad (5.19)$$

где L – длина окружности петли номинальным радиусом 140 мм. При измерении коэффициента затухания волокно не следует подвергать изгибам радиусом менее 140 мм.

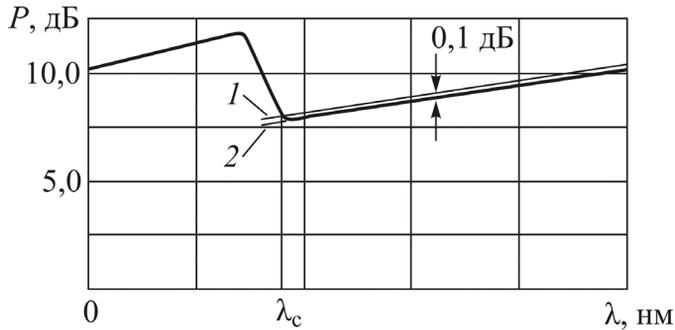


Рис. 5.36. График, отражающий измерение длины волны отсечки с использованием многомодового волокна

Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового пятна связано с первоначальным измерением модового пятна W . Измерение модового пятна может быть проведено двумя методами: методом проходящих полей и методом поперечного сдвига.

Метод проходящих полей, или, как его еще называют, метод ближнего поля, основан на прямом измерении диаметра модового поля с помощью хорошо сфокусированной оптики, осуществляющей передачу распределения мощности излучения по торцу волокна на площадку фотодиода, регистрируя тем самым интенсивность в каждой точке ближнего поля. Для этого увеличительная оптика должна иметь числовую апертуру и, следовательно, разрешающую способность, совместимую с требуемой точностью измерений, но не хуже 0,3. Допускается применение сканирующего фотодиода с точечной апертурой, сканирующего зеркала с точечной апертурой и фотодиодом, сканирующих камер, фиксированного диода с переменной апертурой или вращающимся волокном.

Метод поперечного сдвига основан на измерении мощности излучения, выходящего из двух последовательно соединенных волокон при их взаимном радиальном смещении в месте соединения. Размер модового пятна при гауссовской аппроксимации распределения поля определяют на уровне $1/e^2$ функции передачи мощности в зависимости от смещения; он имеет максимальное значение при соосном расположении волокон.

Отличительной особенностью данного метода является его простота при точности измерения, не уступающей другим методам, однако в отличие от предыдущего метода данный метод не позволяет определять геометрические параметры волокна, в частности диаметр и неконцентричность сердцевины и оболочки.

Так как диаметр модового поля зависит от длины волны, это свойство было положено в основу метода измерения длины волны отсечки путем ее линейной экстраполяции согласно рис. 5.37.

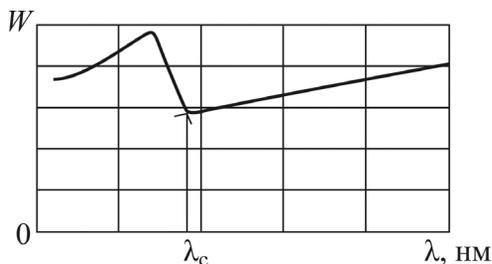


Рис. 5.37. График, отражающий измерение длины волны отсечки с использованием модового пятна

Независимо от используемого метода следует предотвратить распространение оболочечных мод, не оказывая влияния на распространение мод более высокого порядка.

При проведении измерений диаметр модового пятна измеряют при различной длине волны в требуемом диапазоне длин волн. Вычерчивают график зависимости диаметра модового пятна от длины волны и выполняют линейную экстраполяцию, как показано на рис. 5.38. Длину волны отсечки определяют в месте пересечения линий экстраполяции.

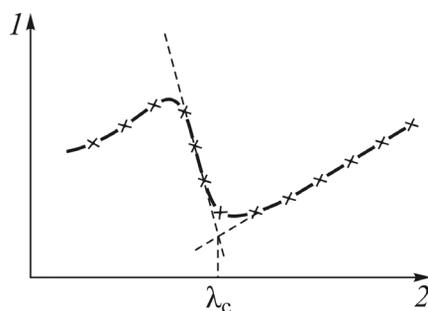


Рис. 5.38. Типичный пример измерения диаметра модового пятна в зависимости от длины волны, выполненный по методу поперечного сдвига: 1 – диаметр модового пятна; 2 – длина волны

Метод определения диаметра модового пятна

Применяются два стандартных метода измерения диаметра модового пятна одномодовых оптических волокон.

Первый из них, метод поперечного сдвига, используется для измерения оптической мощности, передаваемой от одного отрезка волокна через место соединения с изменяемым сдвигом в другой отрезок волокна. Эта мощность является функцией относительного поперечного сдвига при определении диаметра модового пятна.

Второй, метод проходящих полей, используется для измерения параметров ближнего и дальнего полей одномодовых оптических волокон. Он позволяет определить диаметр модового пятна, некруглость, неконцентричность и диаметр светоотражающей оболочки.

Принципиальная схема расположения испытательного оборудования в методе поперечного сдвига приведена на рис. 5.39.

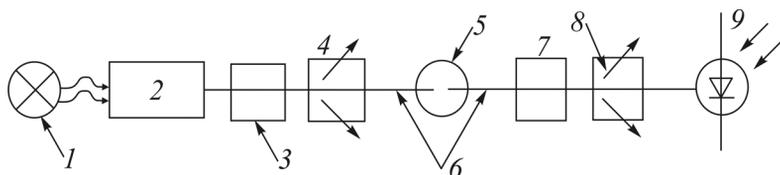


Рис. 5.39. Схема расположения оборудования: 1 – источник света; 2 – система возбуждения; 3 – фильтр мод; 4 – фильтр оболочечных мод; 5 – соединитель; 6 – испытуемое одномодовое волокно; 7 – фильтр мод; 8 – фильтр оболочечных мод; 9 – детектор

Используют источник света с шириной спектра излучения не более 10 нм (полная ширина на уровне половины интенсивности излучения). Источник должен обеспечивать постоянство интенсивности излучения и неизменность длины волны в течение всего измерения.

Для улучшения отношения сигнал/шум на приемнике обычно модулируют источник света. В этом случае оптический детектор подсоединяют к системе обработки сигнала, синхронизированной с частотой модуляции источника. Детекторная система должна быть достаточно линейной.

Должно обеспечиваться возбуждение основной моды. Условия возбуждения могут быть следующими:

- а) соединение с волокном;
- б) возбуждение с помощью соответствующей оптической системы.

Необходимо, чтобы моды более высокого порядка не распространялись на длине опорного отрезка волокна. Может возникнуть необходимость изогнуть волокно, для того чтобы удалить моды более высокого порядка.

Оборудование включает фильтры оболочечных мод для предотвращения распространения оболочечных мод, соединитель, конструкция которого должна позволять проводить юстировку относительного смещения осей волокон, оптический детектор для регистрации всего излучения на выходе, он должен иметь линейные характеристики.

Общая длина испытываемого образца должна быть около 2 м. Этот отрезок волокна разрезают на две равные части. Торцы волокон, устанавливаемых в соединитель, должны быть достаточно чистыми, ровными и перпендикулярными к оси волокна. Неперпендикулярность торцов к оси волокна для обоих волокон не должна быть более 1° .

Оси сращиваемых волокон должны быть параллельными. Зазор между торцами волокон должен составлять менее 5 мкм. Пространство между торцами волокон заполняют иммерсионной жидкостью.

При проведении испытаний волокно устанавливают в измерительное оборудование. Концы волокон устанавливают в плоскости, перпендикулярной к осям волокон, таким образом, чтобы мощность, передаваемая в месте соединения, была максимальной. Затем одно из волокон перемещают в поперечном направлении и измеряют мощность в зависимости от расстояния смещения.

Диаметром модового пятна является расстояние между двумя точками, в которых измеренная мощность составляет $1/e$ максимальной мощности.

Монтажная схема оборудования, реализующего метод проходящих полей, приведена на рис. 5.40.

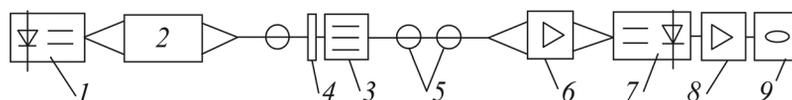


Рис. 5.40. Схема расположения оборудования: 1 – источник; 2 – оптика для возбуждения волокна; 3 – фильтр оболочечных мод; 4 – фильтр мод; 5 – волокно; 6 – увеличительная оптика; 7 – детектор; 8 – усилитель; 9 – регистратор данных

При измерении ближнего поля в плоскости детектора отображается дальний конец волокна в увеличенном виде. Увеличительные приборы, используемые при этом, снимают после завершения измерения дальнего поля.

Источник света должен обеспечивать стабильность интенсивности излучения и неизменность длины волны в процессе измерения. При необходимости для подсветки светоотражающей оболочки можно использовать второй источник света. Спектральные характеристики второго источника света не должны вызывать «размытость» изображения.

Следует использовать такие условия возбуждения, которые соответствуют измеряемому параметру.

Фильтр мод при измерении некоторых параметров обеспечивает работу системы в одномодовом режиме. В этом случае для удаления моды LP_{11} волокно сгибают. Фильтр оболочечных мод используется для измерения характеристик модового пятна.

В качестве образца используют небольшой отрезок (от нескольких сантиметров до нескольких метров) волокна. С участка волокна, вводимого в фильтр оболочечных мод, удаляют первичное покрытие. Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными к оси волокна.

Увеличительная оптика должна иметь оптическую систему (например, объектив), увеличивающую ближнее поле, фокусируя его на плоскость сканирующего детектора. Числовая апертура, а следовательно, и разрешающая способность оптики должны быть совместимы с требуемой точностью измерений и не должны быть ниже 0,3. Степень увеличения должна быть совместима с пространственным разрешением.

Используют детектор, регистрирующий интенсивность в каждой точке поля. Допускается использование следующих приборов:

- а) сканирующий фотодетектор с точечной апертурой;
- б) сканирующее зеркало с точечной апертурой и фотодетектором;
- в) сканирующий видикон, устройства с зарядовой связью или другие устройства, позволяющие определять форму или интенсивность сигнала;
- г) фиксированный детектор с переменной апертурой;
- д) фиксированный детектор, в котором поле сканируется при вращении волокна.

Детектор должен иметь линейные характеристики в требуемом диапазоне интенсивности.

Для увеличения уровня сигнала используют усилитель. Ширину полосы усилителя выбирают в соответствии с используемым типом сканирования. При сканировании дальнего конца волокна с помощью механической или оптической системы следует модулировать оптический источник. Для этого усилитель синхронизируют с частотой модуляции источника.

Распределение интенсивности регистрируют, обрабатывают и отображают в удобной форме в соответствии с методом сканирования и требованиями документации.

Подготовка к измерениям включает калибрование оборудования с определением степени увеличения увеличительного прибора (при его использовании) предварительным сканированием отрезка волокна с из-

вестными размерами. Степень увеличения определяют с достаточной точностью и регистрируют.

При измерениях возбуждаемый конец волокна совмещают с пучком света; дальний конец волокна совмещают с оптической осью увеличительного прибора (при его использовании).

Для измерения ближнего поля сфокусированное изображение на дальнем конце волокна сканируется детектором в соответствии с требованиями документации. Фокусировку выполняют с максимальной точностью для уменьшения погрешностей, возникающих при сканировании «размытого» изображения.

Допускается использовать следующие методы:

а) ближнее поле сердцевины или оболочки увеличивают с помощью оптического прибора и фокусируют на плоскость детектора, затем определяют требуемые геометрические параметры;

б) измеряют поле сердцевины на дальнем конце волокна, после чего определяют геометрические параметры путем использования соответствующих математических преобразований в применении к ближнему полю.

В результате измерений получают геометрические параметры: диаметр модового пятна и светоотражающей оболочки, некруглость, неконцентричность и т.д.

Метод изменения коэффициента передачи

Испытание проводят для контроля и измерения изменений оптической передачи в оптических волокнах и кабелях, происходящих при проведении механических или климатических испытаний.

Испытываемый образец подготавливают в соответствии с методикой проведения механических, климатических и других испытаний. Минимальная длина волокна должна быть такой, чтобы изменения затухания регистрировались испытательным оборудованием (т.е. находились в пределах его чувствительности).

Испытательная установка должна обеспечивать мониторинг передачи сигналов с высокой разрешающей способностью и хорошей стабильностью при изменении температуры и в течение времени, установленных в технических условиях на изделие.

На рис. 5.41 приведена типовая испытательная установка, используемая для проведения механических или климатических испытаний в лабораторных или заводских условиях. Испытание позволяет определить изменение оптической передачи путем сравнения с показателями, полученными на контрольном образце. Изменение оптической передачи

корректируется для всех изменений, которые могут произойти в оптическом источнике. Места сращивания должны иметь стабильные характеристики.

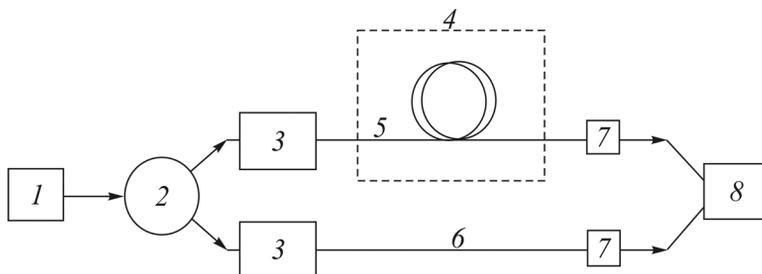


Рис. 5.41. Схема установки для проведения испытаний с использованием опорного образца: 1 – оптический источник; 2 – оптический делитель; 3 – система возбуждения; 4 – среда, в которой проводятся испытания; 5 – испытываемый образец; 6 – опорный образец; 7 – детекторы; 8 – приемное и записывающее устройство

На рис. 5.42 изображена типовая испытательная установка, используемая в полевых, лабораторных или заводских условиях, рассчитанная на проведение продолжительных испытаний и позволяющая стабилизировать оптический источник посредством обратной связи. Если стабильность оптического источника соответствует требуемой точности измерений, можно использовать метод вносимых потерь.

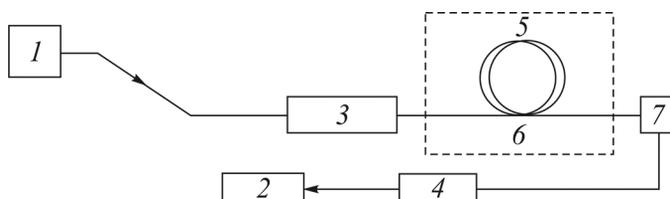


Рис. 5.42. Схема установки для проведения испытаний с использованием стабилизированного источника: 1 – стабилизированный оптический источник; 2 – записывающее устройство; 3 – система возбуждения; 4 – усилитель; 5 – среда, в которой проводятся испытания; 6 – испытываемый образец; 7 – детектор

Используют источник, например лазер или светоизлучающий диод, работающий на длине волны, совместимой с длиной волны испытываемого оптического волокна. Оптический источник обычно модулируют; могут быть использованы оптические фильтры для селекции длины волны.

Оптический делитель имеет коэффициент деления, который в процессе испытания остается неизменным. Коэффициент деления и стабильность температуры должны соответствовать указанным в документации. Могут использоваться устройства промышленного выпуска или специально изготовленные.

Оптический детектор должен иметь достаточную площадь для поглощения всей излучаемой мощности выходного конуса и быть достаточно линейным в диапазоне используемых оптических мощностей. Он должен иметь также достаточно равномерную чувствительность в активной зоне в диапазоне угла падения на длине волны измерений, чтобы обеспечить возможность изменения положения или угла выходного конуса относительно детектора. Равномерность чувствительности должна обеспечиваться в пределах, определяемых механической конструкцией испытательного оборудования, чтобы не оказывать заметного влияния на результаты испытаний.

Если используют не один детектор, а несколько, как показано на рис. 5.41, то используют детекторы одного изготовителя и одной модели, имеющие идентичную линейность.

В зависимости от испытываемого параметра используют полное или ограниченное возбуждение. Фильтраторы оболочечных мод могут использоваться на концах испытываемого образца, со стороны источника и детектора, а также эталонного образца, если он используется.

При использовании опорного образца он должен быть идентичным испытываемому образцу оптического волокна или кабеля и вводиться между оптическим делителем и детектором, как показано на рис. 5.41. Волокно может быть небольшой длины. Опорный образец должен находиться в неизменном состоянии в процессе всего испытания.

До начала проведения испытания необходимо измерить исходную оптическую мощность P_{0t} испытываемого образца, а при измерении в соответствии с рис. 5.41 – исходную оптическую выходную мощность P_{0r} опорного образца.

При проведении испытаний в соответствии с методами механических, климатических и других испытаний измеряют последующие оптические выходные мощности P_{nt} ($n = 1, 2, 3...$) испытываемого образца, а при измерении в соответствии с рис. 5.41 – последующие мощности P_{nr} опорного образца.

При этом могут измеряться не сами абсолютные значения мощности, а значения, пропорциональные абсолютной мощности. Коэффициент пропорциональности испытываемого и опорного образцов может быть различным. Коэффициенты пропорциональности остаются неизменными на протяжении всего испытания.

Изменение ΔD_n (в децибелах) оптической передачи рассчитывается следующим образом:

$$\text{для рис. 5.41: } \Delta D_n = 10 \log_{10} \frac{P_{nt} \cdot P_{or}}{P_{oi} \cdot P_{nr}};$$

$$\text{для рис. 5.42: } \Delta D_n = 10 \log_{10} \frac{P_{nt}}{P_{oi}}.$$

В результате испытаний изменения оптического коэффициента пропускания D_n , $n = 1, 2, \dots$, обычно представляются в виде графика зависимости от испытательных параметров.

Метод контроля обратного рассеяния

Испытание по методу контроля обратного рассеяния используют для контроля и измерения изменений коэффициента оптического пропускания оптических волокон и кабеля, которые возникают при механических и климатических испытаниях. Метод обеспечивает контроль изменения характеристик оптической неоднородности, физических дефектов и изменения крутизны характеристик затухания.

Метод можно использовать в том случае, если изменения коэффициента пропускания превышают погрешность воспроизводимости оборудования для определения обратного рассеяния.

Испытываемый образец подготавливают в соответствии с методикой проведения механических, климатических или других испытаний. Минимальная длина волокна должна быть такой, чтобы нелинейности в начале и в конце волокна не оказывали существенного влияния на результаты.

Устройство для проведения испытания должно соответствовать применяемому в методе обратного рассеяния. Испытываемое волокно устанавливают на одном уровне с устройством связи. Мощность обратного рассеяния анализируется сигнальным процессором и регистрируется на логарифмической шкале. На кривой выбирают две точки A и B , соответствующие началу и концу испытываемого волокна или кабеля. При необходимости измерения выполняют с обоих концов. Определяют следующее значение затухания D_{A-B} , дБ:

$$D_{A-B} = 1/2(P_A - P_B), \quad (5.20)$$

где P_A и P_B – соответствующие уровни мощности, представленные на логарифмической шкале. Вид кривых для сравнения записывают до, после и с интервалами в процессе проведения испытания.

Для плавных кривых обратного рассеяния изменение затухания ΔD может быть определено через различные интервалы кривой потерь как разность:

$$\Delta D_{A-B} = D_{A-B}(t) - D_{A-B}(t + \Delta t), \quad (5.21)$$

где Δt – временной интервал. В других случаях должна проводиться специальная обработка результатов.

5.7. Методы определения характеристик при испытаниях на воздействие внешних факторов

В настоящем разделе приведены методы испытаний оптических волокон в заданных условиях окружающей среды. Методы используют для проверки оптических волокон, предназначенных для поставки, на стойкость к температурным циклам и к ядерному излучению.

Метод температурных циклов

Данный метод применяют для оптических волокон, которые испытывают при воздействии температурных циклов с целью определения стабильности затухания волокна при воздействии колебаний температуры, имеющих место при хранении, транспортировании и эксплуатации. Условия испытаний при измерении зависимости от температуры должны имитировать самые жесткие реальные условия.

В качестве образца может использоваться строительная длина или часть строительной длины, как указано в технических условиях, при этом длина должна быть достаточной для получения требуемой точности. Например, рекомендуется, чтобы минимальная длина волокна, на котором проводятся испытания, была не менее 1000 м для волокна категории *A1* и 2000 м для волокна категории *B*.

Чтобы получить воспроизводимые результаты, образец волокна должен быть помещен в климатическую камеру в неплотно намотанной бухте или на катушке.

Результаты испытаний зависят от радиуса изгиба волокна. В связи с этим образец должен в максимальной степени соответствовать условиям нормальной эксплуатации. При испытании на катушке волокно должно быть намотано так, чтобы все изменения его характеристик (затухание, длина и т.д.) были аналогичны тем, которые имеют место при нормальной эксплуатации.

Возможные проблемы возникают вследствие различия коэффициентов линейного расширения испытываемого образца и несущего элемента (катушка, корзина, плита и т.д.), которые во время температурных циклов могут оказать значительное влияние на результат испытания, если не будут полностью выполнены условия «нулевого воздействия».

Диаметр намотки должен быть достаточно большим, чтобы скомпенсировать различные процессы расширения и сжатия. Диаметр намотки должен быть существенно больше принятого для поставки волокна. Должна быть устранена возможность ограничения (или сжатия) волокна при подготовке образца. В частности, следует принять специальные меры предосторожности по предотвращению возникновения любого остаточного напряжения в волокне при испытании; например, не рекомендуется плотная намотка на катушке, так как это может ограничить сжатие волокна при низкой температуре. С другой стороны, многослойная плотная намотка может ограничить расширение при высокой температуре. Рекомендуется слабая намотка, а именно: бухты большого диаметра, катушка с амортизирующей подушкой с мягким подслоем или приспособление для ослабления напряжений и т.д.

Испытание обычно разрушающее, так как трудно повторно правильно намотать образец волокна после испытания.

Используют измерительный прибор, аналогичный тому, который применяется для определения изменения затухания. Климатическая камера должна иметь размеры, достаточные для размещения образца, и обеспечивать поддержание температуры в пределах $\pm 3\text{K}$ от установленной температуры испытания.

Перед проведением испытаний образец должен быть осмотрен визуально и определено эталонное значение затухания при исходной температуре.

Во время проведения испытаний образец при температуре окружающей среды помещают в климатическую камеру, которая также имеет температуру окружающей среды. Условия предварительного кондиционирования должны быть оговорены между изготовителем и потребителем. Затем температуру в камере снижают до установленной низкой температуры T_A с установленной скоростью охлаждения. При достижении стабильности температуры в камере образец выдерживают при низкой температуре в течение установленного времени t_1 . Затем температуру в камере повышают до установленной высокой температуры T_B с установленной скоростью нагрева. При достижении стабильности

температуры в камере образец выдерживают в условиях высокой температуры в течение установленного времени t_1 . Затем температуру в камере снижают до температуры окружающей среды с установленной скоростью охлаждения. Эта процедура составляет один цикл (рис. 5.43). Образец подвергают воздействию двух циклов, если иное не установлено в технических условиях.

В технических условиях должно быть указано: изменение затухания и контроль во время выдержки образца; период или периоды, после которых должен проводиться указанный контроль.

Перед извлечением из камеры испытываемый образец должен достигнуть термической стабильности при температуре окружающей среды. Значения температуры T_A и T_B , а также времени t_1 устанавливаются в технических условиях.

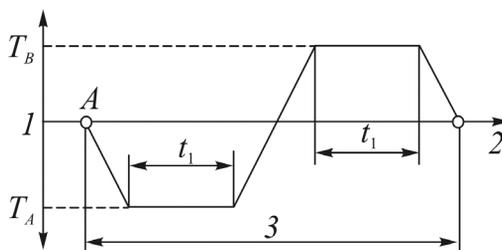


Рис. 5.43. Температурный цикл внутри камеры: 1 – температура внутри камеры; 2 – время; 3 – 1 цикл

Скорость охлаждения (или нагрева) должна быть установлена в технических условиях. Следует принять меры, чтобы температура волокна не отличалась значительно от температуры, установленной для климатической камеры в конце фаз охлаждения (или нагрева).

Если температура окружающей среды после выемки из камеры не соответствует стандартным атмосферным условиям, установленным для испытания, образец должен быть выдержан для достижения температурной стабильности в этих условиях. В технических условиях могут быть установлены специальные требования к периоду восстановления для определенного типа образца.

После испытаний образцы должны быть подвергнуты визуальному осмотру и проверке оптических и механических параметров в соответствии с требованиями технических условий. Вместе с результатами должны быть представлены следующие данные:

- детали условий намотки образца в бухту или на катушке;
- параметры намотки образца: бухта, катушка, прочее (при применении барабана с амортизирующей подушкой – тип используемой подушки);
- простая или многослойная намотка;

- витки параллельны или с перехлестом;
- натяжение намотки и приспособление для ослабления напряжений, если оно применялось;
- тип и материалы несущего элемента;
- положение образца (горизонтальное/вертикальное);
- длина испытываемого волокна;
- подготовка концов;
- характеристики измерительного оборудования, включая тип измерительной аппаратуры и условия ввода;
- условия испытания (число циклов, диаграмма температурных циклов);
- температура и время, которые должны быть зафиксированы;
- контролировалась влажность или нет. При контроле влажности должны быть зафиксированы значения влажности для каждого экстремального значения температуры;
- изменение затухания на установленной длине волны в зависимости от температурных циклов с указанием точности измерения.

Метод ядерного излучения

Метод испытания оптических волокон и оптических кабелей на стойкость к воздействию гамма-излучения включает измерение постоянства отклика в оптических волокнах и оптических кабелях, подвергшихся воздействию гамма-излучения. Он может применяться для определения уровня затухания при воздействии радиации на одномодовых или многомодовых оптических волокнах, скрученных или нет, подвергшихся воздействию гамма-излучения. Это испытание не является испытанием материалов неоптических элементов оптического кабеля. Если требуется исследовать разрушение материалов под действием облучения, следует применять другие методы испытания.

Затухание скрученных или нескрученных оптических волокон обычно увеличивается при воздействии гамма-излучения. Главным образом это обусловлено улавливанием в ловушках и дырках в дефектных местах структуры стекла (то есть образованием центров окраски). Этот метод испытания предусматривает два режима: режим небольшой дозы, соответствующий воздействию излучения окружающей среды, и режим высокой дозы, соответствующий воздействию ядерного взрыва. Испытание на воздействие излучения окружающей среды выполняют путем измерения затухания в соответствии с методом обрыва. Воздействие ядерного взрыва оценивают путем контроля мощности до, во время

и после воздействия гамма-излучения на испытываемый образец. Уменьшение числа центров окраски под действием света (фотообесцвечивание) или тепла приводит к восстановлению (уменьшению прироста затухания, вызванного излучением). Восстановление может осуществляться в широком временном диапазоне от 10^{-2} до 10^4 с. Это осложняет определение затухания, обусловленного излучением, поскольку оно зависит от многочисленных переменных, таких как температура окружающей среды при испытании, форма образца, общая доза, мощность дозы, воздействующие на образец, и световой уровень, применяемый при измерении.

При проведении испытаний должны быть приняты строгие правила и соответствующие способы защиты в лаборатории. Следует привлекать квалифицированный, тщательно отобранный для проведения испытания персонал. Имеется весьма высокая степень опасности для испытательного персонала, если испытание будет выполняться неправильно или не будут соблюдаться требуемые условия.

Испытательное оборудование представлено на рис. 5.44 и 5.45.

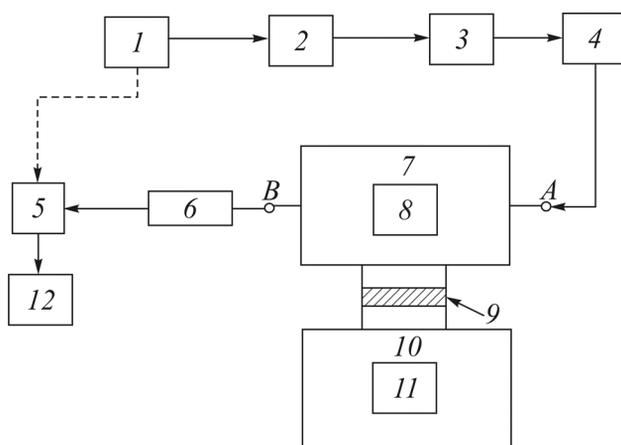


Рис. 5.44. Испытательное оборудование для повышенных доз γ -излучения: 1 – модулированный источник света; 2 – оптические фильтры (монокроматор); 3 – имитатор ввода на входе; 4 – устройство выделения мод оболочки; 5 – синхронный детектор; 6 – оптический детектор; 7 – камера с регулируемой температурой; 8 – испытываемый образец; 9 – затвор; 10 – экранированная камера; 11 – источник гамма-излучения; 12 – регистрирующее устройство

При испытании на воздействие излучения окружающей среды для создания гамма-излучения с мощностью дозы менее или равной 20 рад/ч применяют кобальт 60 или эквивалентный ионизирующий источник (см. рис. 5.44).

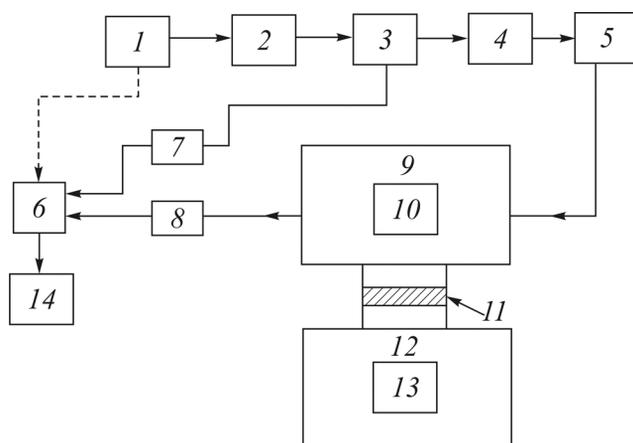


Рис. 5.45. Испытательное оборудование для малых доз γ -излучения: 1 – модулированный источник света; 2 – оптические фильтры/монохроматор; 3 – оптический светоделитель; 4 – имитатор ввода на входе; 5 – устройство выделения мод оболочки; 6 – синхронный детектор; 7 – опорный детектор; 8 – оптический детектор; 9 – камера с регулируемой температурой; 10 – испытываемый образец; 11 – регистрирующее устройство; 12 – затвор; 13 – экранированная камера; 14 – источник гамма-излучения

При испытании на воздействие излучения ядерного взрыва для создания гамма-излучения с мощностью дозы от 5 до 250 рад/с применяют кобальт 60 или эквивалентный ионизирующий источник (см. рис. 5.45).

Источник света, такой как галогенная лампа накаливания, комплекс лазеров или светоизлучающих диодов, используют для создания энергии излучения с длиной волны 850, 1300 и 1550 нм или с другими длинами волны, указанными в технических условиях. Источник света должен иметь устойчивую силу света в течение времени проведения измерения. Вводимая в испытываемый образец мощность источника должна быть менее или равна 30 дБм (1,0 мкВт) или соответствовать указанному в технических условиях, потому что если использовать источник мощностью более 1,0 мкВт, то может произойти фотообесцвечивание. Источник света должен быть модулированным импульсным сигналом с рабочим циклом 50 %.

Если нет других указаний, длины волн (850 ± 20) , (1300 ± 20) и (1550 ± 20) нм получают с помощью фильтрации источника света, используя комплекс оптических фильтров или монохроматор. Ширина оптической полосы 3 дБ фильтров должна быть менее или равной 25 нм.

При необходимости используют устройство выделения мод оболочки на входном и выходном концах испытываемого образца. Если материалы покрытия волокна разработаны с учетом выделения мод оболочки, то нет необходимости в применении устройства выделения мод оболочки.

Следует предусмотреть устойчивый держатель входного конца испытываемого волокна, такой как вакуумный зажимной патрон. Этот держатель должен быть установлен на монтажном устройстве таким образом, чтобы конец образца мог вставляться во входной раструб неоднократно.

Оптический светоделитель (см. рис. 5.45) отводит небольшую часть входного света к эталонному детектору. Эта эталонная ветвь используется для наблюдения за флуктуациями системы во время проведения испытания.

Для градиентных многомодовых волокон при измерении должен использоваться имитатор мод в равновесии для ослабления режима распространения мод высшего порядка и для установления распределения мод в равновесии у входного конца волокна. В методе обрыва приведены указания по способу установления соответствующих условий ввода для градиентных многомодовых волокон.

При работе с одномодовыми волокнами можно использовать оптическую линзовую систему или иницирующее волокно для возбуждения испытываемого волокна. Вводимая в испытываемый образец мощность должна быть стабильной на протяжении всего испытания. Если используется оптическая линзовая система, можно применить монтажное устройство для волокна менее чувствительного в пространстве и по углу, осуществляя полный ввод в конец волокна. При использовании иницирующего волокна может быть необходимым применение материала для согласования показателей преломления, чтобы исключить явление взаимовлияния. Фильтр мод высшего порядка используют для устранения мод высшего порядка, распространяющихся в диапазоне длин волн более или равных длине волны отсечки испытываемого волокна. Этому требованию удовлетворяют условия испытания, установленные в методе передаваемой мощности.

Для волокон с полуступенчатым и ступенчатым показателями преломления условия ввода должны соответствовать установленным в технических условиях. Применяют оптический детектор, который имеет линейные и устойчивые характеристики в диапазоне используемой

мощности излучения. Типовая система может включать фотодиод с фотovoltaическим режимом, с усилением с помощью входного предусилителя тока, с синхронным детектированием в оконечном усилителе.

Используют оптический измеритель мощности для определения мощности оптического источника, вводимой в испытываемый образец, которая менее или равна 1,0 мкВт или соответствует требованиям, указанным в технических условиях.

Для измерения общей дозы излучения, полученной образцом волокна, используют термолюминесцентные детекторы на кристаллах LiF или CaF₂. Если не указано иное, в камере с регулируемой температурой должна поддерживаться установленная техническими условиями температура с отклонением ± 2 °С.

Катушка для испытаний не должна действовать как экран или как поглотитель излучений, используемых при испытании.

Испытываемый образец должен быть представительным для волокна, указанного в технических условиях.

Если иное не установлено в технических условиях, то длина испытываемого образца для испытания на воздействие излучения окружающей среды должна быть (3000 ± 30) м. (Если условия реактора требуют меньшей длины, длина испытываемого образца может быть (1100 ± 20) м.) Минимальная длина концов испытываемого образца (обычно менее или равная 5 м) должна быть выведена наружу испытательной камеры и использоваться для соединения оптического источника с детектором. Облученная длина испытываемого образца должна быть зафиксирована.

Длина образца для испытания на воздействие излучения ядерного взрыва, если иное не установлено в технических условиях, должна быть $(250 \pm 2,5)$ м. Если условия испытания требуют высоких общей дозы и мощности дозы, то может использоваться меньшая длина испытываемого образца. Минимальная длина концов испытываемого образца (обычно менее или равная 5 м) должна быть выведена наружу испытательной камеры и использоваться для соединения оптического источника с детектором. Облученная длина испытываемого образца должна быть зафиксирована.

Испытываемый образец наматывают на катушку с диаметром шейки, установленным в технических условиях. Следует предусмотреть возможность размотки длины испытываемого образца, на которой проводятся измерения, с каждого конца катушки для закрепления его в измерительной оптической аппаратуре. Можно применять неплотную намотку волокна в бухту определенного диаметра.

Испытываемый образец должен быть защищен от внешнего света, чтобы предотвратить внешнее фотообесцвечивание.

Калибровку источника излучения с целью обеспечения равномерности доз и уровня производят до помещения образца в испытательную камеру. Четыре термолюминесцентных дозиметра (DTL) размещают в зоне облучения, а центр DTL размещается в месте, где будет располагаться ось испытательной катушки. (Четыре DTL используют для получения среднего значения.) Для калибровки системы следует применять дозу более или равную реальной испытательной дозе. Для обеспечения максимальной точности измерения все DTL не должны использоваться более одного раза.

Порядок измерения затухания испытываемого образца на воздействие излучения окружающей среды до и после облучения источником гамма-излучения следующий. Катушку с испытываемым волокном или кабелем помещают в установку в соответствии с рис. 5.44 и 5.45. Входной конец волокна помещают в держатель и центрируют. Выходной конец размещают так, чтобы весь свет, выходящий из волокна, попадал на активную поверхность детектора. Испытываемый образец предварительно выдерживают в термостате при температуре (25 ± 5) °C в течение 1 ч до испытания или при температуре предварительной выдержки в соответствии с указанным в технических условиях.

Затухание испытываемого образца измеряют на указанных испытательных длинах волн в соответствии с методом обрыва. Затухание волокна с градиентным показателем преломления до облучения источником гамма-излучения должно быть зафиксировано.

Мощность на входном конце испытываемого образца (точка *A* на рис. 5.44) измеряют с помощью калиброванного счетчика. Уровень источника должен быть при необходимости отрегулирован так, чтобы мощность в точке *A* была менее 1,0 мкВт или в соответствии с указанной в технических условиях.

Источник излучения отключают, входной конец испытываемого образца устанавливают так, чтобы получить максимальную оптическую мощность на детекторе. После регулирования условия ввода на входе не должны изменяться во время процесса гамма-облучения.

До облучения выходную мощность измеряют при установленной температуре испытания для всех длин волн, на которых проводится испытание. Графический регистратор или соответствующее устройство для постоянного измерения соединяют с системой детектирования для

постоянного измерения мощности. Измерительное оборудование должно быть таким, чтобы детектированный сигнал не превышал допустимого уровня для данного оборудования.

Результаты воздействия излучения окружающей среды при облучении гамма-излучением определяют при воздействии на испытываемый образец мощности дозы менее или равной 20 рад/ч. Испытываемый образец подвергают воздействию общей дозы не менее 100 рад. Выходная мощность испытываемого образца должна фиксироваться во время проведения цикла гамма-излучения.

После окончания процесса облучения и не более чем через 2 ч измеряют затухания испытываемого образца. Затухание испытываемого образца после облучения источником гамма-излучения фиксируют.

Этапы испытаний повторяют при установленных для испытания температурах и длинах волн. Для каждой требуемой температуры используют новый необлученный образец.

Ниже приведен порядок измерения мощности, распространяющейся в испытываемом образце до, во время и после облучения источником гамма-излучения.

Концы испытываемого образца небольшой длины (1–2 м) готовят. Входной конец небольшой испытываемой длины помещают в держатель и ориентируют в испытательной установке (см. 5.44, 5.45) для получения максимальной оптической мощности, измеряемой с калиброванным счетчиком. Уровень источника при необходимости регулируют с помощью нейтральных фильтров плотности, чтобы получить на выходе короткой длины испытываемого образца оптический уровень мощности менее 1,0 мкВт или в соответствии со значением, указанным в технических условиях.

Испытываемую катушку помещают в испытательную установку. Входной конец испытываемого образца помещают в держатель и выравнивают. Выходной конец располагают так, чтобы весь свет, выходящий из испытываемого образца, попадал на активную поверхность детектора. Испытываемый образец предварительно выдерживают в термостате при температуре (25 ± 5) °С в течение 1 ч до испытания или при температуре предварительной выдержки в соответствии с указанным в технических условиях. При отключенном источнике излучения входной конец испытываемого образца помещают так, чтобы получить максимальную оптическую мощность на детекторе. После регулирования условия ввода на входе не должны изменяться во время процесса гамма-

облучения. До облучения входную мощность измеряют при установленной температуре испытания для всех длин волн, на которых проводится испытание. В это же время измеряют также мощность эталонного детектора. Графический регистратор или соответствующее устройство для постоянного измерения соединяют с системой детектирования для постоянного измерения мощности.

Результаты воздействия гамма-излучения определяют при воздействии на испытываемый образец, по крайней мере, одного из сочетаний мощности дозы и общей дозы, указанных в табл. 5.3, или в соответствии с указанным в технических условиях.

Таблица 5.4

Сочетания общая доза/мощность дозы

Общая доза рад (Sievert)	Мощность дозы, рад/с
3000	5
10000	50
100000	200
1000000	200

Значения мощности дозы являются приблизительными, поскольку характеристики источников излучения меняются. Допускается изменение мощности дозы на $\pm 50\%$ для различных источников. Время, необходимое для ввода в действие или отключения источника излучения, должно быть менее или равным 10% общего времени облучения.

Выходная мощность испытываемого образца должна быть зафиксирована во время цикла гамма-облучения. Мощность должна быть также зафиксирована в течение не более 15 мин после окончания процесса облучения или в течение другого времени, указанного в технических условиях. Уровень мощности эталонного детектора должен быть также зафиксирован в течение восстановительного периода после окончания процесса облучения.

Этапы испытаний повторяют при установленных для испытания температурах и длинах волн. Для каждой требуемой температуры используют новый необлученный образец.

Прирост оптического затухания ΔA (дБ) (испытание на воздействие излучения окружающей среды) вычисляют по формуле

$$\Delta A = A_2 - A_1, \quad (5.22)$$

где A_1 – затухание испытываемого образца до облучения гамма-излучением; A_2 – затухание испытываемого образца после облучения гамма-излучением.

Прирост коэффициента оптической передачи A (дБ) вычисляют для каждой длины волны по следующим формулам (испытание на воздействие излучения ядерного взрыва):

$$A_0 = -10 \log(P_0/P_B), \quad A_{15} = -10 \log(P_{15}/P_B), \quad (5.23)$$

где P_0 – выходная мощность испытываемого образца в течение 1 с после прекращения облучения, если не указано иное; P_{15} – выходная мощность испытываемого образца через 15 мин после прекращения облучения, если не указано иное; P_B – выходная мощность испытываемого образца до начала облучения; A_0 – прирост коэффициента оптической передачи испытываемого образца сразу после облучения; A_{15} – прирост коэффициента оптической передачи испытываемого образца через 15 мин после облучения.

Если установлена значительная нестабильность системы, следует использовать результаты эталонных измерений для нормализации результатов испытания, дБ:

$$A_{REF} = -10 \log(P_{E'}/P_{B'}), \quad (5.24)$$

где $P_{E'}$ – мощность, измеренная эталонным детектором в конце измерения; $P_{B'}$ – мощность, измеренная эталонным детектором до начала облучения.

Результаты испытания, нормализованные с учетом нестабильности системы, вычисляют по формулам

$$A_{0NOR} = A_0 - A_{REF}; \quad A_{15NOR} = A_{15} - A_{REF}. \quad (5.25)$$

Эти и другие данные фиксируются в документации испытаний.

5.8. Измерение спектральных характеристик

Измерение спектральных характеристик является одним из основных видов измерений в волоконно-оптических системах передачи и включает анализ оптического спектра (анализатор), измерение длины волны, ширины линии и фазового шума без модуляции лазера, а также частотной модуляции оптического сигнала. Учитывая важность и специфические особенности данных измерений, рассмотрим методы анализа оптического спектра, основанные на оптической фильтрации посред-

ством дифракционной решетки и интерферометров Фабри–Перо. При этом методы оптической фильтрации, как правило, используются для узкополосного, с высоким разрешением оптического спектрального анализа.

Анализ оптического спектра представляет собой измерение оптической мощности в зависимости от длины волны и в связи с развивающимися технологиями уплотнения становится одним из важнейших видов измерений в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи. Необходимость анализа оптического спектра вызвана также возникающей в волокне и определяемой шириной спектра источника излучения хроматической дисперсией, которая проявляется в увеличении длительности передаваемого импульса по мере его распространения по оптическому волокну, что ограничивает ширину полосы пропускания высокоскоростных линий связи.

Обобщенная схема анализатора оптического спектра включает фотоприемник, аналого-цифровой преобразователь и систему управления и обработки данных (компьютер). В общем случае принцип действия анализаторов оптического спектра заключается в пространственном разделении входного излучения на спектральные составляющие, преобразуемые затем посредством фотодиода в электрический ток, пропорциональный мощности соответствующей длины волны. Последний с помощью управляемого током усилителя напряжения преобразуется в аналоговое напряжение, а затем после аналого-цифрового преобразователя – в цифровую форму. Изображаемая ширина, например, каждой моды лазера является функцией спектрального разрешения оптического фильтра, настраиваемого на соответствующую длину волны.

На рис. 5.46 показана упрощенная схема анализатора оптического спектра на основе *интерферометра Фабри–Перо* (FPI), который выполняет функции оптического фильтра и состоит из двух низкоотражающих параллельных зеркал, создающих объемный резонатор, фильтрующий входное оптическое излучение. Разрешающая способность анализаторов, основанных на интерферометрах данного типа, в основном зависит от коэффициента отражения зеркал и расстояния между ними, поэтому настройка длины волны осуществляется либо регулировкой расстояния между зеркалами, либо наклоном самого интерферометра относительно входного луча.

Применение интерферометра Фабри–Перо в оптическом анализаторе спектра заманчиво в связи с простотой конструкции и имеющими место потенциальными возможностями, которые позволяют реализовать

очень высокое спектральное разрешение, обеспечивая, например, изменение спектра лазерных импульсов с линейной частотной модуляцией. Основным недостатком данных устройств является наличие так называемых свободных (мертвых) спектральных диапазонов, что определяется конструктивными особенностями анализатора: для достижения наивысшего разрешения зеркала необходимо располагать очень далеко друг от друга, а это приводит к сужению спектрального диапазона прибора. Данная проблема, как правило, решается введением второго фильтра, характеристики которого позволяют выполнять фильтрацию длин волн за пределами первого спектрального диапазона.

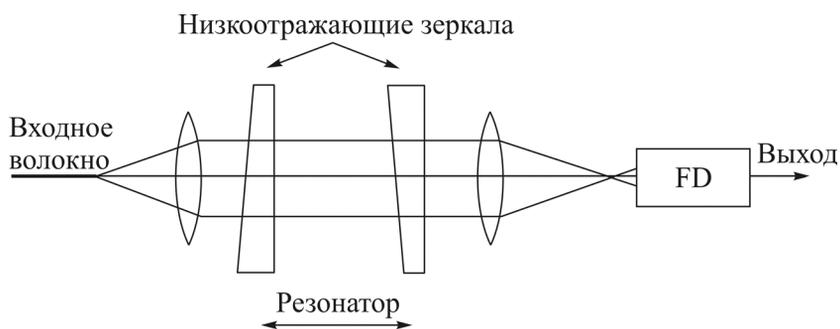


Рис. 5.46. Оптическая система анализатора спектра на основе интерферометра Фабри-Перо

Наиболее часто в волоконной оптике применяются анализаторы с дифракционными решетками в качестве перестраиваемого оптического фильтра. Совокупность элементов оптической системы (входное отверстие, дифракционная решетка, выходное отверстие) в этом случае служит для разделения входного оптического излучения на различные спектральные составляющие и носит название *монохроматора*, а монохроматор с фотодиодом, служащий для последующей фиксации спектра, называют *спектрометром*. Учитывая функциональную нагрузку монохроматора, его можно представить как настраиваемый оптический фильтр, представляющий собой оптическую систему анализатора.

В монохроматоре дифракционная решетка (зеркало с регулярно расположенными гофрированными линиями на поверхности) выводит дифрагированный свет под углом, определяемым длиной волны, что аналогично радуге, которую образует видимый свет при прохождении через призму. В инфракрасном излучении, используемом в оптических волокнах, применение призм неэффективно, так как дисперсия, или изменение показателя преломления стекла от длины волны, в диапазоне

длин волн 1...2 мкм очень мала. По этой причине в анализаторе применяются дифракционные решетки, которые обеспечивают лучшее разделение света по длинам волн или, что то же, лучшую разрешающую способность по длине волны.

Дифракционная решетка состоит из последовательно расположенных через равные промежутки параллельных щелей (в случае передающей решетки) или зеркал (в случае принимающей решетки), интервалы между которыми определяются рабочими длинами волн оптического излучения. Решетка разделяет различные длины волн, поэтому угол решетки зависит от длины волны, на которую настраивается анализатор, а апертуры входа и выхода, как и размер луча на дифракционной решетке, определяют ширину спектра оптического фильтра, выходной сигнал которого поступает на фотодиод и затем на электронную схему обработки результатов измерений.

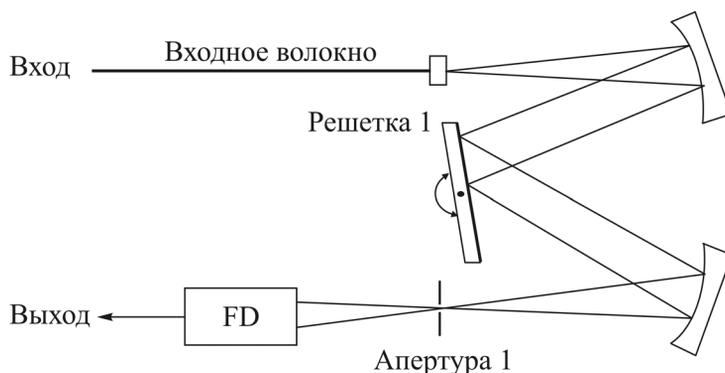


Рис. 5.47. Оптическая система анализатора спектра с однопроходным монохроматором

Однопроходной монохроматор (рис. 5.47) состоит из входного отверстия, фокусирующей системы, дифракционного элемента, служащего для разделения волн под определенным углом, коллимирующей системы и выходного отверстия. При этом входное отверстие, выходное отверстие и количество освещенных на дифракционной решетке линий являются ключевыми факторами, ограничивающими достижимую ширину полосы пропускания монохроматора. Следовательно, очень важно иметь высококачественную безабберационную оптическую систему перефокусирования поступающего света с минимальным выходным отверстием монохроматора, ибо конечная функция фильтра заключается в обеспечении наименьшей полосы пропускания. В настоящее время

в экспериментальных образцах предельно достижимая полоса фильтра составляет приблизительно 0,1 нм при 1550 нм. Для анализа спектра с большим разрешением разработаны иные технологии, в частности сдвоенные и двухпроходные монохроматоры различной конструкции.

5.9. Измерение дисперсии

Наличие дисперсии любого вида ухудшает амплитудно-фазовые соотношения сигналов световых волн, снижая тем самым объем передаваемой информации за счет увеличения длительности импульсов в цифровых системах и увеличения искажений сигналов в аналоговых системах. При разработке волоконно-оптических систем необходимо минимизировать три основных вида дисперсии:

1) межмодовую дисперсию, которая ограничивает скорость передачи данных в системах, использующих многомодовое волокно, и возникает вследствие разделения сигнала на многочисленные моды, распространяющиеся в оптоволокне по различным траекториям;

2) хроматическую дисперсию, которая зависит от физико-топологических параметров одномодового и многомодового волокна и возникает из-за отличия времени распространения мод с различной длиной волны;

3) поляризационную модовую дисперсию, которая становится ограничивающим фактором в одномодовых волокнах с уменьшенной хроматической дисперсией и вызвана разделением излучения на ортогонально поляризованные моды, которые распространяются по ОВ с различной скоростью.

Измерение межмодовой дисперсии

Одномодовое волокно поддерживает распространение одиночной световой волны, или моды, в то время как многомодовое волокно поддерживает большое количество мод, и эта его характеристика вызывает явление, называемое межмодовой дисперсией. Вследствие того, что все моды распространяются по различным траекториям, огибающие модулированного светового сигнала различных мод по мере распространения сигнала по волокну все больше и больше отличаются по фазе. Каждая мода передает информационный импульс, время распространения которого отличается от времени распространения импульса другой моды, что в результате вызывает изменение формы результирующего импульса на выходе оптоволокна, в частности увеличение длительности и уменьшение амплитуды переданного импульса.

При измерениях межмодовая дисперсия обычно определяется наименьшим значением частоты, при которой амплитудно-частотная характеристика спадает на 3 дБ и фактически осуществляется измерением полосы частот многомодового волокна по искажению передаваемого импульса и изменению модулированного сигнала.

В общем случае измерение межмодовой дисперсии сводится к измерению полосы частот многомодового волокна на различных длинах волн по искажению импульса (рис. 5.48).

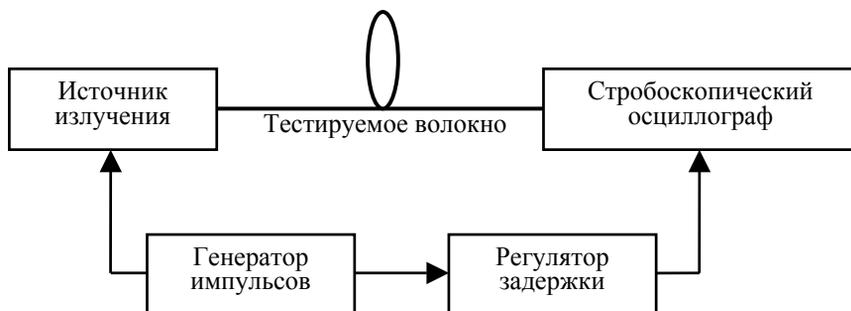


Рис. 5.48. Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна импульсным методом

В соответствии с данной схемой используется перестраиваемый источник оптического излучения, который подсоединяется к входу тестируемого волокна, подключенного выходом к входу оптического приемника, который соединен со стробоскопическим осциллографом и процессором сигналов, предназначенным для устранения помех, фазового дрожания и расчета параметров импульса. Для того чтобы на результаты измерений не оказывала существенного влияния хроматическая дисперсия, спектр источника излучения задается достаточно узким.

В процессе измерения в тестируемом волокне возбуждается импульс излучения заданной длительности, а выходной импульс преобразуется в цифровую форму, включая передний и задний фронт, начиная с 0,01 уровня амплитудного значения. Затем таким же образом измеряется входной импульс, здесь вместо тестируемого волокна используется эталонное волокно, которое представляет собой короткий, в несколько метров, отрезок либо тестируемого волокна, либо волокна, имеющего близкие оптические характеристики. Для того чтобы минимизировать разницу в задержке распространения излучения в тестируемом и эталонном оптических волокнах, осциллограф и процессор сигналов синхронизируются входным импульсом через регулируемый элемент задержки.

Измерение межмодовой дисперсии, присущей многомодовым волокнам, из-за их ограниченного применения в настоящее время не представляет существенного интереса.

Измерение хроматической дисперсии

Источник оптического излучения высокоскоростной системы передачи обычно представляет собой одноволновый лазерный диод с отличной от нуля шириной спектра, которая увеличивается при его импульсной модуляции. В результате сигналы различной длины волны распространяются с неодинаковой скоростью, что приводит к увеличению длительности импульса на выходе оптического волокна. Это явление носит название хроматической дисперсии. Хроматическая дисперсия имеет значение в одномодовых волокнах, однако в ряде случаев она является важным параметром и для многомодового волокна.

В одномодовом волокне хроматическая дисперсия возникает вследствие взаимодействия двух явлений – материальной и волноводной дисперсии. Материальная дисперсия возникает из-за нелинейной зависимости показателя преломления кварца от длины волны и соответствующей групповой скорости, в то время как причиной волноводной дисперсии является зависимость от длины волны отношения групповой скорости к диаметру сердцевины и отличие показателей преломления сердцевины и оболочки. Третья составляющая дисперсии, так называемая поляризационная модовая дисперсия второго порядка, или дисперсия дифференциальной групповой задержки, определяется поляризационными характеристиками волокна и оказывает влияние, сходное с влиянием хроматической дисперсии.

Объем переносимой волоконно-оптической системой информации является максимальным в том случае, если групповая задержка соизмерима с длиной волны. В одномодовом волокне с несмещенной дисперсией длина волны нулевой дисперсии составляет приблизительно 1300 нм, где два основных механизма, материальная и волноводная дисперсии естественным путем устраняют друг друга. Варьирование показателя преломления позволяет переместить волну нулевой дисперсии в любую точку диапазона 1300...1550 нм.

На рис. 5.49 представлена схема измерения хроматической дисперсии по методу сдвига фаз. В соответствии с данной схемой выходной сигнал настраиваемого оптического источника с узкой полосой частот модулируется по интенсивности и подводится к тестируемому волокну, с выхода которого модулированный оптический сигнал поступает на измеритель фазы полученного сигнала относительно модулирующего

электрического сигнала, например векторный вольтметр. При этом измерение фазы повторяется через определенные интервалы по всему требуемому диапазону длины волны с определением групповой задержки.

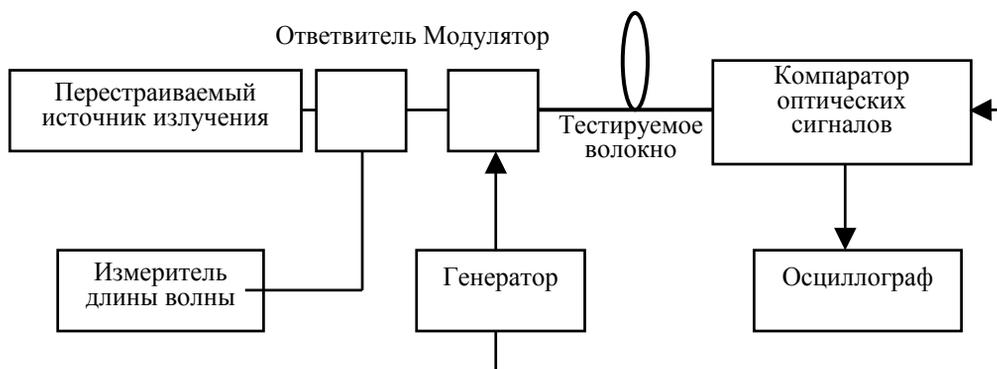


Рис. 5.49. Схема измерения хроматической дисперсии методом сдвига фаз

Поляризационная модовая дисперсия (ПМД) имеет большое значение для высокоскоростных коммуникационных сетей и должна измеряться не только сразу после изготовления, но и после разводки волокон, так как их деформирование может вызвать двойное лучепреломление и, следовательно, ПМД.

ПМД измеряют волновыми методами, которые позволяют извлечь информацию из изменения состояния поляризации на выходе тестируемого устройства по мере изменения длины входной световой волны. К волновым методам относится метод сканирования длины волны.

Хотя отклонение выходной поляризации в случае использования волокна с произвольно связанными модами является неустойчивым на любой длине волны, существует два основных состояния поляризации, при небольших отклонениях от которых выходная поляризация будет изменяться в достаточно малом интервале длины волны. На этом основано несколько альтернативных конфигураций метода сканирования длины волны, приведенных на рис. 5.50. Эти схемы отличаются типом источника излучения, а также используемыми средствами определения ширины спектра и настройки длины волны.

Согласно данному методу результаты измерений накапливаются во время сканирования или пошаговых изменений длины волны источника (или приемника, в зависимости от схемы измерения). Для коррекции зависимости мощности источника и потерь вставки устройства от дли-

ны волны, как правило, требуется проведение эталонного измерения, которое осуществляется с удаленным анализатором. В противном случае эталонное измерение может быть проведено при повороте анализатора на 90 градусов. Так как полученные результаты не являются непосредственно значением ПМД, они требуют последующей автоматизированной обработки – анализа результатов, который осуществляется подсчетом экстремальных значений или преобразованием Фурье.

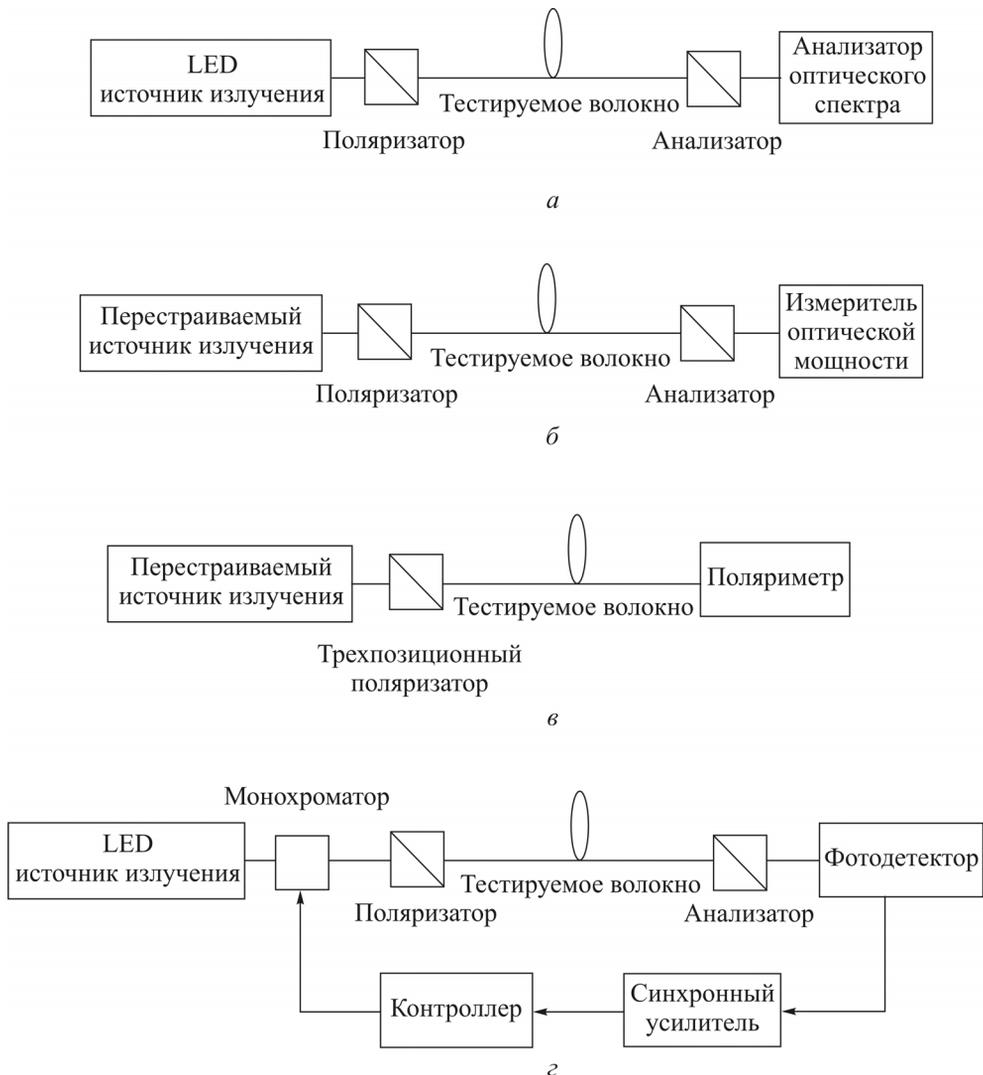


Рис. 5.50. Основные схемы измерения поляризационной модовой дисперсии (ПМД) волновым методом: *a* – схема измерения ПМД анализатором оптического спектра; *б* – схема измерения ПМД измерителем мощности; *в* – схема измерения ПМД поляриметром; *г* – схема измерения ПМД монохроматором

Диапазон длин волн, в котором производятся измерения ПМД методом сканирования длины волны, должен быть достаточно большим, чтобы выдавать статистически значимое количество экстремумов. Для оптических компонентов без связи мод базовое измерение может включать один цикл изменения амплитуды.

Анализ выходного сигнала стационарного анализатора может быть смещен во временную область с использованием преобразования Фурье. В случае использования волокна с произвольной связью мод результирующий спектр функционально эквивалентен интерферометрическому измерению и имеет гауссовское распределение. Поэтому значение ПМД определяется путем подгонки кривой Гаусса в соответствии с данными или путем вторичного подсчета, аналогично интерферометрическому методу. Оценка выходного сигнала стационарного анализатора при помощи анализа Фурье имеет преимущество, заключающееся в том, что она графически отражает характеристики связи мод образца. Кроме того, анализ Фурье позволяет осуществлять фильтрацию высоких частот, вызванных шумами или вибрацией, которые могут быть обнаружены как максимальные и минимальные значения при использовании метода подсчета экстремумов.

Преимуществом по сравнению с использованием анализатора является обнаружение выходной поляризации при помощи быстрого поляриметра. Во-первых, измерения с использованием поляриметра менее зависимы от поляризации входного излучения. Второе преимущество применения поляриметра заключается в том, что отпадает необходимость в проведении эталонного измерения и уровень абсолютной мощности может варьироваться во время измерения, не влияя на его точность.

Поляриметр также позволяет наблюдать выходное состояние поляризации на сфере Пуанкаре с целью анализа стабильности тестового устройства. Здесь информация о состоянии выходной поляризации тестируемого устройства определяется измерениями траектории вектора на сфере Пуанкаре по мере изменения длины волны независимо от связи мод.

Однако использование поляриметра имеет свои недостатки: измерение больших значений ПМД требует более высокого разрешения источника; для получения хороших статистических данных диапазон длин волн должен быть достаточно широким; измерение занимает очень много времени и чувствительно к вибрации волокна и температуре. Кроме того, необходима связь между входом и выходом волокна, что недопустимо в полевых условиях.

Интерферометрический метод измерения ПМД относится к временным методам и основан на прямом измерении временной задержки двух сигналов, излучаемых одним широкополосным источником. На

рис. 5.51 показана обобщенная схема измерения ПМД на основе интерферометра Майкельсона с установленными на выходе источника оптического излучения поляризатором и анализатором – на входе фотодиода. Свет от широкополосного источника (LED) или источника белого света направляется в оба канала интерферометра, а свет от перемещающегося и фиксированного зеркал накладывается в плоскости детектора.

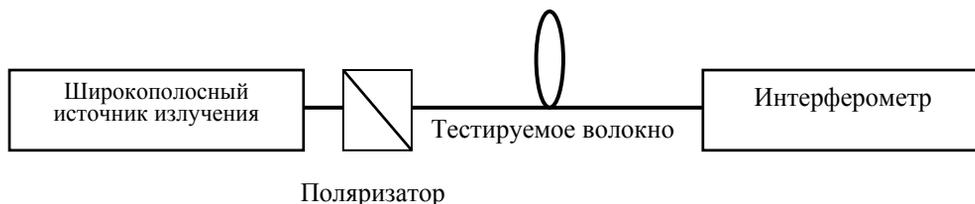


Рис. 5.51. Обобщенная схема измерения поляризационной модовой дисперсии временным методом

Интерферометрический метод применим к оптическим компонентам как с вырожденными модами, так и к оптическому волокну со связанными модами, где основные состояния поляризации являются функциями длины волны, причем получаемые в результате измерения интерферограммы имеют существенные различия. На рис. 5.52 представлена схема реализации измерений ПМД интерферометрическим методом.

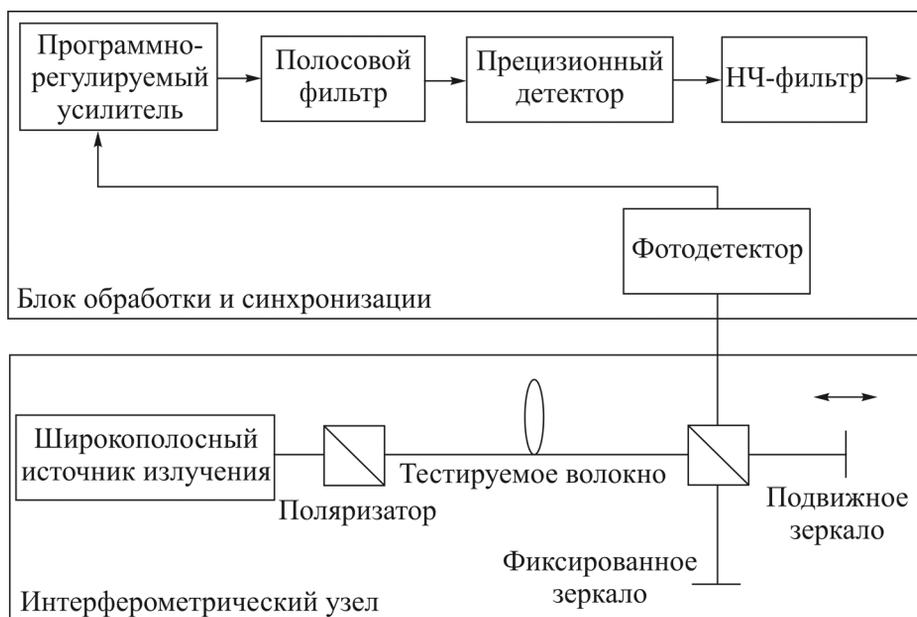


Рис. 5.52. Схема реализации измерений поляризационной модовой дисперсии интерферометрическим методом

Согласно рисунку тестируемое устройство размещено в оптическом луче, поэтому обе поляризации интерферометра распадаются на две собственные моды тестового устройства. Соответствующий отклик при перемещении зеркала имеют центральный пик, когда длины каналов интерферометра равны, а также удаленные пики, когда движущееся зеркало создает задержку, равную дифференциальной групповой задержке тестируемого устройства. Один удаленный пик создается взаимодействием между лучом медленной моды, берущим начало в канале фиксированного зеркала, и светом быстрой моды, задерживаемым движущимся зеркалом. Другой удаленный пик создается взаимодействием между лучом медленной моды, берущим начало в канале фиксированного зеркала, и светом медленной моды, возникающим вследствие идентичного движения зеркала в противоположном направлении. Время между центральным и любым из удаленных пиков и есть дифференциальная групповая задержка устройства. Относительная интенсивность пиков зависит от относительной ориентации тестируемого устройства и анализатора.

Интерферометрический метод характеризуется следующими особенностями:

- измерение больших значений ПМД требует пропорционального смещения подвижного зеркала;
- при измерениях когерентность источника должна быть меньше, чем измеряемая задержка и, следовательно, ширина спектра источника должна быть большой;
- измерение осуществляется быстро и независимо от вибрации волокна;
- из-за отсутствия связи между входом и выходом волокна этот метод идеален для полевых условий;
- измерение осуществляется в широком динамическом диапазоне;
- показания зависят от состояния поляризации на входе объекта.

5.10. Вопросы для самоконтроля

1. Классификация измерений в волоконной оптике.
2. Методы определения размеров волокна: метод преломления в ближнем поле и распределения света в ближнем поле.
3. Методы определения размеров волокна: метод «Четыре концентрических круга» и метод определения времени задержки переданного и отраженного импульсов.
4. Метод механического измерения диаметра волокна, защитного покрытия, некруглости.

5. Методы измерения механических характеристик волокна: перемотка под натяжением, прочность на разрыв.

6. Затухание оптического сигнала в волокне. Единицы и методы измерения затухания: методы обрыва, вносимых потерь и обратного рассеяния.

7. Методы измерения ширины полосы пропускания: импульсной и частотной характеристик, передаваемой или излучаемой мощности.

8. Методы измерений фазового сдвига и задержки импульса.

9. Метод распределения света в дальнем поле для измерения цифровой апертуры.

10. Метод передаваемой мощности для измерения длины волны отсечки.

11. Методы поперечного сдвига и проходящих полей измерения диаметра модового пятна.

12. Методы изменения коэффициента передачи и контроля обратного рассеяния.

13. Методы определения характеристик при испытаниях на воздействие внешних факторов: температурных циклов, ядерного излучения.

14. Методы измерения спектральных характеристик оптических волокон.

15. Методы измерения межмодовой и хроматической дисперсии.

6. ИЗМЕРЕНИЯ В МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКНАХ

6.1. Особенности измерений в области нанотехнологий

Стремление повысить плотность передаваемой через оптоволокно информации и энергии приводит к микро- и даже наноструктурированию его ядра, диаметр которого составляет несколько микрон для одномодовых волокон и 10...100 микрон для многомодовых. Работы по усложнению структуры световедущей области волокна предъявляют новые требования (стандарты) к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами и повышенной точностью, что ужесточает стандарты к уровню обеспечения единства измерений. В первую очередь это относится к точности исходных эталонов, их совершенствованию и созданию новых эталонов.

В этой развивающейся области знаний необходимо опережающее развитие метрологии, поскольку именно уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать развитие соответствующих отраслей, либо служить сдерживающим фактором.

Метрология играет важнейшую роль при разработке и коммерциализации нанотехнологий и нанопродукции. Точные, достоверные и прослеживаемые измерения являются основой обеспечения успешного и безопасного развития нанотехнологий, а также подтверждением соответствия продукции nanoиндустрии. Здесь, как нигде более, актуален тезис: «Если нельзя измерить, то невозможно создать».

Специфика нанотехнологий привела к развитию нового направления – нанометрологии. При этом нанометрология должна рассматриваться как обязательная часть всех нанотехнологий.

Нанометрология и нанонаука изучают и используют новые явления и признаки, которые появляются в тех случаях, когда какая-то характерная структура материала имеет нанометрические размеры. Очевидно, что основная задача нанометрологии – проведение измерений в диапазоне от 1 до 100 нм (в настоящее время с точностью до 0,1 нм) и адаптация существующих или разработка новых методов изучения свойств нанообъектов как функции их размеров.

Измерительные потребности наиболее высоки на этапе исследований, так как здесь необходимы данные о свойствах, размерах, структуре и составе исследуемого объекта, метрологическое обеспечение изготовления опытных образцов и исследований возможных рисков, связанных с нанобъектами.

Для обеспечения выпуска конкурентоспособной нанопродукции необходимо законодательно подтвердить ее соответствие установленным требованиям по общепризнанным процедурам. Поэтому потребность в обеспечении единства измерений возрастает на стадии передачи продукции от производства к рынку.

6.2. Методы измерений, применяемые в нанометрологии

В настоящее время существует целый ряд методов получения информации о структуре вещества в нанометровом диапазоне измерений. Среди них сканирующая зондовая и электронная микроскопия, различные виды спектроскопии, рентгеноструктурный анализ, ядерный магнитный резонанс и другие.

Основные методы измерений и измеряемые свойства нанобъектов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Методы измерений и измеряемые свойства объектов

Наименование метода	Диапазон измерений	Изменяемые свойства
Атомно-силовая микроскопия (АСМ) или сканирующая силовая микроскопия (ССМ)	Глубина: 0,5–5 нм; боковое разрешение: 0,2–130 нм	Топология, неровности поверхности, эластичность поверхности, размер зерна, фрикционные характеристики, удельные молекулярные взаимодействия и магнитные характеристики поверхности, общая плотность состояний (валентных) электронов до ферми-уровня на поверхности
Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)	Глубина: 1–5 нм; боковое разрешение: 2–10 нм	Трехмерная топология поверхности: размер, форма, неровности поверхности, дефекты, электронные структуры и местная плотность состояний
Растровая электронная микроскопия (РЭМ)	Глубина: 1 нм–5 мкм; боковое разрешение: 1–20 нм	Топография: характеристики поверхности. Морфология: форма и размер частиц. Состав: элементы и соединения, из которых состоит образец. Кристаллографическая информация: расположение атомов

Продолжение табл. 6.1

Наименование метода	Диапазон измерений	Измеряемые свойства
Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)	Глубина: 200 нм; боковое разрешение: 2–20 нм	Морфология: размер и форма частиц Кристаллографическая информация: обнаружение дефектов атомной шкалы Информация по составу: элементы и соединения, из которых состоит образец и информация о присутствующих фазах (замер параметров кристаллической решетки) и ориентация образца
Растровая просвечивающая электронная микроскопия (РПЭМ)	Глубина: 200 нм; боковое разрешение: 2–20 нм	Структурная, химическая и морфологическая информация
Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (СОМП)	Разрешение: 50–100 нм	Химические особенности и ориентационная информация
Спектроскопия энергетической дисперсии рентгеновского излучения	0,1 мкм для более тяжелых атомов и 1 мкм для более легких элементов	Концентрация каждого элемента в образце, идентификация осадений в сплавах, активные фазы в катализаторах, элементарная сегрегация на границах зерна, количественный состав многокомпонентных фаз
Рентгеновская абсорбционная спектроскопия (РАС)		Структурная информация (связи, координация, количество)
Спектроскопия одиночных молекул (SMS)		Индивидуальные функциональные характеристики молекулярных систем, такие как, например, перенос возбуждения, разделение заряда и флуоресцентные воздействия
Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС)	Глубина: 0,3–3 нм; боковое разрешение 30 нм	Химический анализ: состав поверхностных слоев образца, атомные уровни
Поляризационная спектроскопия		Ориентация возбуждения и миссия; дипольные моменты переходов
Раман-спектроскопия		Химическая информация: концентрация примесей. Вибрационная информация

Окончание табл. 6.1

Наименование метода	Диапазон измерений	Измеряемые свойства
Фотоэлектронная рентгеновская спектроскопия (ФРС) или электронная спектроскопия для химического анализа	Глубина: 0,5–10 нм; боковое разрешение: 5 нм–50 мкм	Химические элементы на поверхности, исследование уровня ядра
Масс-спектрометрия вторичных ионов	Несколько атомных слоев приблизительно 1–3 нм	Состав областей около поверхности материала, концентрация примесей
Ядерно-магнитный резонанс (ЯМР)		Магнитные свойства ядер, идентификация индивидуальных атомов в чистой молекуле и анализ состава неизвестных материалов, релаксация, мобильность и конформация функциональных молекул для интересующих систем

Разработка стандартов, измерительных технологий для диагностики свойств материалов, мониторинга нанопроцессов, определения параметров средств производства, а также средств анализа структур должна базироваться на современной эталонной базе, использующей в своей основе научные принципы квантовой метрологии.

Так, например, во многих случаях невозможно применение контактных средств измерения температуры, использование радиационных термометров требует точного знания излучательной способности объекта. Высокоэффективные нанотехнологические процессы, такие как ионно-плазменное напыление, создание чистых подложек и др., требуют получения и поддержания вакуумной среды и контроля её параметров на уровне нанопаскаля (нПа).

Измерение сорбционной способности различных типов трубок и волокон к водороду осуществляется на основе масс-спектрометрического метода (с нагревом образца в вакууме) определения содержания водорода в углеродном наноструктурном материале. Исследования в области нанометрового диапазона измерений длины в результате ключевых сличений привели к созданию образцовых мер по нанометрологии по пяти видам образцовых мер: NANO-1 – меры ширины линий, NANO-2 – меры высоты ступени, NANO-3 – линейные шкалы, NANO-4 и NANO-5 – дифракционные решетки.

Возможности нанотехнологий в области системного управления и производства эволюционируют в четырех различных параллельных поколениях продуктов и процессов: пассивные наноструктуры, активные наноструктуры, наносистемы с трехмерными свойствами и неоднородные молекулярные наносистемы.

Для определения степени необходимости стандартизации в области нанотехнологий для создания и систематического формирования рынков стандарты характеризуются в соответствии с их экономическими функциями. Можно выделить следующие категории стандартов:

- стандарты на измерения и испытание (включая терминологию);
- стандарты на качество и безопасность;
- стандарты на совместимость и взаимодействие.

Нанотехнологии быстро развиваются, расширяются их производственные возможности, применение нанотехнологий оказывает постоянное возрастающее влияние на все сферы жизни и сопровождается изменениями в социальной, экономической, этической и международной областях. В связи с этим повышается важность интегрирующей роли Международной организации по стандартизации.

Остановимся более подробно на описании основных методов, применяемых в нанометрологии.

При изучении нанометрических размеров большую часть информации о создании устройств и материалов получают с помощью **микроскопии**. Чтобы получить больше информации о нанометре, необходимо постоянное усовершенствование инструментов и оборудования. Используя такой подход, можно не только получить представление о топологии или морфологии нанообъектов, но и определить другие параметры, такие как химический состав, прочность, проводимость и др.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является стандартным инструментом научных и производственных лабораторий для работы с нанообъектами. Существуют десятки различных конструкций на основе общего принципа СЗМ. Электрохимическая СЗМ, магнитно-силовая микроскопия, микроскопия силы трения и сканирующие автоматические оптические микроскопы являются наиболее распространенными видами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Они позволяют делать изображения рельефа поверхности и соотношение с различными физическими параметрами с очень большим увеличением в единицах – от миллиметровой до нанометровой шкалы.

СЗМ обладает достаточно широким набором методик для исследования поверхностей. Общим для всех методов является наличие заостренного зонда как инструмента работы с поверхностью образцов. Существуют контактные, полуконтактные и бесконтактные методы, а также различные режимы работы, среди которых: туннельный режим, атомно-силовой режим, режим спектроскопии и др. С помощью этих методик можно измерять не только топологию структуры, но и множество специальных свойств, таких как модули упругости, распределение различных веществ по поверхности, степень шероховатости поверхности, распределение статического заряда, ориентация магнитных доменов и др. (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Характеристики основных методов и методик микроскопии

Наименование	Общие характеристики
1. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)	
1.1. Метод постоянного тока (Constant Current mode)	Измерение рельефа поверхности при сканировании образца проводящим зондом, при этом система обратной связи поддерживает постоянной величину туннельного тока между зондами и поверхностью
1.2. Метод постоянной высоты (Constant Height mode)	Измерение рельефа поверхности при сканировании образца проводящим зондом, при этом система обратной связи поддерживает постоянной величину туннельного тока между зондом и поверхностью и z-координата сканера поддерживается постоянной
1.3. Метод отображения работы выхода	Измерение рельефа поверхности получается путем поточечного измерения логарифмических изменений туннельного тока при изменении расстояния зонд–образец
1.4. Метод $I(z)$ -спектроскопии	Измерение туннельного тока в зависимости от расстояния зонд–образец в каждой точке СТМ изображения
1.5. Метод $I(v)$ -спектроскопии (or Current Imaging Tunneling Spectroscopy, CITS)	Одновременное получение обычного изображения рельефа при фиксированных значениях тока I_0 и напряжения смещения U_0
2. Контактная сканирующая атомно-силовая микроскопия (КАСМ)	
2.1. Метод постоянной силы (Constant Force mode)	Измерение рельефа поверхности при сканировании образца зондом, находящимся с ним в непосредственном контакте, при этом система обратной связи поддерживает постоянной силу прижима зонда к поверхности

Продолжение табл. 6.2

Наименование	Общие характеристики
2.2. Метод постоянной высоты (Constant Height mode)	Измерение рельефа поверхности при сканировании образца зондом, находящимся с ним в непосредственном контакте, при этом система обратной связи разомкнута и z-координата сканера поддерживается постоянной
2.3. Контактный метод рассогласования (Contact Error mode)	Отображение сигнала рассогласования на входе системы обратной связи в процессе реализации метода постоянной силы, обеспечивает подчеркивание малоразмерных деталей рельефа поверхности
2.4. Микроскопия латеральных сил (Lateral Force Microscopy)	Отображение распределения локальной силы трения по поверхности образца
2.5. Метод модуляции силы (Force Modulation mode)	Отображение распределения локальной упругости по поверхности образца
2.6. Отображение силы растекания (Spreading Resistance Imaging)	Отображение распределения локальной проводимости образца
2.7. Контактная электростатическая силовая микроскопия (ЭСМ) (Contact EFM)	Отображение распределения электрического потенциала по поверхности образца, характеризуется повышенным разрешением
2.8. Атомно-силовая акустическая микроскопия (АСАМ) (Atomic-force acoustic microscopy, AF AM)	Отображение распределения локальной упругости по поверхности образца
2.9. АСАМ резонансная спектроскопия (AFAM Resonance Spectroscopy)	Отображение распределения локальной упругости по поверхности образца с возможностью получения количественных данных по распределению приведенного модуля Юнга
3. Прерывисто-контактная сканирующая силовая микроскопия	
3.1. Прерывисто-контактный метод	Измерение рельефа поверхности с использованием колеблющегося с резонансной частотой зонда. В процессе сканирования острие зонда в нижней точке колебаний слегка касается поверхности образца
3.2. Прерывисто-контактный метод рассогласования (Semicontact Error mode)	Отображение сигнала рассогласования на входе системы обратной связи в процессе реализации прерывисто-контактного метода, обеспечивает подчеркивание малоразмерных деталей рельефа поверхности
3.3. Метод отображения фазы (Phase Imaging mode)	Отображение особенностей рельефа, поверхностной адгезии и вязкоупругости, определяющих фазовую задержку колебаний зонда

Наименование	Общие характеристики
4. Бесконтактная атомно-силовая микроскопия (Non Contact AFM)	
4.1. Бесконтактный метод АСМ (Non-Contact mode)	Измерение рельефа поверхности с использованием колеблющегося с резонансной частотой зонда. В процессе сканирования острие зонда не касается поверхности образца, а обратная связь поддерживает постоянную амплитуду колебания зонда
5. Многопроходные методики (Many-pass techniques)	
5.1. Статическая магнитно-силовая микроскопия (СМСМ) (DC Magnetic Force Microscopy, DC MFM)	Отображает распределение магнитной структуры поверхности, связанной с локальными различиями распределения первой производной магнитного поля
5.2. Динамическая магнитно-силовая микроскопия (ДМСМ) (AC Magnetic Force Microscopy, AC MFM)	Отображение распределения магнитной структуры поверхности, связанной с локальными различиями распределения второй производной магнитного поля
5.3. Электростатическая силовая микроскопия (ЭСМ) (Electrostatic Force Microscopy, EFM)	Отображает распределение электрического потенциала по поверхности образца
5.4. Метод зонда Кельвина (Kelvin Probe Microscopy)	Измерение распределения электрического потенциала по поверхности образца
5.5. Сканирующая емкостная микроскопия (СЭМ) (Scanning Capacitance Microscopy, SCM)	Отображение распределения локальной поверхностной электрической емкости в системе проводящий образец – проводящее острие
6. Сканирующая ближнеполюсная оптическая микроскопия (СБОМ) – это возможность изучать оптические свойства образца (его способность отражать, пропускать, рассеивать свет) с пространственным разрешением несколько десятков нанометров	

Представленные в сводной таблице методы являются базой для реализации на их основе различных средств измерений СЗМ.

В 1981 г. Герд Бинниг и Хайнрих Ререр из лаборатории ИВМ в Цюрихе создали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). С его помощью были получены поразившие всех изображения поверхности кремния в реальном масштабе. Человек впервые смог увидеть атомы. Развивая идеи, заложенные в СТМ, в 1986 г. Герхард Бинниг, Калвин Куэйт и Кристофер Гербер создали атомно-силовой микроскоп (АСМ). В свою очередь, АСМ стал родоначальником широкого семейства сканирующих зондовых устройств и использующих их технологий, которое продолжает увеличиваться и по сей день. В том же 1986 г. Г. Бинниг

и Х. Ререр были удостоены Нобелевской премии в области физики за открытие принципа туннельной, атомно-силовой и световой сканирующей микроскопии.

Однако еще в 1966 г. Рассел Янг высказал предположение о возможности получения рельефа поверхности путем использования тока между поверхностью и металлической остроконечной иглой. В 1971 г. он опубликовал статью об устройстве, названном *Torographiner*, которое содержало все основные узлы сканирующего туннельного микроскопа.

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) – таково общее название такого типа устройств – широко используются сегодня как в фундаментальной науке о поверхности, так и традиционном анализе шероховатости поверхности. Не менее эффективно применение СЗМ-технологий для построения трехмерных изображений – от атомов до микронных образований на поверхности биологических объектов.

Сканирующий зондовый микроскоп – это инструмент со множеством возможностей. С его помощью можно строить реальные трехмерные изображения с широким динамическим диапазоном, охватывающим традиционные «сферы деятельности» оптических и электронных микроскопов. Это также и профилометр с беспрецедентным разрешением. Сканирующий зондовый микроскоп может измерять различные физические свойства.

Изображения, получаемые с помощью СЗМ, относятся к разряду создаваемых микроскопическими методами образов, которые достаточно легко интерпретировать. В случае электронного или оптического микроскопа принцип получения изображения базируется на сложных электромагнитных дифракционных эффектах. Поэтому иногда могут возникнуть затруднения при определении, является ли некоторый элемент микрорельефа поверхности выступом или впадиной. Напротив, СЗМ регистрирует истинно трехмерные параметры. На СЗМ-изображении выступ однозначно предстает выступом, а впадина ясно видна как впадина. На получаемых при помощи оптических или электронных микроскопов изображениях, например, плоского образца, состоящего из чередующихся отражающих и поглощающих участков, могут возникать искусственные изменения контрастности.

Физическую основу сканирующей зондовой микроскопии составляют явления, определяемые туннелированием электронов в зазоре между атомарно острым зондом и поверхностью анализируемого образца. Туннельный ток через зазор очень чувствителен к структурным не-

однородностям поверхности образца. Поэтому, перемещая зонд вдоль поверхности и контролируя протекающий по нему туннельный ток, можно анализировать топологию поверхности с атомным разрешением.

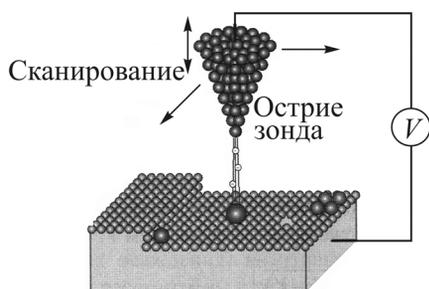


Рис. 6.1. Относительное расположение зонда и подложки в сканирующем туннельном микроскопе

Металлический зонд, обычно изготавливаемый из вольфрама (рис. 6.1), закрепляют в держателе, пространственное положение которого регулируется управляющим напряжением. Зонд подводят к образцу на расстояние, обеспечивающее протекание туннельного тока, и пьезоэлементами, задающими его положение в плоскости образца, сканируют вдоль поверхности.

Таким образом, удается не только «увидеть» расположение атомов на поверхности, но и различить области с разным химическим составом. Вертикальное разрешение при этом достигает 0,01–0,05 нм, а горизонтальное – 0,3 нм. Размер анализируемой поверхности обычно составляет сотни микрометров. Ограничением метода является требование высокой электропроводности исследуемого материала, что необходимо для протекания достаточного для регистрации туннельного тока.

В состав СЗМ-комплекса обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные, производит на их основе построение СЗМ-изображения и, кроме того, позволяет обрабатывать полученное изображение, без чего подчас бывает трудно или вообще невозможно проанализировать наблюдаемую картину.

АСМ и СТМ являются на сегодня наиболее распространенными в практике СЗМ-технологиями. Тем не менее большинство промышленно выпускаемых устройств обычно разработаны таким образом, что для добавления к прибору новых функций и возможностей достаточно переоснастить его основной блок, заменив отдельные небольшие части. Иногда единственным необходимым изменением является переключение из одного режима в другой непосредственно в обслуживающей компьютерной программе.

Сканирующая туннельная микроскопия – метод микроскопии, позволяющий изучать электропроводящие поверхности в соответствии с атомной шкалой. СТМ дает картину атомной схемы поверхности пу-

тем выявления неровностей в плотности электронов, которые обусловлены положением атомов.

Основное применение СТМ – это измерения топографии. Именно благодаря своей чрезвычайно высокой чувствительности СТМ способен формировать изображения поверхностей с субангстремной точностью по вертикали и атомным латеральным (т. е. в горизонтальном направлении) разрешением.

Перемещение атомов параллельно поверхности подложки может быть осуществлено в процессе *полевой диффузии (field diffusion)* или *скольжения (sliding)*. В обоих случаях связи между перемещаемыми атомами и подложкой не разрываются. Адсорбированный (находящийся на поверхности) атом всегда находится в потенциальной яме. Энергия, необходимая для его перемещения, соответствует энергетическому барьеру для диффузии по поверхности. Она обычно находится в диапазоне 0,01–1,0 эВ.

Полевая диффузия адсорбированных на поверхности атомов инициируется сильно неоднородным электрическим полем, создаваемым между острием зонда и поверхностью. Напряженность этого поля может достигать 30–50 В/нм. Этого вполне хватает для ионизации и десорбции (удаления) атомов. Потенциальная энергия этого поля добавляется к периодическому потенциалу поверхности (рис. 6.2, *a*), образуя потенциальный рельеф, благоприятный для направленного движения адсорбированного атома в область, находящуюся непосредственно под острием зонда. В зависимости от особенностей взаимодействия рассматриваемого атома и зонда возможно два варианта результирующего потенциального рельефа.

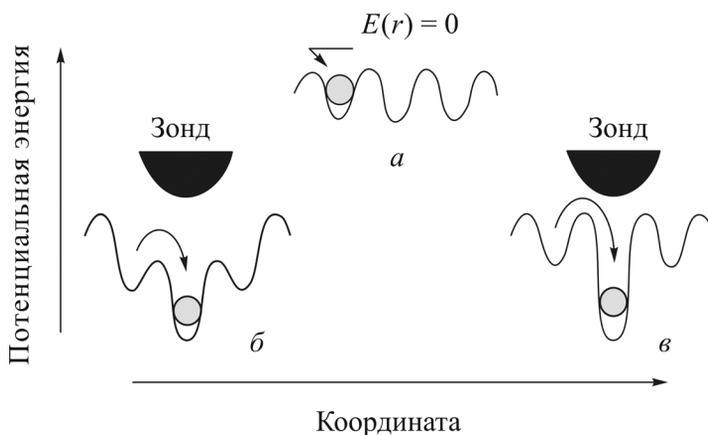


Рис. 6.2. Потенциальная энергия атома, адсорбированного на поверхности кристаллической подложки, как функция его положения относительно зонда сканирующего туннельного микроскопа

При слабом взаимодействии обычно формируется широкая потенциальная яма (рис. 6.2, б) с рельефом, модулированным периодическим потенциалом поверхности. В случае же сильного ориентированного взаимного притяжения атома и зонда, связанного с их химической природой, потенциальная яма для атома сужается и локализуется строго под зондом (рис. 6.2, в). В процессе диффузии по поверхности адсорбированный атом «проваливается» в эту яму и задерживается в ней.

Существуют два варианта конструкции СТМ в зависимости от режима сканирования образцов. В режиме постоянной высоты острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования изменяется. В режиме постоянного тока СТМ задействуется система обратной связи для поддержания постоянного тока туннелирования путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой точке. В режиме постоянного тока визуализация топографии осуществляется на основании данных о величине вертикальных перемещений сканирующего устройства. Если система поддерживает ток туннелирования постоянным в пределах нескольких процентов, то расстояние между острием и образцом будет постоянным с погрешностью в несколько сотых ангстрема.

У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты более быстрый, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх и вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких поверхностей. В режиме постоянного тока можно с высокой точностью измерять нерегулярные поверхности, но измерения занимают больше времени.

Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС) является наряду с измерениями топографии другой важной областью приложения СТМ. В первом приближении образ, составленный из значений тока туннелирования, отражает топографию поверхности образца. Если же говорить более точно, туннельный ток соответствует электронной плотности состояний поверхности. В действительности СТМ регистрирует количество заполненных или незаполненных электронных состояний вблизи поверхности Ферми в диапазоне значений энергии, определяемом прикладываемым рабочим напряжением. Можно сказать, что СТМ измеряет скорее не физическую топографию, а поверхность постоянной вероятности туннелирования.

Чувствительность СТМ к местной электронной структуре может вызвать затруднения, если необходимо картографировать топографию (т.е. получить изображение топографии). Например, если какой-то уча-

сток образца окислен, то, когда острое сканирующей иглы попадет на него, туннельный ток резко уменьшится.

СТМ, работающий в режиме постоянного тока, даст команду острию приблизиться к поверхности, чтобы поддержать установленную величину тока туннелирования. В результате острие может углубиться в поверхность. В то же время чувствительность СТМ к электронной структуре может быть огромным преимуществом. Более традиционные спектроскопические методы, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия или инверсная фотоэмиссионная спектроскопия, детектируют и усредняют данные, исходящие с относительно большой площади размерами от нескольких микрон до нескольких миллиметров в поперечнике. СТМ, наоборот, может получать спектры с площадями, сравнимых по размерам с отдельными атомами.

Электронная структура атома зависит от его разновидности (является ли он, к примеру, атомом кремния или атомом углерода), а также от его местного химического окружения (сколько вокруг него атомов, какого они типа и как симметрично распределены). Исследование зависимости сигнала СТМ от местной электронной структуры поверхности известно как сканирующая туннельная спектроскопия.

СТС охватывает ряд методов: получение «топографических» (в режиме постоянного тока) изображений с использованием различных рабочих напряжений и сравнение их; получение «токовых изображений» (в режиме постоянной высоты) при различных зазорах; варьирование рабочего напряжения при позиционировании острия над интересующим элементом топографии с одновременной регистрацией тока туннелирования.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ), или сканирующая силовая микроскопия (ССМ), была изобретена в 1986 г. Биннигом, Кватом и Гербером. Как и любая сканирующая микроскопия, АСМ использует датчик большой резкости, перемещающийся по поверхности образца в растровой разверстке.

Атомно-силовые микроскопы (АСМ) появились как развитие СТМ-технологии, однако заложенные в них совершенно иные принципы позволяют исследовать поверхности любых материалов – проводящих, полупроводников, а также изоляторов, т. е. непроводящих электрический ток. АСМ зондируют поверхность образца острой иглой длиной 1–2 мкм и диаметром обычно не более 10 нм. Игла устанавливается на свободном конце измерительной консоли.

Основной принцип работы АСМ заключается в воздействии сил со стороны поверхности образца на острие сканирующей иглы. Силы, которые чаще всего ассоциируются с АСМ, – это межатомные силы, называемые также вандерваальсовыми. Для определения этих сил острый зонд закрепляют на упругой консоли, как показано на рис. 6.3. Зондовый датчик АСМ называют *кантилевером* (англ. *cantilever* – консоль).

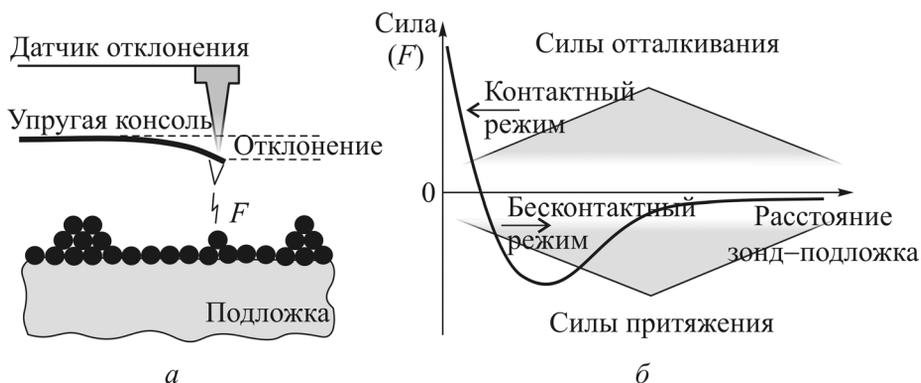


Рис. 6.3. Относительное расположение зонда и подложки (а) и сила взаимодействия зонд–подложка, регистрируемая в атомном силовом микроскопе (б)

Отклонение консоли пропорционально действующей на нее силе. Это отклонение регистрируется с высокой точностью оптическими (например, посредством лазерной интерференции) или электронными (например, зондом сканирующего туннельного микроскопа) методами. При сканировании зонда вдоль анализируемой поверхности сигнал об отклонении консоли дает информацию о распределении атомных и молекулярных сил по поверхности образца, а следовательно, и о расположении и природе поверхностных атомов.

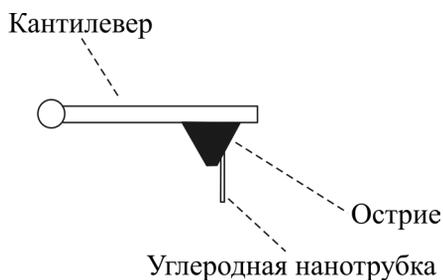


Рис. 6.4. Схема размещения однослойной углеродной нанотрубки на кантилевере атомного силового микроскопа

В качестве кантилевера эффективно используются нанотрубки (рис. 6.4), они изгибаются при ударе о поверхность и не ломаются, а затем возвращаются в исходное состояние. Склонность нанотрубок к складыванию вместо разрушения делает повреждение кончика маловероятным. Благодаря малому поперечному сечению и большому отношению длины к диаметру такого зонда он может проникать

в глубокие канавки на поверхности, которые недоступны для обычных зондов. Электропроводные нанотрубки могут использоваться и как зонды для сканирующей туннельной микроскопии.

Атомная силовая микроскопия в отличие от сканирующей туннельной микроскопии не чувствительна к электронным свойствам подложки. Поэтому она может быть использована для анализа поверхности как проводящих, так и диэлектрических материалов.

В отношении контакта между острием сканирующей иглы и поверхностью исследуемого образца работа атомно-силового микроскопа обычно проходит в одном из режимов: контактном и бесконтактном, сочетание которых дает так называемый режим «обстукивания». При контактном режиме, известном иначе как режим отталкивания, острие сканирующей иглы АСМ приходит в мягкий «физический контакт» с образцом. Измерительная консоль, на свободном конце которой расположена игла, обычно характеризуется низкой константой упругости, величина которой должна быть меньше, чем эффективная константа упругости, удерживающая атомы образца вместе.

Для контактного АСМ отталкивающая межатомная сила должна быть уравновешена другими усилиями. Это происходит благодаря наличию двух сил – капиллярной и консольной.

Капиллярная сила – это воздействие на острие сканирующей иглы со стороны тонкого слоя влаги, обычно присутствующего на поверхностях, находящихся в обычной среде. Капиллярная сила возникает, когда адсорбированная на поверхности влага приподнимается вокруг острия. Оказываемое на острие сильное притягивающее воздействие (около 10^{-8} Н) удерживает его в контакте с поверхностью. Величина капиллярной силы зависит от расстояния между острием и образцом.

Ввиду того, что острие находится в контакте с образцом, капиллярная сила должна быть постоянной, поскольку расстояние между острием и образцом фактически не изменяется. Другое условие, позволяющее считать капиллярную силу постоянной, это предположение о достаточной однородности слоя влаги.

Воздействие со стороны самой измерительной консоли подобно усилию в сжатой пружине. Величина и знак (отталкивающая или притягивающая) «консольной» силы зависит от отклонения консоли и ее константы упругости. Сила, прилагаемая измерительной консолью контактного АСМ, в отличие от капиллярной является переменной.

Общее усилие, прикладываемое со стороны острия сканирующей иглы к образцу, это сумма капиллярной и консольной сил. Величина суммарной силы находится в типичном рабочем диапазоне 10^{-7} – 10^{-6} Н.

В бесконтактном режиме, также известном как режим притяжения, АСМ отслеживает притягивающие вандерваальсовы силы между острием сканирующей иглы и образцом. Зазор между острием и образцом обычно составляет 5–10 нм. На таком расстоянии электронные орбитали атомов острия сканирующей иглы начинают синхронизироваться с электронными орбиталями атомов образца. В результате возникает слабое притяжение, потому что в любой момент времени атомы острия и образца поляризованы в одном и том же направлении. В свободном пространстве эти атомы будут сближаться до тех пор, пока сильное электростатическое отталкивание не станет преобладающим. Чаще всего бесконтактные АСМ конструируются для работы в динамическом режиме.

В бесконтактном режиме работы АСМ суммарная сила между острием и образцом небольшая – обычно $\sim 10^{-12}$ Н. Эта малая сила является преимуществом при исследовании мягких и упругих образцов. Еще одно преимущество заключается в том, что такие образцы, как, например, кремниевые подложки, не загрязняются при контакте с острием.

В отношении возбуждения вынужденных колебаний измерительной консоли АСМ различают два режима – статический и динамический. Если в измерительной консоли АСМ модулируют колебания, то такой режим называют динамическим, в противном случае – статическим.

В статическом режиме силы взаимодействия между острием иглы и поверхностью образца вызывают отклонение измерительной консоли, изгибая ее до достижения статического равновесия. В процессе сканирования образца (при движении острия над неподвижным образцом или образца под неподвижным острием) АСМ детектирует отклонения консоли, формируя набор данных о топографии одним из двух способов. В первом, называемом режимом постоянной высоты (другое его название – режим переменного отклонения), данные об изменениях положения консоли в пространстве могут быть непосредственно использованы для формирования образа топографии. Под постоянной высотой здесь подразумевается неизменность расстояния между зондирующим узлом и образцом. Режим постоянной высоты часто используется для получения изображений атомно-плоских поверхностей в атомном масштабе, где отклонения консоли и, следовательно, изменения прикладываемой силы всегда будут малыми. Режим постоянной высоты также важен для визуализации в реальном масштабе времени изменяющихся поверхностей, когда нельзя пренебречь высокой скоростью сканирования. Аналогичный метод построения изображений с таким же названием существует и у СТМ.

В другом методе, который называют режимом постоянной силы, отклонение измерительной консоли используется в качестве входного параметра для системы обратной связи, которая поддерживает величину этого отклонения постоянной. В данном случае сканирующее устройство передвигается вверх и вниз по нормали в соответствии с текущими условиями микрорельефа поверхности образца, и на основании данных об этих перемещениях формируется изображение топографии. Режим постоянной силы обычно наиболее предпочтителен в большинстве приложений; хотя скорость сканирования здесь ограничена скоростью реакции системы обратной связи, но общее воздействие, оказываемое на образец острием сканирующей иглы, хорошо контролируется. Действительно, при поддержании постоянного отклонения консоли суммарная сила, прикладываемая к образцу, остается постоянной. Изображения, полученные в режиме постоянной силы, обычно достаточно легко интерпретировать как образы топографии.

Для получения изображений поверхности образца можно использовать не только данные о перемещении сканирующего устройства (так называемая «запись по высоте»), но и об изменении в процессе сканирования амплитуды или частоты колебаний консоли. В случае «записи по амплитуде» или «по частоте» появляется возможность визуализировать распределение механических свойств по поверхности образца, что дает не менее ценную информацию, чем данные о его топографии.

В табл. 6.3 дается сравнение основных режимов работы АСМ в их различных комбинациях.

Качество результатов, которые можно получить на бесконтактном АСМ, в значительной мере зависит от использования качественной измерительной консоли и сканирующей иглы. Измерительная консоль для бесконтактного режима должна быть значительно жестче, чем консоль для контактного АСМ, чтобы в процессе своих осцилляций (колебаний) она случайно не коснулась поверхности.

Режим «обстукивания», по сути, является реализацией контактного АСМ в динамическом режиме, образ действия которого подобен бесконтактному. В режиме «обстукивания» измерительная консоль колеблется на своей резонансной частоте с высокой амплитудой порядка 100 нм. При каждом колебании острие касается образца в своей нижней точке (отсюда термин «режим обстукивания»). При работе в режиме «обстукивания» повреждение образца менее вероятно, чем в контактном, поскольку в процессе перехода к каждой последующей точке ска-

нирования устраняются боковые (латеральные) силы (трение или протягивание) между образцом и острием. Однако вертикальные силы в режиме «обстукивания» должны быть значительно выше, чем капиллярная сила (10^{-8} Н), чтобы дать острию сканирующей иглы возможность проникать внутрь и выходить из водного слоя без задержки. Эта вертикальная сила достаточно велика, чтобы деформировать поверхность мягких и упругих материалов. Поэтому изображения, полученные в режиме «обстукивания», часто представляют собой смесь топографии и упругих свойств поверхности образца.

Таблица 6.3

Режимы работы атомно-силового микроскопа

Способы		Режимы работы	
		Статический	Динамический
Контактный	Преимущества	Высокое латеральное разрешение. Возможность определять деформацию в системе острие – поверхность	Возможность определять площадь контакта или модуль упругости. Высокое силовое разрешение (~0,001 нН). Незначительный температурный дрейф
	Недостатки	Возможно повреждение поверхности. Низкое силовое разрешение (~1 нН). Подверженность температурному дрейфу	Возможно повреждение поверхности. Модуляция нарушает адгезионное взаимодействие между острием и поверхностью
Бесконтактный	Преимущества	Работа без повреждения поверхности	Работа без повреждения поверхности. Высокое силовое разрешение. Незначительный температурный дрейф
	Недостатки	Низкое силовое и пространственное разрешение. Подверженность температурному дрейфу	Низкое пространственное разрешение (~10 нм)

Латерально-силовой микроскоп (ЛСМ) – это контактный АСМ, отображающий латеральные (т. е. боковые) отклонения измерительной консоли (закручивание), которые возникают в ней в плоскости парал-

лельной поверхности образца. С помощью ЛСМ возможна визуализация изменений поверхностного трения, являющихся результатом негомogeneity материала поверхности, а также получение контрастных изображений любых поверхностей.

С созданием ЛСМ связано возникновение такой области исследований, как *нанотрибология*: эта технология предоставляет исключительную возможность исследовать процессы трения и изнашивания на молекулярном уровне при взаимодействии как отдельных выступов микрорельефа, так и отдельных атомов или молекул.

Разновидностью АСМ является магнитно-силовая микроскопия (МСМ), которая позволяет получить информацию по магнитным доменам в пределах образца.

Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) отображает пространственные вариации магнитных сил на поверхности образца. Особенностью конструкции МСМ является то, что острие сканирующей иглы покрывается тонкой ферромагнитной пленкой. МСМ работает в бесконтактном режиме и детектирует изменения в резонансной частоте измерительной консоли, обусловленные изменениями магнитного поля в зазоре между острием сканирующей иглы и образцом. МСМ может визуализировать естественно встречающиеся и свободно записанные доменные структуры в магнитных материалах.

Изображения, полученные с помощью МСМ, содержат информацию как о топографии, так и о магнитных свойствах поверхности. Какая информация преобладает на изображении, зависит от величины расстояния между острием и поверхностью, потому что межатомная магнитная сила существует при больших зазорах, чем это наблюдается для вандерваальсовой силы. Если острие находится близко к поверхности (< 10 нм), то в режиме работы стандартного бесконтактного АСМ на изображении будет отражена преимущественно топография. При увеличении зазора между острием и образцом (примерно до 30–300 нм) влияние топографии снижается и становятся видны магнитные эффекты. Анализируя ряд изображений, полученных при различной высоте острия над поверхностью, можно успешно отделить магнитные эффекты от влияния топографии. Подобное поведение характерно также и для электростатических сил.

В **электростатическом силовом микроскопе** (ЭСМ) напряжение прикладывается между острием и образцом, в то время как измерительная консоль движется над поверхностью, не касаясь ее. Консоль откло-

няется, когда попадает на статически заряженные области. Величина этого отклонения пропорциональна плотности заряда и может быть измерена стандартной системой. ЭСМ применяется для исследования распределения поверхностной плотности носителей заряда.

С помощью *сканирующей термальной микроскопии* (СТерМ) визуализируются локальные вариации теплофизических параметров поверхностей. Данная методика реализуется за счет использования терморезистивного зонда, работающего в одном из двух режимов – постоянного тока или постоянной температуры.

В первом случае электрическое сопротивление термочувствительного зонда изменяется вместе с изменением температуры в данной точке сканирования. Это регистрируется путем измерения падения напряжения при пропускании через зонд слабого постоянного тока, исключаящего, однако, его нагрев. При такой схеме работы картографируются температурные поля на сканируемой поверхности.

В режиме постоянной температуры отслеживается тепловой поток от зонда к образцу при поддержании постоянной температуры зонда, что позволяет визуализировать локальные изменения теплопроводности поверхности образца. Набор данных составляется из значений напряжения, прикладываемого к зонду для его обогрева и изменяющегося в каждой точке сканирования в зависимости от теплопроводности материала образца.

Близкопольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ) является особой разновидностью сканирующей зондовой технологии, в которой используется видимый свет. Другое название этой методики – сканирующая световая микроскопия. Традиционно разрешение оптических микроскопов ограничено длиной волны света – примерно половиной микрона. БСОМ улучшает разрешение оптического микроскопа на порядок.

Зондом в БСОМ является «световая воронка», которой сканируют образец. Видимый свет исходит из узкого конца световой воронки диаметром 10–30 нм и попадает на детектор либо после отражения от образца, либо пройдя сквозь него. Интенсивность оптического сигнала регистрируется детектором в каждой точке измерений, а набор данных, считанных со всей сканируемой поверхности, составляет БСОМ-образ. С помощью БСОМ можно формировать изображение поверхности в видимом свете с разрешением около 15 нм при условии, что расстояние между источником света и образцом очень мало, ~ 5 нм.

Световая воронка и система поддержания постоянного расстояния между источником света и образцом – это две достаточно «тонкие» части БСОМ. Обычно световая воронка изготавливается нагреванием оптического волокна, протяжкой его до малого диаметра с последующим скалыванием с одного конца. После этого на волокно для лучшей светопроводимости наносят слой металла (металлизируют). Другой способ изготовления световой воронки предусматривает высверливание небольшого отверстия в острие пустотелой сканирующей иглы АСМ и направление внутрь ее света. Разработка эффективной световой воронки в настоящее время является областью активных исследований.

БСОМ должен поддерживать расстояние между острием сканирующей иглы и образцом постоянным, чтобы получить простое оптическое изображение поверхности. Для этого могут быть использованы традиционные для АСМ методики поддержания постоянного отклонения измерительной консоли.

Имея в виду возможность элементного распознавания атомов, необходимо отметить, что в настоящее время никакая технология СЗМ не может позволить определить тип атома или молекулы при отсутствии другой информации. Тем не менее с помощью СЗМ можно проводить ограниченную идентификацию материалов, используя для этих целей данные об электронной структуре, различия в фрикционных свойствах, в притягивающем вандерваальсовом взаимодействии.

Спектроскопия – один из основных методов исследования наночастиц. Применяют различные методы спектроскопии, в том числе Оже-спектроскопию, фотоэлектронную рентгеновскую спектроскопию, Раман-спектроскопию, фотolumинисцентную и электролюминисцентную спектроскопию, дифракцию медленных электронов и др.

Метод спектроскопии Оже основан на эффекте, открытом в 1925 г. французским физиком Пьером Оже в инертных газах. Суть этого явления в том, что если на одном из внутренних уровней энергии атома по каким-то причинам создается вакансия – дырка, то она быстро заполняется другим электроном атома, а выделяющаяся при этом лишняя энергия передается еще одному электрону, который и «выстреливается» из атома (Оже-электрон). Энергия этих электронов определяется природой испускающих их атомов, а число электронов пропорционально количеству таких атомов. Поэтому Оже-спектроскопия позволяет проводить одновременно качественный и количественный анализ исследуемого вещества. Оже-электроны имеют энергию, которой едва

хватает для прохождения нескольких ангстрем твердого вещества. Следовательно, они несут информацию именно о приповерхностных слоях кристалла.

Первичную вакансию в поверхностных атомах можно создать электронным, фотонным и ионным пучками. Соответственно различают электронную, фотонную и ионную Оже-спектроскопию поверхности: ЭОС, ФОС и ИОС, первая из которых получила наибольшее распространение. Достигнутая сейчас чувствительность этого метода позволяет регистрировать, например, адсорбированные на поверхности атомы в количествах, не превышающих доли процента от общего числа поверхностных атомов.

Дифракция медленных электронов основана на фундаментальном свойстве материи – волновом характере движения частиц. Этот метод служит аналогом рентгеноструктурного анализа, применяемого для исследования кристаллической структуры в объеме вещества.

При дифракции на кристалле электроны малых энергий способны проникать лишь в поверхностные слои, и поэтому дифракция таких электронов на регулярно расположенных атомах предоставляет сведения о структуре поверхности. Это помогает использовать дифракцию медленных электронов как чувствительный метод наблюдения поверхностных структурных превращений.

В последнее время все большую популярность приобретают комбинированные методы исследования поверхности. Например, электронная Оже-спектроскопия образца производится практически одновременно с рассеянием на нем медленных электронов, а также ионов, атомов и рентгеновских лучей. Поэтому вакуумная камера, в которую помещается образец, обычно имеет множество вводов и позволяет использовать сразу несколько зондирующих агентов. Разумеется, такой всеобъемлющий анализ поверхности был бы невозможен без современных методов автоматизации эксперимента.

Фотоэлектронная рентгеновская спектроскопия (ФРС) была разработана в середине 1960-х К. Сигбаном (К. Siegbahn) и его помощниками. Ему была присуждена Нобелевская премия в области физики в 1981 г. за это изобретение. ФРС – это поверхностный чувствительный метод, который требует присутствия среды со сверхвысоким вакуумом. Рентгеновские лучи используются для выбивания электронов атома из внутренней оболочки, и излучаемые электроны анализируются в соответствии с их кинетическими энергиями. В настоящее время метод яв-

ляется наиболее широко распространенным для поверхностного анализа. Он предоставляет информацию об атомном составе поверхности всех элементов, за исключением водорода и гелия. ФРС поэтому является ключевым методом исследований наноструктурированных материалов, в которых наноэффекты связаны с поверхностной активностью.

ФРС – это самый широко распространенный поверхностный чувствительный метод. Он дает информацию об атомной концентрации и химической среде видов на поверхности. Метод очень полезен в нанотехнологии, поскольку уменьшение размеров повышает важность поверхности. Тонкие пленки могут быть исследованы при помощи ФРС с высокой точностью.

Раман-спектроскопия основана на неупругом рассеянии фотонов. В оптическом волокне большая часть фотонов рассеивается упруго, это называется рэлеевским рассеянием. Однако небольшая часть фотонов (приблизительно 1 из 10^7 фотонов) подвергается неупругому рассеянию. Процесс, который ведет к такому неупругому рассеянию, называется эффектом Рамана после того, как он был открыт индийским физиком Раманом (С.V. Raman) в 1928 г. Рассеяние Рамана может произойти с изменением вибрационной энергии молекулы. Другими словами, это может вызвать создание или аннигиляцию фотона. Популяция фотонов в возбужденном состоянии является функцией температуры. Поэтому существует интенсивность сдвига Рамана, которая происходит вследствие разности возникающих и аннигилирующих фотонов. Повторяемость события Рамана происходит приблизительно через 10^{-14} с или меньше.

Поскольку интенсивность Раман-рассеянного света очень низкая, требуется высокомоощный монохроматный источник. Поэтому методика стала широко использоваться после изобретения лазера.

Раман-спектрометр может быть либо дисперсивным, либо недисперсивным. Дисперсивные системы состоят из решетки или призмы для отделения цветов, недисперсивные системы включают интерферометр Майкельсона для этой цели, и это называется Фурье-Раман-спектрометром. Поскольку Раман-феномен зависит от поляризации, поляризаторы являются одним из наиболее полезных элементов, которые используются для блокирования одних сигналов и выделения других.

Фотолюминесцентная спектроскопия – мощный инструмент, который используется для исследования полупроводников, особенно тех, которые применяются для оптоэлектронных устройств. Это простой, гибкий, бесконтактный, неразрушающий метод зондирования электронных структур материалов.

Оборудование для ФЛ состоит из трех основных частей: светового источника для обеспечения возбуждения, дьюара для поддержания низкой температуры образцов во время оптического доступа к поверхности образца и системы обнаружения и регистрации для сбора и анализа фотонов, которые излучаются образцом.

Фотолюминесцентная спектроскопия – широко используемый, не-деструктивный метод исследования полупроводниковых материалов. Благодаря большой площади поверхности по отношению к объемной доле в наночастицах также предлагается способ для лучшего изучения поверхностей наноструктур. Более того, наблюдение фиолетового смещения в положении полос показывает практичность его использования при изучении квантовых ограничений электронов в низкоразмерных системах.

Электролюминесцентная спектроскопия. Ее идея была предложена в 1969 г. Г. Дестриау, обнаружившим люминофоры, такие как сульфид цинка, плакированный медью или марганцем, светящийся при воздействии поля высокого напряжения (обычно 10 кВ/см).

Хотя анализ светового излучения из нанокристаллов или объемной среды в основном проводится на основе фотолюминесцентных экспериментов, большинство светоизлучающих приборов зависят от электролюминесцентных свойств веществ. Электролюминесценция может отличаться от фотолюминесценции процессом электризации. В то время как при исследовании фотолюминесценции создание и рекомбинация диад-электронных вакансий происходит посредством оптического намагничивания вещества, при измерении электролюминесценции электрическая энергия облучает носители. Электролюминесцентная спектроскопия является полезным и важным средством электронного исследования электронных устройств в нанометровом диапазоне. Это позволяет исследователям понять механизмы светоизлучения в приборах, основанных на нанокристаллах.

При измерениях различными методами регистрация параметров нанобъекта, его исследование осуществляется непосредственно сразу после изготовления, причем транспорт объекта из технологической камеры в измерительную осуществляется с помощью специального робота в сверхвысоком вакууме. Это позволяет, например, в течение нескольких часов исследовать свойства поверхности, свободной от газового монослоя.

6.3. Метрологическое обеспечение измерений в нанотехнологиях

Приборы для измерения физических величин в нанометровом диапазоне существуют достаточно давно, метрологическое обеспечение разработано и исследовано недостаточно.

При этом в метрологическом обеспечении нуждаются как сам технологический процесс создания новых наноструктур, так и измерения параметров создаваемых наноустройств, а также измерения характеристик материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами. Особую задачу представляют съем и обработка измерительной информации с устройств столь малых размеров, обеспечение достоверности и метрологической надежности выполняемых при этом измерений.

Однако в области нанотехнологий существует потребность не только в измерительных инструментах и технологиях, но и в калибровочных мерах и обеспечении прослеживаемости (привязки) к эталонам.

Новые характеристики и возможности изделий nanoиндустрии и свойств наноматериалов, создаваемых в результате применения нанотехнологий, предъявляют особые требования не только к применяемым средствам измерений, но и их метрологическому обеспечению. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами измерений и повышенной точностью (например, точность измерения длины должна возрасти в 10–15 раз), что ужесточает требования к уровню обеспечения единства измерений в стране. В первую очередь это относится к точности, диапазонам измерений и функциональным возможностям первичных эталонов и обуславливает необходимость их совершенствования, а также, возможно, и создания новых, исходных эталонов. Решение проблем метрологического обеспечения нанотехнологий не ограничивается совершенствованием эталонов, требуется модернизация существующего и создание более современного, отвечающего новым задачам поверочного оборудования, а также разработка нормативных документов на методы и средства поверки средств измерений, применяемых в nanoиндустрии и других областях использования нанотехнологий, на методики выполнения измерений в связи с развитием нанотехнологий.

Первоочередной задачей в области нанотехнологий является измерение геометрических параметров nanoобъектов, что требует обеспечения единства измерений прежде всего в области линейных измерений в нанометровом диапазоне.

Но вопросы обеспечения единства измерений также важны при измерении и других свойств нанообъектов, таких как механические, оптические, электрические, магнитные, акустические и др.

Обеспечение единства измерений физико-химических параметров и свойств нанообъектов требует привязки к эталону, воспроизводящему единицу данной физической величины, и при этом в области нанотехнологий требуется обязательная привязка к эталону единицы длины.

Для практической нанометрологии большое значение имеет разработка стандартов на методики выполнения измерений параметров нанообъектов и нанопроцессов, методик поверки и разработка контрольных (калибровочных) образцов (мер), позволяющих обеспечить калибровку измерительной аппаратуры, а также разработка и тестирование программного обеспечения при проведении калибровки в нанометрологии (рис. 6.5).

Калибровочные образцы (меры) – важные элементы всех измерительных нанотехнологий. Зарубежные производители применяемой в nanoиндустрии измерительной аппаратуры обеспечивают ее собственными калибровочными образцами (мерами). По этой причине результаты, полученные после калибровки оборудования по разным калибровочным образцам (мерам) могут различаться.

В связи с этим специалисты по нанометрическим измерениям Евросоюза выступили с инициативой сгруппировать многие из имеющихся калибровочных образцов (мер) и провести их исследования.

Таким образом, в области нанотехнологий существует не только потребность в измерительных инструментах и технологиях, но и в устройствах для калибровки применяемого оборудования, в разработке стандартов на методики выполнения измерений и методики поверки.

Актуальность опережающего развития измерительных возможностей подтверждает доклад Национального института стандартов и технологий США (NIST) (2007), содержащий оценку системы измерений США и оценки преград, сдерживающих внедрение инноваций и повышение конкурентоспособности на мировом рынке современных технологий.

Результаты оценки сводятся к следующему:

– основным препятствием на пути инноваций практически во всех сферах экономики, медицины, здравоохранения, обороны, экологии в США является недостаточная точность различных методов и средств измерений;

– практически во всех новых технологиях фактором, сдерживающим их развитие, служит отсутствие точных и чувствительных датчиков различных величин, необходимых для реализации мониторинга процессов и создания систем управления не только новыми технологическими процессами, но и условиями окружающей среды;

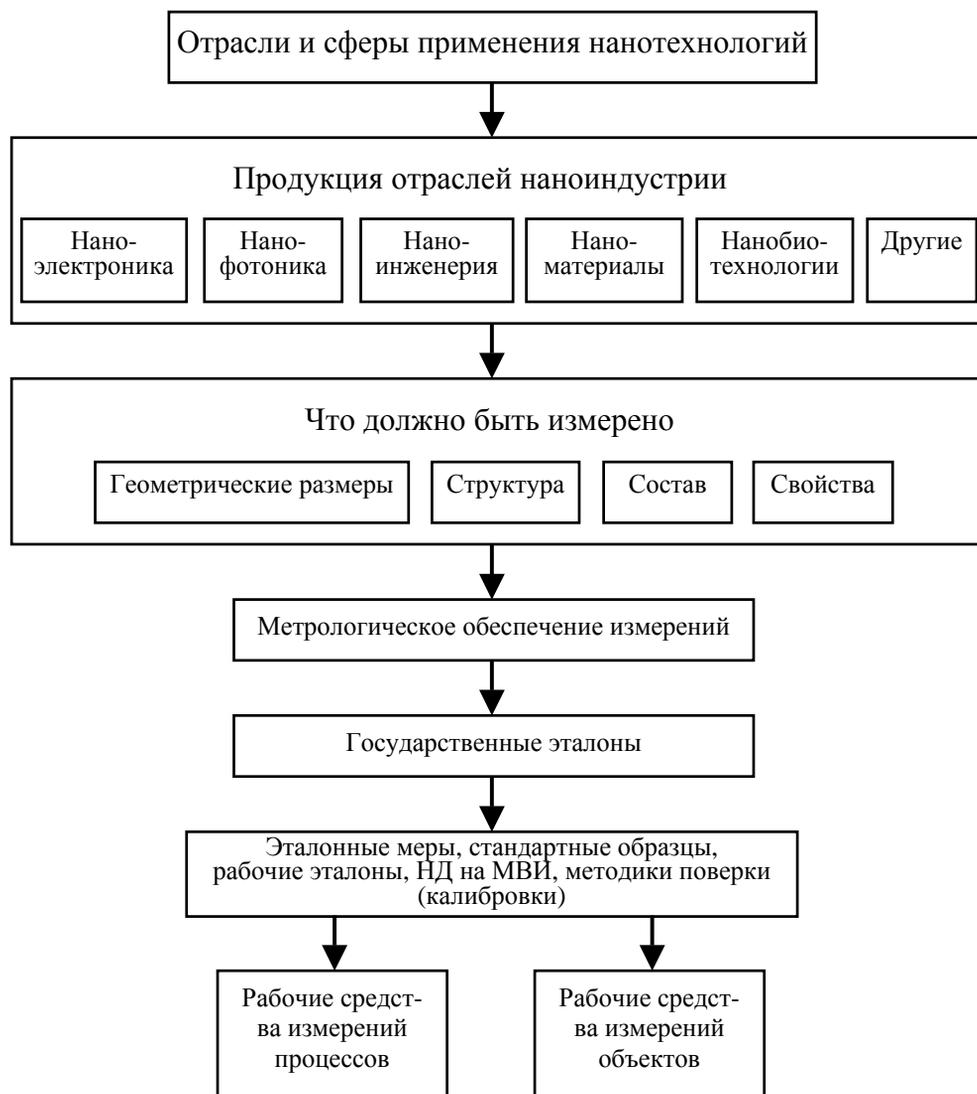


Рис. 6.5. Обеспечение единства измерений в области нанотехнологий

– отсутствие эталонов для оценки качества создаваемых технологий, включая недостаточные совместимость и взаимодействие программного и аппаратного обеспечения устройств управления разрабо-

тываемых технических средств, служит барьером для инноваций во многих развивающихся технологиях.

Сделанные NIST выводы о состоянии и потребности системы измерений в значительной степени справедливы и для европейских стран и России.

Таким образом, единство измерений в нанотехнологиях обеспечивается следующими факторами:

во-первых, это эталоны физических величин и эталонные установки, а также стандартные образцы состава, структуры и свойств для обеспечения передачи размера единиц физических величин в нанодиапазоне;

во-вторых, это аттестованные или стандартизованные методики измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологий, а также методики калибровки (поверки) самих средств измерений, применяемых в нанотехнологиях;

в-третьих, это метрологическое сопровождение самих технологических процессов производства материалов, структур, объектов и иной продукции нанотехнологий.

В настоящее время большое количество национальных и международных организаций вовлечены в процесс стандартизации волоконно-оптических измерений. В США наиболее активной из них является Ассоциация электронной промышленности (EIA), которая впервые опубликовала свои предложения как процедуры волоконно-оптического тестирования (FOTP). Хотя EIA – это американская организация, она существенно повлияла на процесс стандартизации во многих странах мира. Другими группами, участвующими в разработке методов измерений волоконной оптики в США, являются Национальный институт стандартов и технологий (NIST, прежний NBS) и Департамент обороны (DOD), усилия которых совместно с EIA заложили основу международных стандартов, устанавливаемых Международной электротехнической комиссией (IEC).

В России создан определенный научно-технический задел в области метрологического обеспечения нанотехнологий: разрабатываются и поставляются на внутренний и внешний рынки ряд измерительных атомно-силовых микроскопов.

Для калибровки измерительных атомно-силовых (АСМ) и растровых электронных микроскопов (РЭМ), являющихся одними из основных инструментов в нанотехнологиях, разработаны эталоны сравне-

ния – линейные меры, позволяющие существенно повысить точность и достоверность измерения наноперемещений и геометрических параметров наноразмерных объектов. Разработаны соответствующие методики калибровки и поверки АСМ и РЭМ, которые нашли отражение в пяти стандартах. Разрабатываются эталонные спектрорадиометрические комплексы для контроля параметров процессов нанополитографии с использованием синхротронного излучения на накопительном кольце «Сибирь».

Основные проблемы системы обеспечения единства измерений в наноиндустрии:

- не определены приоритетные направления развития нанотехнологий и нанопродукции, что, в свою очередь, не позволяет сформулировать приоритетные измерительные задачи и решить, какие эталоны после их модернизации можно использовать в сфере нанотехнологий, а какие необходимо создавать заново;

- отсутствуют четкие и систематизированные требования к точности и динамическим диапазонам средств измерений в нанометрологии;

- необходимость во многих практических случаях совмещать измерительные и технологические процессы и, как следствие, объединять и измерительное, и технологическое оборудование в единый технологический комплекс;

- высокая стоимость импортного контрольно-измерительного оборудования, ограниченная номенклатура отечественного оборудования и слабая оснащённость лабораторий и технологических участков предприятий и организаций, занятых в сфере нанотехнологий;

- недостаточное количество аттестованных методик выполнения измерений, а также методик поверки, калибровки и испытаний средств измерений, соответствующих международным требованиям в сфере нанотехнологий.

В России уже сделаны определенные шаги в этом направлении. Принята «Стратегия обеспечения единства измерений в России на 2008–2010 годы и до 2015 года». Согласно ей индустрия наносистем и материалов является приоритетной отраслью экономики, и ее метрологическое обеспечение должно носить опережающий характер. Как указано в Стратегии, программой «Эталоны России» в первоочередном порядке запланировано создание новых и совершенствование существующих государственных первичных эталонов в составе эталонных комплексов. Будут усовершенствованы государственные эталоны времени и частоты, единицы дли-

ны, единицы плоского угла, единицы теплопроводности и температурного коэффициента линейного расширения твердых тел (с расширением температурного диапазона измерений от 1800 до 3000 К).

Для линейных измерений в нанометровом диапазоне утверждена программа создания эталонов единицы длины нового поколения в диапазоне $10^{-9} \dots 10^{-4}$ м, выполнение которой позволит:

- обеспечить единство измерений, повысить точность и расширить диапазон линейных измерений в нанометрологии;

- обеспечить современные технологии наноиндустрии методами и средствами прецизионных измерений поверхности твердотельных наноструктур;

- обеспечить новыми мерами малой длины и государственными стандартными образцами состава и свойств поверхности твердых тел на атомном и молекулярном уровнях;

- обеспечить органы государственной метрологической службы исходными эталонами единицы длины нового поколения в области трехмерных измерений параметров наноструктур и нанобъектов.

Совершенствованию подлежат также ряд государственных эталонов единиц ионизирующих излучений, единиц параметров радиочастотного электромагнитного поля, волнового сопротивления в коаксиальных волноводах, комплексной диэлектрической проницаемости.

Будут созданы комплексы физико-химических эталонов в области мониторинга окружающей среды, безопасности пищевых продуктов, лабораторной медицины, нефтегазовых и химических технологий, а также комплекс взаимосвязанных единиц базовых электромагнитных величин на основе реализации квантовых эффектов Холла и Джозефсона и применения квантовых атомных магниторезонансных преобразователей.

6.4. Вопросы для самоконтроля

1. Особенности нанометрологии как науки. Виды образцовых мер в нанометрологии.

2. Характеристики и методы сканирующей туннельной микроскопии.

3. Характеристики и методы контактной сканирующей атомно-силовой микроскопии.

4. Характеристики и методы прерывисто-контактной сканирующей силовой микроскопии.

5. Измерение рельефа поверхности бесконтактным атомно-силовым микроскопом.

6. Многопроходные методики электростатической и магнито-силовой микроскопии.

7. Особенности контактного и бесконтактного режимов работы атомно-силового микроскопа.

8. Методы и возможности спектроскопии: фотоэлектронной рентгеновской, рамановской, фотолюминесцентной, электролюминесцентной.

9. Факторы, обеспечивающие единство измерений в нанотехнологиях.

10. Проблемы системы обеспечения единства измерений в нанотехнологической промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О техническом регулировании: федер. закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ.
2. Об обеспечении единства измерений: федер. закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ.
3. Концепция обеспечения единства измерений, стандартизации, оценки соответствия и безопасности использования нанотехнологий, наноматериалов и продукции nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года.
4. Концепция развития национальной системы стандартизации (принята распоряжением Правительства РФ от 28 февраля 2006 г. № 266 – р).
5. Стратегия обеспечения единства измерений в России на 2008-2010 годы и до 2015 года.
6. О состоянии работ в области обеспечения единства измерений Российской Федерации: доклад в Правительство Российской Федерации по итогам 2007 года.
7. Руководство ИСО/МЭК 2:2004. Стандартизация и смежные виды деятельности. Общий словарь / ISO/IEC 2:2004 Guide Standardization and related activities.
8. ГОСТ Р1.0–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения.
9. ГОСТ Р1.1–2005. Технические комитеты по стандартизации. Порядок создания и деятельности.
10. ГОСТ Р1.10–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Правила стандартизации и рекомендации по стандартизации. Порядок разработки, утверждения изменения, пересмотра и отмены.
11. ГОСТ Р1.11–99. ГСС РФ. Метрологическая экспертиза проектов государственных стандартов.
12. ГОСТ Р1.12–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения.
13. ГОСТ Р1.13–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Уведомления о проектах документов в области стандартизации. Общие требования.
14. ГОСТ Р1.2–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены.

15. ГОСТ Р 1.4–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения.
16. ГОСТ Р 1.5–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.
17. ГОСТ Р 1.6–2005. Стандартизация в Российской Федерации. Проекты стандартов. Организация проведения экспертизы.
18. ГОСТ Р 1.8–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты межгосударственные. Правила проведения в Российской Федерации работ по разработке, применению, обновлению и прекращению применения.
19. ГОСТ Р 1.9–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Знак соответствия национальным стандартам Российской Федерации. Изображение. Порядок применения.
20. ГОСТ Р МЭК 793–1–93. Волокна оптические. Общие технические требования.
21. Р 50.1.044–2003. Рекомендации по разработке технических регламентов.
22. Стандартизация в Российской Федерации. Комплект стандартов. М.: Изд-во стандартов, 2005.
23. Анцыферов С.С., Голубь Б.И. Общая теория измерений / под редакцией Н.Н. Евтихиева. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007.
24. Асташенков А.И., Вишенков А.С. Международные и национальные организации по метрологии на рубеже 21 века. – М.: ВНИИМС, 2000.
25. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика: пер. с англ. – М.: Кудиц-пресс, 2008. – 320 с.
26. Бертолотти М. История лазера. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 336 с.
27. Блинов Ф.П. Добровольное применение и обязательное исполнение требований документов по стандартизации // Стандарты и качество. – 2003. – № 5.
28. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Шкалы, единицы и эталоны // Измерительная техника. – 1992. – № 6.
29. Буденная Ж.Н., Грозовский Г.И., Макушкина С.М. Место и роль технических комитетов по стандартизации // Стандарты и качество. – 2003. – №10.
30. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

31. Волоконно-оптические локальные вычислительные сети / под ред. А.А. Щокина. – М., 1994. – 90 с.
32. Волоконная оптика // Тр. Ин-та общей физики РАН. – Т. 5. – М.: Наука, 1992 – 160 с.
33. Волоконная оптика // Тр. Ин-та общей физики РАН. – Т. 39 / гл. ред. А. М. Прохоров; отв. ред. тома Е. М. Дианов. – М.: Наука, 1993. – 215 с.
34. Гончаренко А. М., Карпенко В. А. Основы теории оптических волноводов. – изд. 2-е, испр. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 240 с.
35. Государственные эталоны России: каталог. – М.: Госстандарт России, 2000.
36. Гуртов В. А. Оптоэлектроника и волоконная оптика. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. – 100 с.
37. Ермаков О. Н. Прикладная оптоэлектроника. – М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
38. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
39. Зимовнова А. Публикация по материалам «круглого стола» – «Техническое регулирование и национальная система стандартизации» // Стандарты и качество. – 2004. – № 6.
40. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус системс, 1999 – 671 с.
41. Исаев Л.К. Российская система измерений // Измерительная техника. – 1993. – № 11.
42. Исаев Л.К., Малинский В.Д. Обеспечение качества: стандартизация, единство измерений, оценка соответствия. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
43. Классен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – М.: Постмаркет, 2000.
44. Ключников В.Н. О приоритетных направлениях стандартизации // Компетентность. – 2005. – № 4.
45. Колесниченко В.И. Обработка и представление результатов эксперимента: учеб.-метод. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2000. – 74 с.
46. Кузнецов В.А., Исаев Л.К., Шайко И.А. Метрология. – М.: Стандартиформ, 2005.
47. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы). – М.: Изд-во стандартов, 1998.

48. Лахов В.М. Метрологическое обеспечение, стандартизация и оценка соответствия нанотехнологии // Компетентность. – 2008. – № 2.
49. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. – М.: ЛЕСАРарт, 2003. – 288 с.
50. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон – М.: ЛЕСАРарт, 2005.– 208 с.
51. Международные документы по законодательной метрологии / под ред. Л.К. Исаева. – М.: ВНИИМС. – 2005.
52. Мышелов Е.П. Введение в метрологию, стандартизацию и сертификацию качества. – М.: КРАСАНД, 2010. – 224 с.
53. Никифоров Н.В. О концепции развития национальной системы стандартизации // Стандарты и качество. – 2006. – № 5.
54. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Нанотехнология и нанометрология // Линейные измерения микрометрового и нанометрового диапазонов в микроэлектронике и нанотехнологии. – М.: Наука. 2006.
55. Облант Ж.М. Метрология: проблема наномасштаба // Мир стандартов. – 2007. – № 5(16).
56. Окрепилов В.В. От точных измерений к управлению качеством // Петербург в зеркале. – 2007.– № 2 (37).
57. Окрепилов В. В. Стандартизация и метрология в нанотехнологиях. – СПб.: Наука, 2008. – 260 с.
58. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. – М.: Высшая школа, 2001.– 573 с.
59. Постек М.Т. Метрология в нанометровом диапазоне // Вестник технического регулирования. – 2007. – № 7.
60. Пугачев СВ., Белобрагин В.Я. Концепция развития национальной системы стандартизации // Стандарты и качество. – 2006. – № 5.
61. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника: пер. с франц. – М.: Техносфера, 2004. – 592 с.
62. Российская метрологическая энциклопедия / гл. ред. Ю.В. Тарбеев. – СПб.: Лики России. – 2001.
63. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987.
64. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учеб. пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 272 с.
65. Соколов С. Нормативное обеспечение методологии стандартизации // Стандарты и качество. – 2005. – № 8.
66. Сорокин Е.П. Особенности национальной стандартизации на современном этапе // Стандарты и качество. – 2003. – № 8.

67. Трейер В.В. Национальная система стандартизации: какой она должна быть? // Стандарты и качество. – 2003. – № 8.

68. Федорин В.Л. Государственный первичный эталон единицы длины. Российская метрологическая энциклопедия. – СПб.: Лики России, 2001.

69. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи, изд. 2-е, доп. – М.: Техносфера, 2004, 496 с.

70. Шишкин Г. Г. Приборы квантовой электроники: учеб. пособие для вузов. – М.: Сайнс-Пресс, 2004. – 80 с.

Ссылки на ресурсы сети Интернет

71. Encyclopedia of Fibre Optics. – URL: http://www.its.blrdoc.gov/fs-1037/dir-025/_3720.htm

72. Введение в технику волоконно-оптических сетей. – URL: <http://www.citforum.ru/nets/optic/optic1.shtml>

73. Оптоволоконная технология. – URL: <http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/page1.html>

74. История оптоволокна. – URL: <http://www.tau.ac.il/~lab3/ OPTICFIBERS/opticfibers.html>

75. Оптическая линия связи. – URL: <http://www.jinr.ru/~jinrmag/win/2000/5/optic5.htm>

Учебное издание

**Цаплин Алексей Иванович
Лихачев Михаил Евгеньевич**

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

Учебное пособие

Редактор и корректор *И.А. Мангасарова*

Подписано в печать 27.12.2011. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 18,4. Тираж 100 экз. Заказ № 252/2011.

Издательство
Пермского государственного технического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.