

УДК 681.7

**МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ
В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

К.В. Дукельский, А.Г. Коробейников, Е.В. Тер-Нерсесянц

Рассмотрены методы уменьшения световых потерь в микроструктурированных световодах на основе минимизации содержания макро- и микропримесей на внутренних и внешних поверхностях собираемых в пакет капилляров. Представлены результаты исследований влияния химической обработки и продувки на качество заготовок.

Ключевые слова: фотонно-кристаллическое оптическое волокно, микроструктурированное оптическое волокно.

Введение

В настоящее время проблемы освоения оптического диапазона связи в значительной степени решены, и дальнейшее развитие оптических систем передачи информации существенно зависит от уровня и состояния технологии производства оптических и оптико-электронных компонентов таких систем. Одним из наиболее значительных достижений оптических технологий последних лет является создание микроструктурированного (МС) оптического волокна. МС-волокно, в том числе и его разновидность – фотонно-кристаллическое оптическое волокно, обладающее свойствами фотонного кристалла, представляет собой волокно со сплошной или полый сердцевиной, окруженной периодической структурой из воздушных отверстий, образующих светоотражающую оболочку. Такие оптические волокна обладают рядом уникальных свойств по сравнению с волокнами, изготавливаемыми по традиционной технологии, когда сердцевина и оболочка изготовлены из сплошных оптических сред. Особенно важно, что МС-волокно может изготавливаться с заданными свойствами в широком диапазоне требуемых оптических или иных физических параметров. В частности, МС-волокно обладает такими дисперсионными характеристиками, которые при достаточно низких уровнях затухания позволяют выполнять эффективные нелинейные преобразования сверхкоротких лазерных импульсов, получать высокие значения числовой апертуры и осуществлять как многомодовый, так и одномодовый режим распространения излучения в аномально широкой области спектра. При этом сохраняются многие преимущества обычного оптоволокна – возможность передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов, высокая помехозащищенность, высокая механическая прочность, радиационная стойкость и устойчивость к агрессивным средам. В России первые работы, направленные на развитие новых оптических технологий на базе микроструктурированных световодов, были опубликованы в 2000 г. [1–3]. В этих работах были получены и МС-волокна, обеспечивающие эффективное уширение спектра сверхкоротких лазерных импульсов и преобразование таких импульсов в излучение с широким непрерывным спектром (излучение суперконтинуума).

Отметим, что количество производителей МС-волокон в мире невелико. Так, американская фирма «Corning» предлагает только одномодовое МС-волокно с полый сердцевиной для эксплуатации в диапазоне на длинах волн 1060, 1300 и 1550 нм. В Европе МС-волокно могут производить четыре научных центра: два – в Великобритании (Исследовательский центр оптоэлектроники университета Великобритании в Саутгемптонне и кафедра физики Университета в г. Баф); третья группа – кафедра оптики Универ-

ситета Валенсии в Испании, а четвертая – ученые исследовательского центра КОМ (коммуникации, оптика, материалы) технического университета Дании («Crystal Fibre»). В России более всего готовы к производству МС-волокон и производят их в соответствии с имеющимися потребностями физические факультеты МГУ, Саратовского ГУ и лаборатория волоконной оптики ФГУП НИТИОМ (Санкт-Петербург).

Основные технологические задачи, возникающие при изготовлении микроструктурированного оптического волокна

Одной из основных технологических проблем, возникающих в процессе изготовления МС-волокон, является проблема создания такой заготовки (преформы), в процессе вытяжки из которой в финишном волокне можно будет получить низкие оптические потери. Существующие на данный момент в России и мире публикации, описывающие в той или иной мере процесс создания МС-волокон, предлагают два варианта создания заготовок для производства такого волокна: сверление отверстий в нужном порядке в цельной кварцевой заготовке или укладывание микрокапилляров и микроштабиков для создания геометрической структуры (рис. 1). Однако нигде не описывается процесс производства и подготовки (очистки) элементов заготовки (капилляров и штабиков), а также влияние различных методов их подготовки на характеристики получаемого из заготовок волокна. Разработка таких методов для решения задачи повышения качества МС-волокон является актуальной проблемой. Результаты исследования этой задачи представлены в статье.

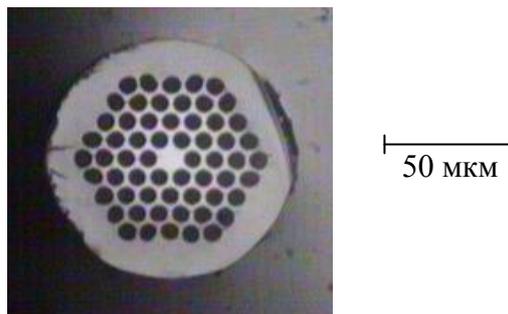


Рис. 1. Микроструктурированное оптическое волокно

Технология получения микроструктурированного кварцевого оптического волокна предполагает решение следующих основных задач:

- создание необходимой геометрической структуры оптоволокна в зависимости от его расчетных оптических характеристик;
- вытягивание световода требуемой длины с сохранением заданной геометрической структуры по всей длине световода;
- минимизация световых потерь при прохождении излучения по световоду.

Решение задачи по минимизации световых потерь начинается уже при выполнении первых двух задач, поэтому в работе рассмотрены вопросы затухания излучения, связанные с качеством сырьевых материалов и чистотой сборок, а также с параметрами процесса вытяжки капилляров.

Существующие образцы МС-волокон отличаются от аналогов, изготовленных из сплошных оптических сред, уникальными дисперсионными свойствами, высокой числовой апертурой и, вследствие отсутствия легирующих элементов, повышенной радиационной стойкостью. Однако по величине параметра затухания излучения МС-волокна уступают существующим оптическим волокнам на основе кварцевого стекла,

полученным по технологии газофазного осаждения. Это обстоятельство несколько ограничивает область применения разрабатываемых типов МС-волокон. Основные факторы, определяющие затухание излучения в волоконных световодах из оптических и кварцевых стекол, были перечислены в [4–5]. В [4] они были разделены на семь групп:

1. поглощение излучения и преобразование его в тепло;
2. релеевское рассеяние излучения, обусловленное материалом волокна;
3. рассеяние излучения вследствие геометрических нерегулярностей по длине световодов;
4. волноводное (модовое) рассеяние из-за дисперсии показателей преломления стекол жилы и оболочки волокон;
5. потери при вводе излучения в волоконные световоды и выводе (приеме) его на выходе волокон;
6. потери, обусловленные нелинейными эффектами в волоконных световодах;
7. затухание излучения в стеклянных волокнах вследствие влияния окружающей среды, условий монтажа и эксплуатации.

При производстве микроструктурированных световодов необходима отработка технологических приемов уменьшения затухания излучения в световоде в основном по группам 1, 2, 3 и 7. На основании анализа способов снижения затухания излучения в МС-волокнах получены данные о влиянии технологических условий, чистоты исходных материалов и специфических для дырчатых волокон процессов вытекания излучения на уровень затухания сигнала в этих световодах. Последовательность операций процесса разработки технологии получения МС-световодов приведена на рис. 2.

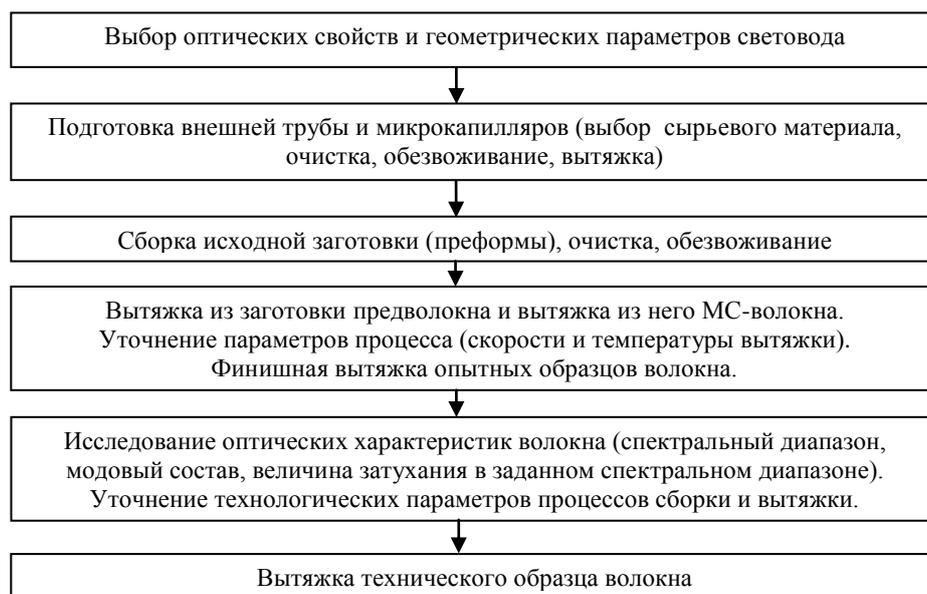


Рис. 2. Последовательность операций процесса разработки технологии получения МС-волокна

Методы очистки и обезвоживание капилляров и преформ

Основы методики изготовления поликапиллярных сборок для получения микроструктурированных световодов различного назначения были заложены в [6–10]. На стадии подготовки первичных заготовок для вытягивания волокна факторами, влияющими на будущее качество полученного световода (т.е. на уровень затухания), являются качество исходных материалов и чистота сборки. Под чистотой сборки понимается то, что по возможности минимизируются содержания макро- и микропримесей на внутренних и внешних поверхностях собираемых в пакет капилляров. Эти параметры

определяют степень поглощения излучения материалом волоконных световодов, которое делится на несколько видов:

- собственное поглощение;
- примесное поглощение, вызываемое ионами гидроксильных групп OH^- и ионами примесных металлов;
- поглощение, обусловленное дефектами структуры стекла;
- поглощение на границе раздела жила–оболочка.

Начальной стадией создания заготовки является изготовление капилляров, качество которых в значительной мере определяет все дальнейшие параметры волокна от заготовки до конечного продукта – МС-световода. При подготовке капилляров для последующей сборки решались одновременно три задачи: выбор кварцевого стекла нужной чистоты, обезвоживание поверхностей капилляров и обеспечение их чистоты. Два последних процесса осуществлялись и в процессе подготовки сборки, и в процессе ее перетяжки (создание предволокна).

На начальных этапах создания МС-волокон, для образования сборки, исходные капилляры для вытягивания световодов получали в лабораториях из опорной кварцевой трубы, изготовленной из природного сырья. Специальные методы очистки капилляров в то время не применялись. Поэтому уровень оптических потерь в первых световодах, служивших нелинейно-оптическими преобразователями излучения фемтосекундных лазеров, составлял в лучшем случае около 0,2 дБ/м в области 800 нм. Такие значения потерь на 2 порядка превышают значения потерь, характерные для кварцевых световодов, полученных методом осаждения диоксида кремния из газовой фазы. Указанные обстоятельства, естественно, сдерживали расширение сферы применения МС-световодов, в частности, в области информационных технологий. Предпринятое нами дальнейшее совершенствование свойств МС-волокон связано с необходимостью снижения потерь излучения до уровня, обеспечивающего практическую целесообразность доставки светового излучения потребителю на расстояния в пределах нескольких десятков метров, обычно характерные для областей использования волоконных световодов, не связанных с передачей информации на дальние расстояния.

На качество получаемого волокна существенно влияет наличие на стенках опорной трубы и капилляров различных примесей, вносимых из внешней среды в процессе сборки заготовки. Была поставлена задача определения влияния степени очистки элементов заготовки на оптические свойства получаемого оптоволокна. Для очистки и обезвоживания поверхностей капилляров и заготовок использовались следующие технологические приемы: (а) химическая очистка (травление); (б) очистка и осушка газами (продувка); (в) высокотемпературная обработка. В качестве базовых служили методы подготовки заготовок для вытяжки обычных оптических волокон.

В процессе работы параллельно устанавливалось влияние различных видов подготовки опорной трубы, капилляров и центрального микроштабика на оптические свойства получаемого оптоволокна. Контрольными образцами служили волокна, вытянутые из сборок, составленных из необработанных капилляров, микроштабиков и опорных труб. Чтобы разделить воздействие волноводных и примесных потерь на результаты измерения оптического затухания в МС-волокне, был применен метод вытягивания капилляра с полным коллапсированием и заключением его в силиконовую оболочку, в результате чего получается так называемый световод «кварц–полимер».

В результате исследований было установлено влияние режима вытяжки исходных структурных элементов – капилляров из особо чистого кварцевого стекла марки КС4В – на оптические потери в световодах типа «кварц–полимер», в которых этот капилляр из стекла КС4В служил световедущей сердцевиной. Зависимость спектров затухания сигнала в 100-метровых отрезках такого оптического волокна от температуры его вы-

тяжки представлена на рис. 3. Измерения проводились методом обрывов, основанном на сравнении мощности оптического излучения, измеренной на длинном отрезке волокна, с мощностью, измеренной на коротком «опорном» отрезке, при этом отрезки должны быть известной длины. Погрешность данного метода составляет около 0,5 дБ/км.

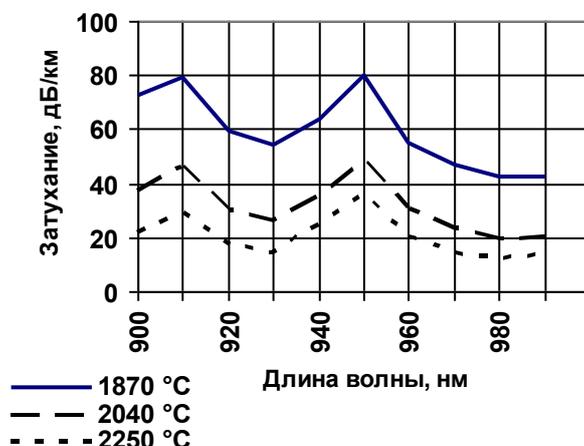


Рис. 3. Зависимость спектров затухания сигнала в волокне от температуры вытяжки

Как видно из рис. 3, увеличение температуры вытяжки сопровождается заметным снижением оптических потерь, что обусловлено, вероятно, воздействием огневой полировки на поверхность капилляра в процессе вытяжки. По-видимому, относительно высокая температура в жаровом пространстве печи способствует выглаживанию поверхности оптического волокна и, как следствие, уменьшению оптических потерь при отражении от границы раздела стекло–полимер.

Исследование влияния химической обработки и продувки элементов сборки для изготовления МС-световодов на качество заготовок проводилось с использованием различных химических реагентов и газов.

Химическая очистка

Образцы изучаемых заготовок исследовались в простом и удобном для изготовления виде. Они состояли из опорной трубы из кварцевого стекла марки КС4В и семи капилляров. Каждая заготовка была разделена на две части, одна из которых являлась контрольной. Контрольная часть каждой такой заготовки вытягивалась при температуре 2080 °C с ее полным коллапсированием в кварц-полимерное волокно диаметром 160 мкм. При измерении потерь этого волокна в разных опытах были получены значения затухания порядка 160–180 дБ/км на длине волны $\lambda = 750$ нм (рис. 4, линия «а»). Вторые части таких заготовок очищались в 40%-ном растворе плавиковой кислоты (HF), в котором они находились 40 мин. После того, как заготовки извлекались из кислоты, они промывались дистиллированной водой, а затем продувались азотом марки ХЧ с целью удаления из сборки оставшейся там влаги. Из такой сборки было вытянуто кварц-полимерное оптическое волокно диаметром 160 мкм при том же температурном и скоростном режиме, что и при вытяжке из неочищенной заготовки. Проведенные измерения потерь давали новое значение затухания – порядка 80–100 дБ/км на длине волны $\lambda = 750$ нм (рис. 4, линия «б»).

Описанный метод очистки на стадии подготовки заготовок позволил впоследствии снизить оптические потери изготавливаемого из этих заготовок оптоволокна примерно в 2 раза.



Рис. 4. Спектр затухания излучения в кварц-полимерном волокне из контрольной части сборки (а) и после дополнительной очистки и продувки азотом (б)

Продувка

Собирались образцы заготовок, состоящие, как и описанные выше, из опорной трубы из кварцевого стекла марки КС4В и семи капилляров. Исходные заготовки разделялись на три части – контрольную и две другие, подвергавшиеся обработке. Контрольная часть заготовок была вытянута при температуре 2080°С с их полным коллапсированием в кварц-полимерное волокно диаметром 160 мкм. При измерении потерь в контрольном волокне обычно получали значения затухания около 160–180 дБ/км на длине волны $\lambda = 750$ нм и около 230 дБ/км на $\lambda = 770$ нм. В дальнейшем вторая часть таких заготовок обрабатывалась описанным выше способом химической очистки. Третья часть сборки подвергалась дополнительной очистке, для чего заготовка, находящаяся в аргоновой печи при температуре около 1000°С, продувалась изнутри кислородом в течение 40 мин. После перетяжки такого рода сборок в волокно при тех же условиях, что и в предыдущем случае, при исследовании такого волокна было получено значение затухания порядка 23 дБ/км на длине волны $\lambda = 770$ нм.

Таким образом, применение указанного дополнительного метода очистки заготовки позволяет, в конечном итоге, примерно на порядок улучшить показатели затухания сигнала в получаемом волокне.

Заключение

Авторами разработана технология, позволяющая создавать заранее заданные типы микроструктурированных и иных волокон с уменьшенным уровнем затухания излучения в световоде. Получены зависимости спектров затухания сигнала в кварц-полимерном волокне от температуры его вытяжки из капилляра, что свидетельствует о значительности влияния огневой полировки на подготовку капилляров для создания МС-световодов. Показано, что применение дополнительного метода очистки заготовки позволяет, в конечном итоге, примерно на порядок улучшить показатели затухания сигнала в получаемом волокне.

Литература

1. Алфимов М.В., Желтиков А.М., Иванов А.А., Белоглазов В.И., Кириллов Б.А., Магницкий С.А., Тарасишин А.В., Федотов А.Б., Мельников Л.А., Скибина Л.Б. // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 71. – С. 714.
2. Федотов А.Б., Желтиков А.М., Мельников Л.А., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д. // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 71. – С. 407.
3. Желтиков А.М. «Дырчатые» волноводы // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – № 11. – С. 1203–1215.
4. Саттаров Д.К., Сафиуллина С.С., Печерская К.П. Затухание излучения в волоконных световодах // Волоконно-оптические линии связи. – М., 1977. – Вып. 2. Волоконные световоды для волоконно-оптических линий связи. – Часть 4. – Книга 1. – С. 7–53.
5. Коробейников А.Г., Дукельский К.В., Ткалич В.Л. Тепловые потери в оптическом волокне // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 12. – С. 46–50.
6. Дукельский К.В., Кондратьев Ю.Н., Петровский Г.Т., Хохлов А.В., Шевандин В.С., Желтиков А.М., Смирнов В.Б., Шамко А.А. Реализация кристалл-фотонного волоконного световода и генерация в нем широкополосного лазерного излучения // Оптический журнал. – 2003. – Т. 70. – № 8. – С. 101–103.
7. Akimov D.A., Schmitt M., Maksimenka R., Dukel'skii K.V., Kondrat'ev Y.N., Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Kiefer W., Zheltikov A.M. Supercontinuum generation in a multiple-submicron-core microstructure fiber: toward limiting waveguide enhancement of nonlinear-optical processes // Appl. Phys. B. – 2003. – V. 77. – P. 299–305.
8. Желтиков А.М., Пин Чжу, Темнов В.В., Кондратьев Ю.Н., Багаев С.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Хохлов А.В., Смирнов В.Б., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д. Локализация света и спектральное уширение фемтосекундных лазерных импульсов в волокне с минимально структурированной оболочкой // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 6. – С. 542–544.
9. Федотов А.Б., Пин Чжу, Кондратьев Ю.Н., Багаев С.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Хохлов А.В., Смирнов В.Б., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д., Желтиков А.М. Пространственная спектральная фильтрация излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированных волокнах // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 6. – С. 828–832.
10. Дукельский К.В., Кондратьев Ю.Н., Хохлов А.В., Шевандин В.С., Желтиков А.М., Коноров С.О., Серебрянников Е.Е., Сидоров-Бирюков Д.А., Федотов А.Б., Семенов С.Л. Микроструктурированные световоды с кварцевой сердцевиной для получения спектрального суперконтинуума в фемтосекундном диапазоне // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72. – № 7. – С. 57–59.

- Дукельский Константин Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, KDukel@GOI.ru
- Коробейников Анатолий Григорьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Тер-Нерсесянц Егише Вавикович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, volokno@goi.ru