

МИНИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В АНИЗОТРОПНЫХ ОДНОМОДОВЫХ СВЕТОВОДАХ С ЭЛЛИПТИЧНОЙ БОРОГЕРМАНОСИЛИКАТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

© 2012 г. С. В. Буреев*, аспирант; И. К. Мешковский*, доктор техн. наук; Е. Ю. Уткин*, студент; К. В. Дукельский**, канд. техн. наук; М. А. Ероньян**, доктор техн. наук; А. В. Комаров**, Е. И. Ромашова**, М. М. Серков**, канд. техн. наук; М. А. Бисярин***, доктор физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНИИ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

*** Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

E-mail: eronyan@mail.ru

Исследована зависимость затухания на длине волны 1,55 мкм от различных факторов для анизотропных одномодовых световодов с борогерманосиликатной эллиптической оболочкой. Показано существенное влияние показателя преломления этой оболочки в заготовке на оптические потери световодов. Оптимизирована толщина оболочки, изолирующей сердцевину от борсодержащего стекла эллиптической оболочки. Снижены оптические потери на рэлеевское рассеяние за счет легирования сердцевины малыми добавками влаги. Для световода с диаметром стекловолокна 125 мкм в двухслойном полимерном покрытии достигнут уровень оптических потерь, равный 0,5 дБ/км, при степени сохранения поляризации $5 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}$.

Ключевые слова: анизотропный одномодовый световод, эллиптическая оболочка, оптические потери, излучение, сохранение поляризации.

Коды OCIS: 060.2420

Поступила в редакцию 18.11.2011

Введение

Анизотропные одномодовые кварцевые волоконные световоды (ВС), сохраняющие поляризацию излучения, с эллиптической напрягающей оболочкой выгодно отличаются от аналогичных оптических волокон типа “PANDA” низкой стоимостью, что определяется снижением материальных затрат и простотой технологии изготовления заготовок [1]. Однако по затуханию ВС первого типа уступают световодам “PANDA”. Повышение точности интерферометрических волоконно-оптических датчиков достигается увеличением длины волоконного контура, что, в свою очередь, определяет необходимость снижения оптических потерь световодов.

Для изотропных одномодовых ВС, изготовленных на основе кварцевого стекла, наименьшие оптические потери, равные 0,2 дБ/км, достигнуты на длине волны 1,55 мкм [2]. До-

минирующим фактором затухания в них света (0,18 дБ/км) является рэлеевское рассеяние.

В этой области спектра борсодержащая эллиптическая оболочка анизотропных одномодовых ВС является источником дополнительных оптических потерь, снижение которых определяет необходимость формирования фторфосфоросиликатной оболочки, изолирующей сердцевину от борсодержащего стекла [3].

Основной проблемой в технологии таких ВС является выравнивание показателя преломления (ПП) борогерманосиликатной напрягающей оболочки с ПП наружной оболочки из чистого кварцевого стекла. С этой целью в нее вводят дополнительное количество GeO_2 , увеличивая ее показатель преломления в заготовке по сравнению с наружной оболочкой [4]. При вытягивании волокна в этой оболочке происходят структурные преобразования, приводящие к снижению ее показателя преломления. Однако полностью скомпенсировать ПП

в волокне довольно сложно, поэтому в ВС возникают депрессированные оболочки.

Наличие нескольких оболочечных слоев с различными ПП способно сильно изменить характеристики распространяющегося света. Процесс распространения в оптическом волокне с двумя оболочками, из которых внутренняя имеет ПП меньший, чем у сердцевины и у внешней оболочки, исследовался в работе [5]. В работе [6] аналитически и численно изучена зависимость оптических потерь на излучение от соотношения радиусов внешней и внутренней оболочек и ПП в них. Методика расчета [7] световода, сердцевина и внутренняя оболочка которого в поперечном сечении являются соосными эллипсами, а внешняя оболочка предполагается бесконечной, позволила определить параметры двух основных ортогонально-поляризованных мод. Изучаемое в настоящей работе волокно содержит оболочки круглой и эллиптической формы. Характеристические уравнения для такой структуры приобретают весьма сложный вид, и следствием этого является существенное усложнение методики расчета оптических потерь в зависимости от параметров изолирующей и напрягающей оболочек.

Поэтому цель работы заключалась в минимизации оптических потерь на длине волны 1,55 мкм на основе проведения экспериментальных исследований анизотропных одномодовых кварцевых ВС с эллиптической напрягающей борогермано-силикатной оболочкой.

Методы изготовления и исследования световодов

Для исследования влияния технологических параметров на оптические потери анизотропных одномодовых ВС изготовлена серия экспериментальных образцов оптических волокон, отличающихся ПП эллиптической оболочки, диаметром изолирующей оболочки и содержанием ОН-групп. Заготовки для таких световодов изготавливали модифицированным методом химического парового осаждения (*modified chemical vapour deposition* – MCVD) [4]. На внутреннюю поверхность метровой кварцевой трубы с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 2 мм последовательно наносились слои буферной, напрягающей и изолирующей оболочек, а также слой сердцевины. Буферная и изолирующая оболочки легированы 1,5 моль % P_2O_5 и дополнительно фтором

для компенсации изменения ПП, связанного с введением фосфора. Напрягающая оболочка легирована 17–18 моль % B_2O_3 и дополнительно GeO_2 для повышения ее ПП в заготовке на 0,004–0,009 по сравнению с кварцевым стеклом наружной оболочки. Сердцевина содержала около 6 моль % GeO_2 и 0,5 моль % фтора. Перед осаждением слоев изолирующей оболочки осуществлялось высокотемпературное сжатие трубки, в процессе которого диаметр внутреннего канала уменьшался в два раза. Такая операция приводила к снижению глубины диффузионного проникновения бора в изолирующую оболочку.

В работе использовались особо чистые легколетучие жидкие реагенты ($SiCl_4$, $POCl_3$, $GeCl_4$, BBr_3) и газообразный фреон-12 (CF_2Cl_2). Хлориды транспортировались в реакционную зону регулируемым потоком кислорода. Для бромида бора в качестве газа-носителя использовался аргон высокой чистоты. Количество примесной влаги в кислороде не превышало 10^{-5} об %, водородсодержащие примеси удалялись из него каталитическим дожиганием с последующей сушкой на молекулярном сите. В ряде экспериментов с целью определения влияния технологической влаги на оптические потери световодов каталитическое дожигание водородсодержащих примесей не проводилось.

Окончательное сжатие трубки с заплавлением внутреннего канала осуществлялось при температуре 2100–2150 °С и скорости перемещения горелки не более 7 мм/мин.

После абразивного нарезания канавок с двух диаметрально противоположных сторон предзаготовки ее подвергали высокотемпературному круглению, в результате чего низковязкие, напрягающая и буферная, оболочки становились эллиптическими, а высоковязкие, изолирующая оболочка и сердцевина, не деформировались (рис. 1). Эллипτικότητα напрягающей оболочки изготовленной таким образом заготовки находилась в диапазоне 0,57–0,62.

Световоды с диаметром стекловолокна 125 мкм вытягивали при температуре 2100 °С. Защитное покрытие было двухслойным, состоящим из мягкого и полужесткого эпоксикарилата. Общая толщина полимерного покрытия находилась в пределах 62–70 мкм. В процессе вытягивания световоды наматывались на катушку с диаметром 170 мм при натяжении не более 20 г.

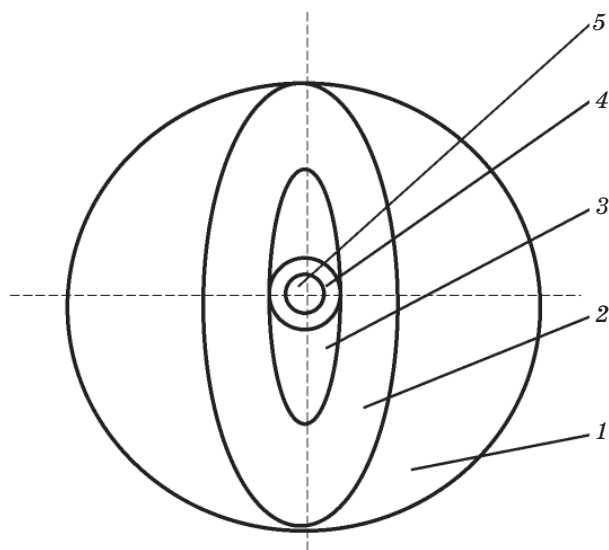


Рис. 1. Структура поперечного сечения заготовки. 1 – наружная оболочка из кварцевого стекла, 2 – буферная оболочка, 3 – эллиптическая напрягающая оболочка, 4 – изолирующая оболочка, 5 – сердцевина.

Профиль ПП незаготовок до операции нарезания канавок измерялся анализатором преформ марки P 101 фирмы “York Technology”.

Измерение оптических потерь ВС проводилось методом обрыва согласно международному стандарту ITU-T G.651, EIA/TIA и ГОСТ 26814-86. Константа рэлеевского рассеяния и спектрально независимые “серые” потери определялись по методике [8], основанной на спектральной зависимости оптических потерь от $1/\lambda^4$ в двухмодовом режиме ВС. Ослабление света из-за излучения в оболочку ($\alpha_{\text{и}}$) вычислялось на основании линейной зависимости логарифма оптических потерь от длины волны [9] за вычетом компоненты рэлеевского рассеяния и “серых” потерь.

Измерения h -параметра осуществлялось согласно международному стандарту FOTP-192.

Изготовленные анизотропные одномодовые ВС имели длину волны отсечки первой высшей моды в пределах 1,3–1,45 мкм. Разность ПП сердцевин и изолирующей оболочки $\Delta n \approx 0,006–0,007$. Соотношение диаметров изолирующей оболочки и сердцевин $\gamma \approx 2,7$. В отдельной серии экспериментов этот параметр варьировался от 2 до 2,8. При вытягивании световода ПП напрягающей оболочки уменьшается, что является отличительной особенностью для борсодержащего кварцевого стекла [10].

Экспериментальные результаты представлены на рисунках точками, размер которых соответствует точности измерений, а линии аппроксимируют полученные зависимости.

Результаты исследований

Для минимизации оптического поглощения фонами борсодержащей напрягающей оболочки одномодовых ВС необходимо оптимизировать толщину изолирующей оболочки. Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, зависимости оптических потерь на длине волны 1,55 мкм от соотношения диаметров изолирующей оболочки и сердцевин (рис. 2) свидетельствуют о существенном влиянии материала эллиптической оболочки на затухание. При $\gamma \geq 2,7$ это влияние полностью устраняется, и оптические потери стабилизируются на уровне 0,5 дБ/км, что определяется рэлеевским рассеянием, потерями на поглощение фонами, излучением и “серыми” оптическими потерями.

Коэффициент рэлеевского рассеяния (КРР) сердцевин, легированной 6 моль % GeO_2 и 0,5 моль % фтора, в соответствии с результатами работы [11] равен ориентировочно 1,2 дБ мкм⁴/км. Поэтому оптические потери на рэлеевское рассеяние в данном случае составят около 0,27 дБ/км. Поглощение фонами германосиликатного стекла, рассчитанное по формуле, представленной в работе [2], равно 0,02 дБ/км. Отсюда “серые” потери и потери на излучение в рассматриваемых световодах при $\gamma \geq 2,7$ составляют всего 0,2 дБ/км, что обеспечено хорошей компенсацией ПП напрягающей оболочки.

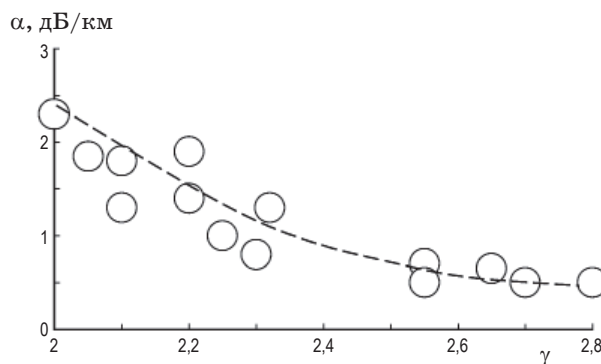


Рис. 2. Влияние соотношения диаметров изолирующей оболочки и сердцевин на оптические потери (α).

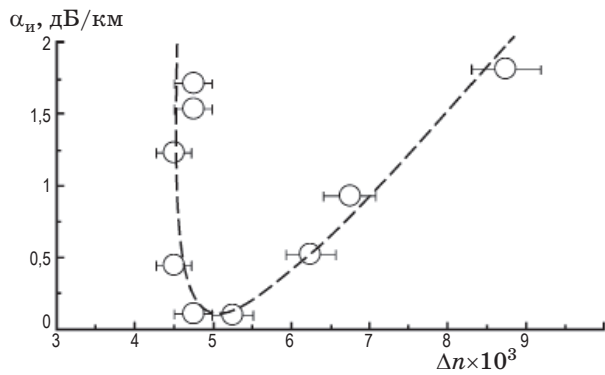


Рис. 3. Влияние Δn напрягающей оболочки в заготовке на оптические потери ВС за счет излучения (α_n).

Однако изменение состава этой оболочки при $\gamma \approx 2,7$ существенно влияет на излучательную компоненту оптических потерь (α_n) на длине волны 1,55 мкм, особенно когда разница ПП напрягающей оболочки и ПП кварцевого стекла (Δn) в заготовке имеет нижний предел (рис. 3). В этом случае напрягающая оболочка в ВС становится депрессированной.

Минимальные оптические потери наблюдаются при скачке ПП напрягающей оболочки в заготовке, равном 0,005, когда в световоде ПП всех оболочек находится на одном уровне. Однако изменение температуры вытягивания световода нарушает компенсацию ПП в его оболочках: с увеличением температуры нагрева заготовки ПП напрягающей оболочки падает. Поэтому вытягивание волокна должно проводиться при строго определенной температуре.

Внедрение влаги в сердцевину в процессе коллапсирования заготовки приводит к повышению пика поглощения ОН-группами на длине волны 1,38 мкм. Однако эксперименты, поставленные в настоящей работе, показали, что при ограниченном введении влаги в ВС длинноволновый край этой полосы поглощения не повышает оптические потери на длине волны 1,55 мкм, в то время как рэлеевское рассеяние снижается. Зависимость КРР от интенсивности поглощения ОН-группами на длине волны 1,25 мкм (рис. 4) свидетельствует о положительном влиянии влаги на оптические потери ВС.

Обсуждение результатов

Представленные результаты исследований по минимизации оптических потерь анизотропных одномодовых световодов с борогер-

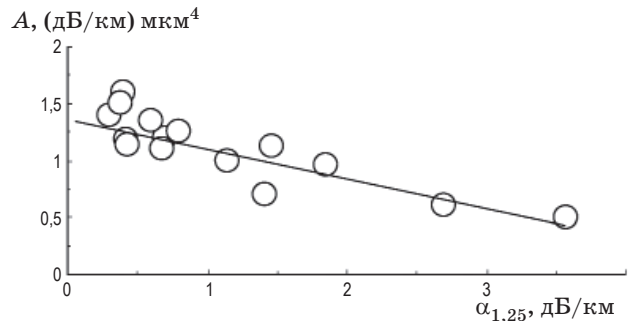


Рис. 4. Влияние содержания ОН-групп в световоде на КРР (A).

маносиликатной напрягающей оболочкой свидетельствуют о необходимости изоляции сердцевины оболочкой, диаметр которой должен превышать диаметр сердцевины не менее чем в 2,7 раза. Толщина изолирующей оболочки определяется двумя обстоятельствами: с одной стороны, глубиной проникновения в нее излучения, а с другой стороны – диффузией бора из напрягающей оболочки. Первый фактор определяется длиной волны отсечки высшей моды. Глубина же диффузионного проникновения бора в изолирующую оболочку световода зависит от ее толщины в заготовке до процесса высокотемпературного сжатия, в течение которого происходят основные процессы диффузионной миграции бора. Поэтому использованное в работе предварительное высокотемпературное сжатие заготовки до осаждения слоев изолирующей оболочки позволило снизить отношение диаметров изолирующей оболочки к сердцевине γ до 2,7. Без такой операции γ должно быть существенно больше. Так, в работе [3] для полного устранения влияния бора на оптические потери рекомендовано соотношение диаметров изолирующей оболочки и сердцевины, равное 3,91.

В анизотропных световодах с эллиптической напрягающей оболочкой желательно уменьшение диаметра изолирующей оболочки с тем, чтобы обеспечить эллиптичность борогерманосиликатной оболочки на уровне 0,6. Поэтому при $\gamma = 2,7$ оказалось возможным изготовление световодов с параметром $h \leq 5 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}$.

Обнаруженное в работе снижение КРР германосиликатного стекла с введением влаги в сердцевину световода нельзя объяснить сни-

жением вязкости стекла, как в случае с легированием кварцевого стекла малыми добавками щелочных металлов [12]. Природа этого явления скорее связана со спецификой излучательных свойств германосиликатного стекла в спектральной области прозрачности кварцевой оболочки. С увеличением содержания влаги интенсивность излучения сердцевинки уменьшается, что приводит к снижению скорости остывания и закалки германосиликатного стекла при более низкой фиктивной температуре.

Заключение

В результате проведенных исследований определены технологические параметры изготовления анизотропных одномодовых световодов с эллиптической борогерманосиликатной оболочкой в двухслойном полимерном покрытии и диаметром стекловолокна 125 мкм, обладающих на длине волны 1,55 мкм оптическими потерями на уровне 0,5 дБ/км и степенью сохранения поляризации излучения $5 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}$.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Ероньян М.А. Способ изготовления волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения // Патент России № 2155359. 2000.
2. Miya V., Terunuma Y., Hosaka T., Miyashita T. Ultra low loss single-mode fibers at 1,55 μm // Electron. Lett. 1979. V. 15. P. 106–108.
3. Арутюнян З.Э., Грудинин А.Б., Гурьянов А.Н., Гусовский Д.Д., Дианов Е.М., Игнатъев С.В., Смирнов О.Б. Анизотропные световоды с эллиптической напрягающей оболочкой и круглой сердцевинкой // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 10. С. 1363–1368.
4. Ероньян М.А., Комаров А.В., Кондратьев Ю.Н., Ромашова Е.И., Серков М.М., Хохлов А.В. Тонкие анизотропные одномодовые волоконные световоды с эллиптической напрягающей оболочкой // Оптический журнал. 2000. Т. 57. № 10. С. 104–105.
5. Kawakami S., Nishida S. Characteristics of a doubly clad optical fiber with a low-index inner cladding // IEEE J. Quantum Electron. 1974. V. QE-10. № 12. P. 879–887.
6. Cohen L.G., Marcuse D., Mammel W.L. Radiating leaky-mode losses in single-mode lightguides with depressed-index claddings // J. Quantum Electron. 1982. V. QE 18. № 10. P. 1467–1472.
7. Беланов А.С., Дианов Е.М., Кривенков В.И. Дисперсионные характеристики трехслойных эллиптических световодов // Труды ИОФАН. Т. 5. Волоконная оптика. М.: Наука, 1987. С. 3–18.
8. Inada K. A new graphical method relating to optical fiber attenuation // Opt. Commun. 1976. V. 19. P. 437–439.
9. Аксенов В.А., Белов А.В., Воробьев И.Л., Иванов Г.А. Оптимизация параметров одномодовых волоконных световодов с кварцевой сердцевинкой и фторсиликатной оболочкой / Труды LVII научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова. 2002. Т. 1. С. 30–35.
10. Wemple S.H., Pinnow D.A., Rich T.C., Jaeger R.E., Van Uitert L.G. Binary $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ glass system: Refractive index behavior and energy gap considerations // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. № 12. P. 5432–5437.
11. Tsujikawa K., Ohashi M., Shiraki K., Tateda M. Scattering property of F and GeO_2 codoped silica glasses // Electron. Lett. 1994. V. 30. № 4. P. 351–352.
12. Lines M.E. Can the minimum attenuation of fused silica be significantly reduced by small compositional variations? // J. Non-Crystal. Solids. 1994. V. 171. P. 209–218.