

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ**Квазиодномодовый гибридный световод с аномальной дисперсией в спектральной области около 1 мкм****С.С.Алешкина, М.В.Яшков, А.К.Сенаторов, Л.Д.Исхакова,
М.М.Бубнов, А.Н.Гурьянов, М.Е.Лихачев**

Предложен и реализован метод получения квазиодномодового режима работы в цилиндрически симметричном гибридном световоде с аномальной дисперсией в области длин волн около 1 мкм. Использованный метод основан на различиях в пространственных распределениях мод световода и на создании кольцевого слоя с высокими потерями, расположенного в области минимума электрического поля рабочей гибридной моды.

Ключевые слова: волоконный световод, гибридный световод, одномодовость, компенсация дисперсии, световод со смещенным нулем дисперсии, селективное подавление мод световода.

1. Введение

Отсутствие коммерчески доступных волоконных световодов с аномальной дисперсией в области длин волн около 1 мкм является одним из основных факторов, ограничивающих возможность создания в этой спектральной области полностью волоконных лазеров с длительностью импульса менее 1 пс. Компенсация дисперсии в области 1 мкм, как правило, обеспечивается за счет использования объемных элементов (решеток, призм), однако подобный подход существенно снижает надежность таких лазеров.

Для решения указанной проблемы к настоящему времени предложен ряд конструкций специальных волоконных световодов, в которых возможно достижение аномальной дисперсии в области 1 мкм: это микроструктурированные световоды [1–3], световоды с воздушной сердцевиной [4, 5], а также маломодовые световоды, в которых при помощи длиннопериодной решетки возбуждается одна из мод высшего порядка [6, 7]. Использование световодов указанных типов вызывает определенные трудности. В частности, микроструктурированные световоды имеют высокую нелинейность (размер сердцевины, необходимый для достижения аномальной дисперсии, как правило, не превышает 3 мкм). Световоды с воздушной сердцевиной работают в маломодовом режиме, и основная сложность работы с ними заключается в необходимости выборочного возбуждения рабочей моды (требуется юстировка подводящего излучения и согласование размера поля моды). Более того, сварка таких световодов с подводящими световодами затруднительна либо требует специального оборудования, т.к. отверстия, образующие структуру световода с воздушной сердцевиной, при нагреве консолидируются. В маломодовых световодах, предложенных в [6, 7], возбуждение рабочей моды требует использования длиннопериодных решеток,

подбор параметров и запись которых представляет собой отдельную сложную техническую задачу. Кроме того, при использовании данного подхода практически невозможно гарантировать, что фундаментальная мода будет полностью конвертирована в рабочую высшую моду и обратно. Как следствие, небольшая доля мощности может распространяться в фундаментальной моде и после прохождения длиннопериодной решетки. В результате в световоде будет генерироваться второй импульс с меньшей интенсивностью и с другой, чем у основного импульса, скоростью распространения.

Ранее нами был предложен новый тип волоконных световодов, так называемых гибридных, с аномальной дисперсией в области длин волн около 1 мкм [8]. Рабочая мода такого световода формируется за счет механизма когерентного френелевского отражения от одного или нескольких кольцевых слоев, оптически более плотных относительно показателя преломления сердцевины (аналогично случаю брэгговского световода [9]). Отличительной особенностью гибридного световода по сравнению с брэгговскими является то, что его сердцевина имеет больший показатель преломления, чем у нелегированного кварцевого стекла. Таким образом, за счет механизма полного внутреннего отражения рабочая мода имеет нулевые потери на вытекание. Другими словами, потери на распространение этой моды определяются лишь фундаментальными механизмами, характерными для структур со ступенчатым профилем показателя преломления [8]. В итоге формирование и распространение рабочей моды гибридного световода осуществляется двумя независимыми механизмами, вследствие чего рабочую моду световода будем называть гибридной. Несмотря на то что формально такие световоды не являются одномодовыми, непосредственно в сердцевине локализована лишь гибридная мода, а максимумы интенсивности остальных мод световода смещены в область оптически более плотных кольцевых слоев.

Сварка гибридного световода со стандартным одномодовым световодом приводит к преимущественному возбуждению именно гибридной моды, локализованной в сердцевине. Важным свойством предложенной структуры является также то, что гибридная мода может иметь аномальную дисперсию в области длин волн около 1 мкм

С.С.Алешкина, А.К.Сенаторов, Л.Д.Исхакова, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sv_alesh@fo.gpi.ru

М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: yashkovmv@yandex.ru

Поступила в редакцию 10 мая 2016 г.

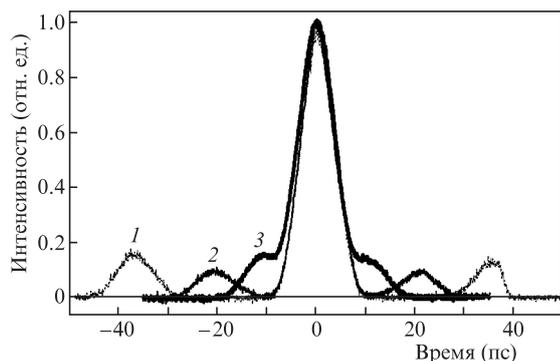


Рис.1. Длительности импульсов, полученные по автокорреляционным функциям и зарегистрированные на выходе цилиндрически симметричного гибридного световода длиной 3 (1), 1.5 (2) и 0.7 м (3) при использовании его в качестве компрессора chirпированных импульсов.

[8, 10]. Использование такого гибридного световода позволило нам продемонстрировать в области 1 мкм [8] сжатие chirпированных импульсов длительностью 8 пс до длительности около 330 фс. Тем не менее частичное возбуждение мод, локализованных в окружающих сердцевину кольцевых слоях (их мощность оставляет 10%–20% от общей мощности) не позволило нам реализовать одноимпульсный режим генерации лазера. Автокорреляционные кривые, как правило, имели несколько пиков разной интенсивности, что указывало на существование в сердцевине двух и более мод, распространяющихся с разной групповой скоростью. На рис. 1 приведены зависимости регистрируемых длительностей импульса от длины гибридного световода.

В настоящей работе предложена и реализована методика достижения квазиодномодового режима работы гибридного световода. Работоспособность метода продемонстрирована на примере структуры гибридного световода с двумя оптически более плотными кольцевыми слоями, которая позволяет достигать уровня аномальной дисперсии в области длин волн около 1 мкм вплоть до $100 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$.

2. Метод подавления нежелательных мод гибридного световода и конструкция световода

Для подавления нежелательных мод гибридного световода мы используем различия в пространственных распределениях электрического поля разных мод по сечению световода. На рис. 2, а приведен модельный профиль показателя преломления гибридного световода с дисперсией на длине волны 1.06 мкм около $100 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ (рис. 2, б). На рис. 2, а приведены также радиальные распределения интенсивности электрического поля гибридной моды LP_{03} и двух других мод, максимумы поля которых попадают в оптически плотные слои. Видно, что интенсивность моды LP_{03} имеет два минимума, один из которых расположен в области сердцевины световода (на границе с высоколегированным германосиликатным слоем), а второй – между высоколегированными германосиликатными слоями. Основная идея предлагаемого нами подхода заключается в том, чтобы внести в один из минимумов интенсивности электрического поля гибридной моды слой с избыточными потерями. В этом случае уве-

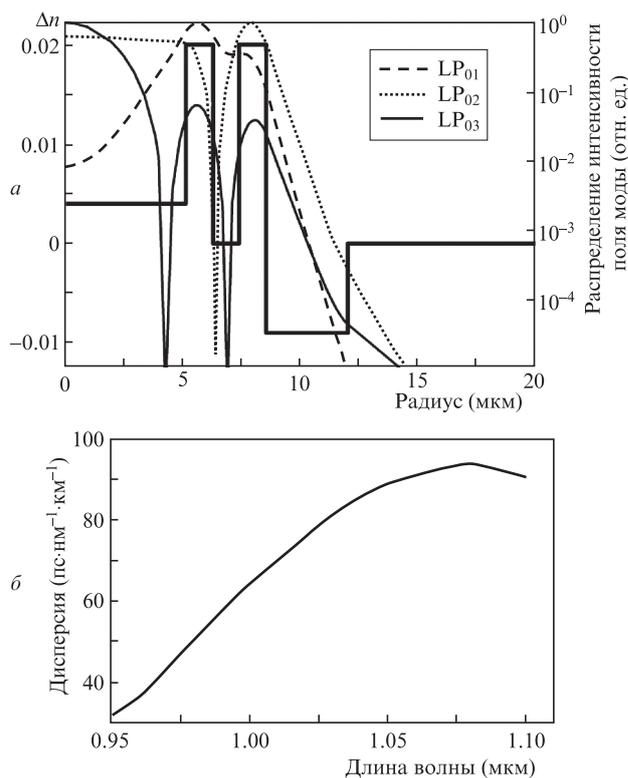


Рис.2. Модельный профиль показателя преломления гибридного световода, а также рассчитанное распределение интенсивности поля гибридной моды LP_{03} и нескольких мод кольцевых слоев (а) и расчетная дисперсионная кривая моды LP_{03} для модельного профиля показателя преломления (б).

личение оптических потерь гибридной моды будет минимальным, тогда как оптические потери остальных (нежелательных) мод резко возрастут, поскольку доля их мощности в области поглощающего слоя существенно больше, чем для рабочей гибридной моды.

Наши расчеты показали, что пространственная локализация минимума поля моды, расположенного между высоколегированными германосиликатными слоями, менее чувствительна к изгибу и смещению рабочей длины волны по сравнению с минимумом, принадлежащим области сердцевины (рис. 3, а). Как следствие, для обеспечения максимального рабочего спектрального диапазона гибридной моды и одновременного подавления нежелательных мод световода кольцевой слой с избыточными потерями должен находиться именно между слоями с высоким показателем преломления.

Для достижения предельно низких потерь на распространение гибридной моды и одновременно максимально высоких потерь для остальных мод в структуру необходимо ввести как можно более узкий слой с максимально высоким уровнем вносимых потерь. Задача получения высоких оптических потерь в тонком кольцевом слое сама по себе не является тривиальной. Для ее решения можно использовать два кардинально разных подхода: в заданной области необходимо создать или избыточное рассеяние или избыточное поглощение. Отметим, что для обеспечения избыточного рассеяния требуется фактическое разделение стекла на фазы. Этот вариант является достаточно перспективным и позволяет достигать оптических потерь на уровне десятков дБ/км [11], а при оптимизации состава стекла, возможно, даже и сотен дБ/км.

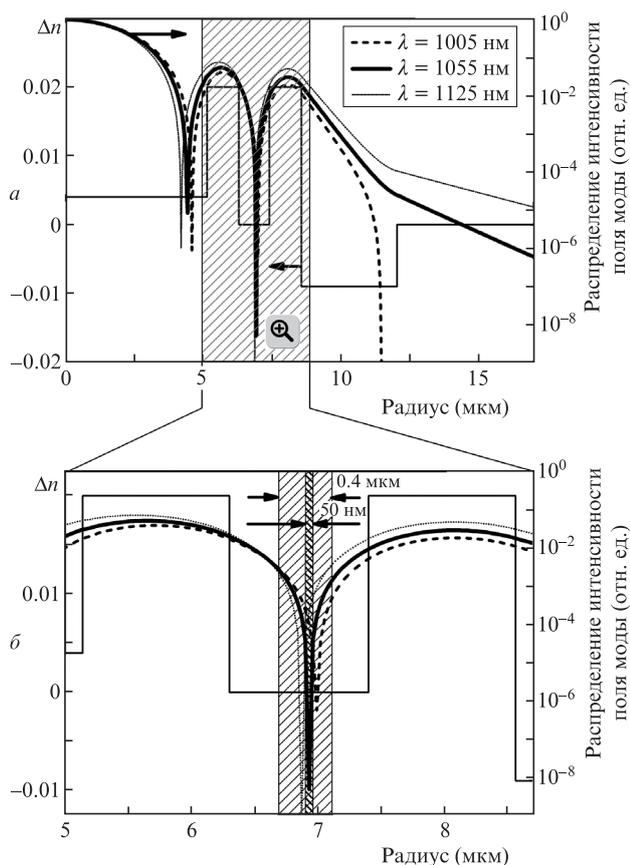


Рис.3. Распределения интенсивности поля моды LP_{03} в структуре гибридного световода для длин волн 1005, 1055 и 1125 нм (а) и увеличенное изображение области минимума моды LP_{03} , локализованного между оптически плотными кольцевыми слоями (б).

С целью получения максимально высокого коэффициента поглощения мы провели поиск наиболее оптимального состава сетки стекла. Были рассмотрены кварцевые стекла, легированные ионами хрома, самария и свинца. Для определения максимального поглощения, достижимого при использовании той или иной легирующей примеси, методом MCVD были изготовлены пробные заготовки со ступенчатым профилем показателя преломления. Введение поглощающей примеси осуществлялось методом пропитки. Из реализованных заготовок были вытянуты одномодовые световоды. Потери на распространение в спектральной области около 1 мкм были измерены методом последовательного уменьшения длины световодов.

Из литературы известно [12], что ион Cr^{4+} в стеклах различного состава имеет широкую полосу поглощения в видимом и ближнем ИК диапазонах. Однако в зависимости от состава матрицы и условий ее синтеза ионы хрома могут принимать также валентность 3+ и 6+, в результате чего их поглощение в стеклянной матрице в ближней ИК области может быть существенно снижено. Измерение потерь пробного световода, сердцевина которого была легирована ионами хрома, показало, что на длине волны около 1 мкм потери не превышают 0.02 дБ/м. Использование в качестве поглощающей примеси ионов свинца в германосиликатной матрице также не позволило достичь сколько-нибудь значимого поглощения – оно не превышало 0.03 дБ/м. Применимость для подавления мод гибридного световода ионов Sm^{3+} было обусловлено на-

личием у иона характерных интенсивных полос поглощения в области длин волн около 1 мкм. Потери на распространение по сердцевине такого световода составили ~ 400 дБ/м на длине волны 1.064 мкм.

Для оценки влияния толщины поглощающего слоя на величину оптических потерь каждой из мод были проведены теоретические расчеты. В частности, сначала мы рассмотрели случай, когда толщина селективирующего слоя составляет 50 нм, а вносимые потери для моды, полностью сосредоточенной в пределах этого слоя, равны 400 дБ/м (рис.3,б). Согласно данным расчета, в таком случае уровень потерь рабочей гибридной моды может быть снижен до уровня фундаментальных потерь, а превышение потерь нежелательных мод световода над потерями моды LP_{03} может достигать почти 30 дБ (рис.4,а). Стоит отметить, что реализация подобной конструкции на практике достаточно проблематична. Во-первых, это связано с диффузией в процессе вытяжки световода. Кроме того, даже в случае успешной реализации такого слоя существует проблема точного воспроизведения на практике модельного профиля показателя преломления. Небольшое смещение слоя с высокими потерями относительно его оптимального положения существенно ухудшит селективность конструкции. Стоит также отметить, что при имеющемся уровне потерь в поглощающем слое потери нежелательных мод световода (например, LP_{02}) не превышают 1 дБ/м (см. рис.4,а). Поэтому эффективная фильтрация мод может быть достигнута только при выборе достаточно большой (свыше 10 м) длины световода. В большинстве случаев такой подход неприемлем из-за резкого снижения порога нелинейных эффектов в длинном световоде.

Оценки потерь для мод, распространяющихся в гибридном световоде с толщиной селективирующего слоя 400 нм, приведены на рис.4,б. Достоинством такой конструкции является то, что длина световода, требуемая для эффективной селекции нежелательных мод, составляет всего несколько метров. Отрицательным моментом здесь

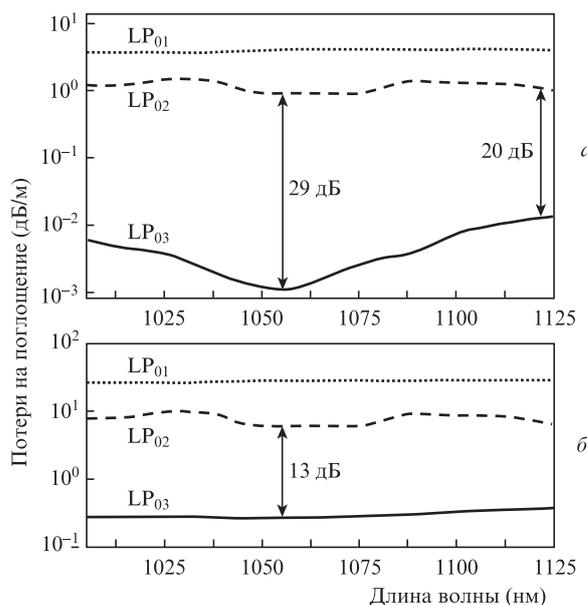


Рис.4. Рассчитанные спектры потерь мод LP_{03} , LP_{02} и LP_{01} для гибридного световода с толщиной селективирующего слоя 50 (а) и 400 нм (б).

является ухудшение селективности по потерям мод до 13 дБ. В то же время зависимость вносимых оптических потерь от длины волны (при постоянном уровне поглощения в слое) достаточно слабая, что упрощает оптимизацию структуры. В частности, вытяжка световодов с разным диаметром сердцевины позволяет добиться желаемого положения максимума аномальной дисперсии, но не приводит к ухудшению селективной способности вводимого слоя.

3. Реализация гибридного световода и его свойства

В ходе работы исследовались оба способа подавления нежелательных мод световода. Методом MCVD были изготовлены заготовки гибридного световода с рассеивающим слоем стекла, состоящим из разных фаз, и заготовки гибридного световода с поглощающим слоем. Анализ свойств заготовок показал, что на практике введение рассеивающего слоя в структуру гибридного световода наименее перспективно. Разделения на фазы удавалось добиться лишь для стекол, существенно отличающихся по вязкости и коэффициенту термического расширения от германосиликатного, что приводило к существенному искажению формы кольцевых слоев с высоким показателем преломления (рис.5,а). Поэтому избыточные потери на рассеяние на границах более плотных слоев были зафиксированы в том числе и для гибридной моды. Так, уровень потерь световода, вытянутого из заготовки с рассеивающим слоем, превышал 5 дБ/м.

Внесение поглощающего слоя позволило реализовать структуру с существенно лучшей цилиндрической симметрией (рис.5,б). Поглощающий слой был образован путем введения в сетку германосиликатного стекла ионов самария. Характер распределения поглощающего лиганда и анализ элементного состава по сечению заготовки были изучены методом энергодисперсионного рентгеновского анализа, проведенного с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5910LV (JEOL) с аналитической системой AZtecENERGY (Oxford Instruments). Микрофотографии образцов и их элементный анализ проведены в режиме Z-контраста в сигнале отраженных электронов. Стандартные отклонения в определении элементов составляли ± 0.07 , 0.10, 0.01 и 0.03 масс. % для Si, Ge, Sm и O соответственно. Концентрация ионов самария в поглощающем слое равнялась 0.08 ат.%. Из реализованной заготовки был вытянут световод с внешним диаметром 125 мкм, показатель преломления полимерного покрытия был выше, чем у нелегированного кварцевого стекла. Измеренный профиль показателя преломления и изображение торца световода, а также аппроксимиро-

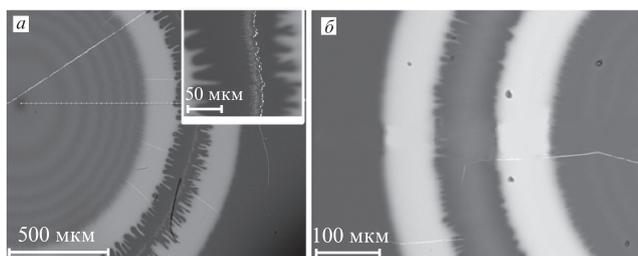


Рис.5. СЭМ-изображения срезов заготовок с рассеивающим (а) и поглощающим (б) селективирующими слоями.

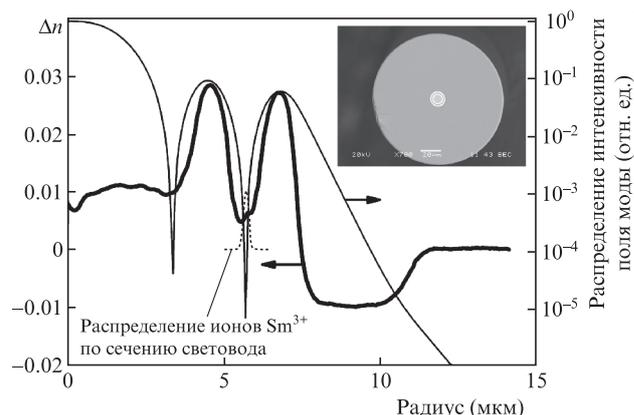


Рис.6. Измеренный профиль показателя преломления гибридного световода и рассчитанное согласно ему распределение интенсивности поля рабочей гибридной моды, а также распределение ионов самария по сечению световода (пунктир). На вставке – изображение торца световода

ванные данные распределения ионов самария по сечению световода приведены на рис.6.

Исследование модового состава было проведено с использованием методики сканирующего пучка, заключающейся в возбуждении возможных мод тестируемого световода смешивающимся в плоскости торца одномодовым пучком. При изучении модового состава световода со сложной структурой (как в случае гибридного световода) при совпадении положения возбуждающего пучка с осью световода на выходе наблюдаются моды, локализованные преимущественно в области сердцевины. Смещение положения возбуждающего пучка относительно оси световода приводит к преимущественному возбуждению мод, локализованных в периферийных областях волоконной структуры (в случае гибридного световода – в оптически более плотных кольцевых слоях). Проведенное исследование показало, что на выходе реализованного гибридного световода длиной более 5 м на длине волны 1.064 мкм распространяется только гибридная мода LP_{03} (рис.7,а–б). При смещении возбуждающего пучка от оси световода наблюдалось лишь плавное затухание моды сердцевины. При этом изгиб световода (вплоть до диаметра изгиба около 1 см) не приводил к искажению моды, а также к каким-либо вариациям интенсивности излучения, распространяющегося в оболочечных высоколегированных слоях. Диаметр поля моды составил 5.4 мкм. Исследование модового состава более короткого куска световода (~ 0.5 м) показало, что в структуре возможно распространение мод кольцевых слоев: при смещении возбуждающего пучка от оси световода наблюдалось свечение кольцевых слоев (рис.7,з–е).

На рис.8 приведен спектр потерь созданного гибридного световода, измеренный методом последовательного уменьшения длины. Там же показан характерный спектр потерь ионов самария, нормированный на уровень потерь гибридного световода. Измерения потерь проводились при длине световода более 5 м, когда мощность нежелательных мод световода ничтожно мала. Потери гибридной моды на длине волны 1.064 мкм составили ~ 0.8 дБ/м. Потери на сварку гибридного световода со стандартным световодом со ступенчатым профилем показателя преломления (диаметры сердцевины и оболочки 6 и 125 мкм соответственно) на длине волны 1.06 мкм были равны 2.5 дБ.

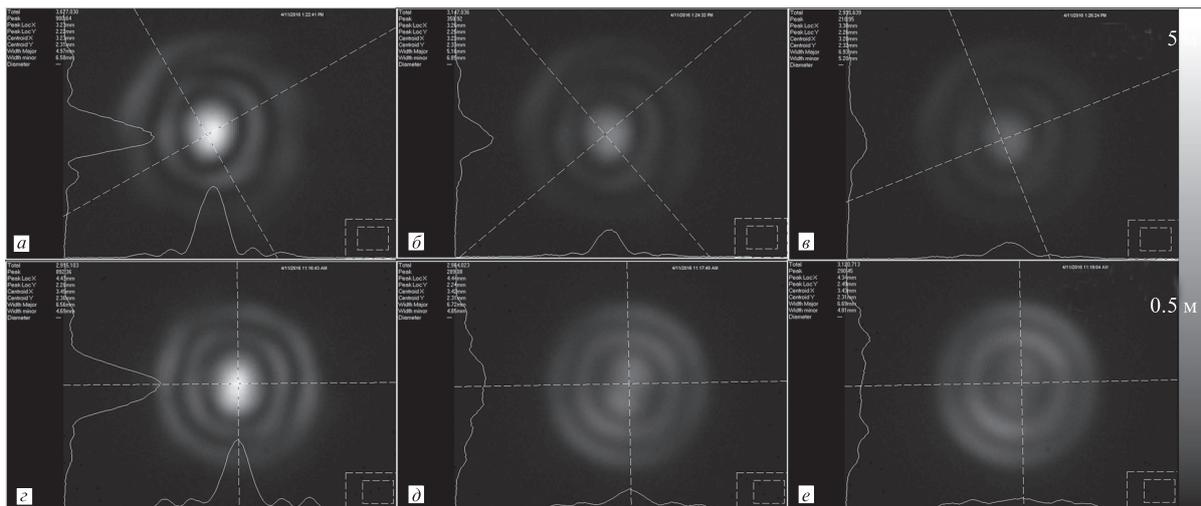


Рис.7. Измеренный модовый состав на выходе гибридного световода длиной 5 (а-в) и 0.5 м (г-е); а, г – возбуждающий пучок направлен по оси световода; б, в, д, е – возбуждающий пучок смещен от его оси.

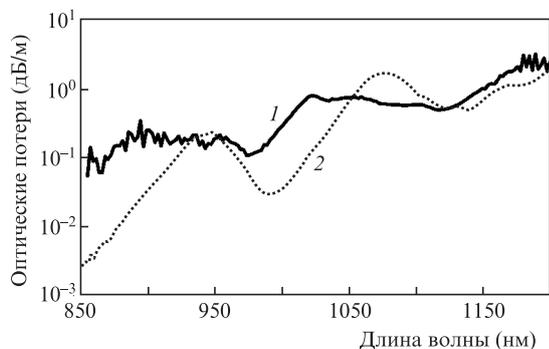


Рис.8. Измеренный спектр потерь реализованного гибридного световода (1) и характерный спектр поглощения ионов самария в сетке стекла (2).

Измерение дисперсии осуществлялось интерферометрическим методом [13]. Методика измерения предполагала использование достаточно короткого (около 70 см) отрезка тестируемого световода, что в нашем случае делало вероятным возбуждение, распространение и детектирование нежелательных мод. Вследствие этого для уменьшения ошибки измерения осуществлялось выборочное возбуждение рабочей моды путем сварки гибридного световода со стандартным одномодовым световодом со ступенчатым профилем показателя преломления, при этом сигнал вводился в одномодовый световод. Контроль качества пучка осуществлялся с помощью ИК камеры, установленной на выходном конце гибридного световода. После измерения полной дисперсии из полученной цифры вычиталась дисперсия приваренного одномодового световода. Измеренная дисперсия отрезка исследуемого световода показана на рис.9. Разброс ее значений обусловлен небольшим рабочим спектральным диапазоном (~100 нм), который был ограничен, с одной стороны, возможностью возбуждения лишь одной гибридной моды (гибридные моды высших порядков и моды оптически более плотных кольцевых слоев отсутствуют), а с другой – отсечкой гибридной моды, расположенной в области 1200 нм.

Итак, нами предложена и реализована методика подавления нежелательных мод световода путем введения в

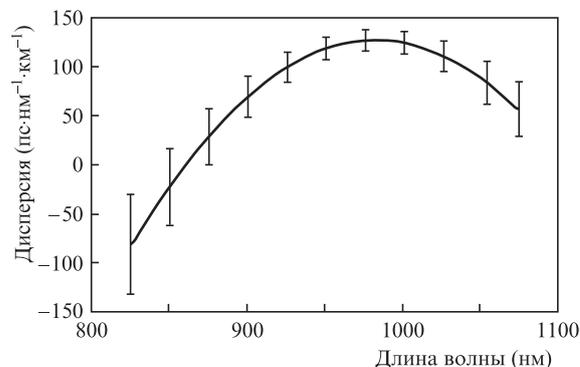


Рис.9. Измеренная дисперсия гибридного световода.

область минимума рабочей моды структуры дополнительного сильно поглощающего слоя. Эффективность методики продемонстрирована на примере цилиндрически симметричного гибридного световода с аномальной в области 1 мкм дисперсией. Использование ионов Sm в качестве поглощающей примеси позволило отделить рабочую моду от всех остальных мод световода за счет различия в уровнях потерь на распространение и, таким образом, осуществить эффективную фильтрацию нежелательных мод при выборе соответствующей длины световода.

Авторы благодарят Е.М.Дианова и С.Л.Семенова за интерес к работе и оказанную поддержку. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01572).

1. Herda R. et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20** (3), 217 (2008).
2. Lim H., Ilday F.Ö., Wise F.W. *Opt. Express*, **10**, 1497 (2002).
3. Knight J.C. et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 807 (2000).
4. Lim H., Wise F. *Opt. Express*, **12**, 2231 (2004).
5. Kolyadin A.N., Alagashev G.K., et al. *Phys. Procedia*, **73**, 59 (2015).
6. Nicholson J. W. et al. *Opt. Express*, **15**, 6623 (2007).
7. Ramachandran S., Ghalmi S., et al. *Opt. Lett.*, **31**, 2532 (2006).
8. Aleshkina S.S., Likhachev M.E., et al. *Opt. Express*, **21**, 23838 (2013).
9. Yeh P., Yariv A. *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 1196 (1978).
10. Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Senatorov A.K., Bubnov M.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9344**, 934405 (2015).
11. Бубнов М.М. и др. *Квантовая электроника*, **39** (9), 857 (2009).
12. Двойрин В.В., Дианов Е.М., Машинский В.М., Неуструев В.Б., Гурьянов А.Н., и др. *Квантовая электроника*, **31** (11), 996 (2001).
13. Hen-Tai Shang. *Electron. Lett.*, **17**, 603 (1981).