

# Влияние длины волны накачки и размера сердцевины световодов с акустической антиволноводной структурой на спектры ВРМБ

М.Е.Лихачев, В.В.Алексеев, М.М.Бубнов, М.В.Яшков, Н.Н.Вечканов,  
А.Н.Гурьянов, Н.Пейгамбарян, В.Темьянко, Дж.Нагел

*Изготовлены и исследованы волоконные световоды с акустической антиволноводной структурой, создаваемой путем легирования оксидом алюминия сердцевины световода. Проведены измерения и теоретический расчет спектров ВРМБ. Показано, что в световодах с антиволноводным акустическим профилем форма спектра ВРМБ имеет сильную зависимость от длины волны накачки, размера сердцевины и распределения легирующих добавок по сечению световода. Установлено, что существенное уширение спектра усиления ВРМБ возможно лишь при определенных волноводных параметрах световода и для фиксированной рабочей длины волны.*

**Ключевые слова:** ВРМБ, волоконный световод, акустическая антиволноводная структура.

## 1. Введение

Мощные (до десятков ватт) узкополосные (с шириной линии менее 100 МГц) источники лазерного излучения в настоящее время широко используются в распределенных датчиках, спектроскопии, астрономических системах адаптивной оптики. Основным фактором, который в данном случае может ограничивать максимальную выходную мощность, является ВРМБ, обладающее среди прочих нелинейных эффектов наименьшим порогом и в первую очередь проявляющееся при повышении выходной мощности узкополосных лазеров [1]. Обычно для лазеров и усилителей на основе световодов, легированных Er или Yb, достижение мощностей в несколько десятков ватт не является критическим, поскольку высокий коэффициент усиления позволяет использовать относительно короткие длины активных световодов. Однако если требуемая длина волны источника лежит вне полосы усиления редкоземельных элементов, то ВРМБ становится основной проблемой. Например, в лазерах и усилителях на основе ВКР коэффициент усиления в используемых световодах относительно велик и требуется значительная (сотни метров) длина световода для достижения оптических мощностей на уровне нескольких ватт [2]. В этом случае ВРМБ быстро становится доминирующим процессом, который и ограничивает выходную мощность и эффективность данных устройств.

Для того чтобы преодолеть существующие ограничения на выходную мощность одночастотных волоконных лазеров, были разработаны различные методы подавления ВРМБ-усиления в световоде. Наиболее распространенным из них является изменение акустических свойств (и, следовательно, положения полосы усиления ВРМБ) световода по длине, приводящее к уширению спектра ВРМБ и повышению его порога. Самый простой вариант этого метода предполагает последовательную сварку нескольких световодов с различными спектрами ВРМБ [3]. Кроме того, можно изменять профиль показателя преломления световода вдоль длины путем переменного легирования заготовки [4, 5], а также создавать по длине световода температурный градиент [6] либо переменные напряжения [7]. В ряде случаев все эти методы оказываются весьма эффективными, однако их применение далеко не всегда возможно (например, в случае коротких световодов или световодов с большим диаметром поля моды). Более того, их техническая реализация достаточно сложна и не всегда применима на практике.

В этой связи в последнее время все больший интерес проявляется к методу подавления ВРМБ путем создания «антиволноводной» акустической структуры [8, 9]. Основная идея данного метода заключается в том, что существование акустического волновода вследствие различия скоростей звука в сердцевине и оболочке световода приводит к увеличению времени взаимодействия оптической и акустической волны и, как следствие, к сужению спектра ВРМБ и понижению его порога. Впервые на изменение спектра ВРМБ в случае одномодовых волоконных световодов по сравнению с объемными образцами было указано еще в 1979 г. [10], однако поиск методов подавления данного эффекта был начат сравнительно недавно. Среди легирующих добавок, используемых при изготовлении световодов на основе кварцевого стекла, только оксид алюминия повышает оптический показатель преломления и понижает акустический [11], тем самым позволяя создавать «антиволноводную» акустическую структуру. В нескольких работах было экспериментально показано, что световоды с алюмосиликатной сердцевиной действительно имеют более высокий порог ВРМБ по

М.Е.Лихачев, В.В.Алексеев, М.М.Бубнов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: likhachev@fo.gpi.ru

М.В.Яшков, Н.Н.Вечканов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23

А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

N.Peyhambarian, V.Temyanko, J. Nagel. College of Optical Sciences, University of Arizona, 1630 E. University Blvd. Tucson, AZ 85721, USA

Поступила в редакцию 14 июля 2014 г., после доработки – 12 сентября 2014 г.

сравнению со световодом с германосиликатной сердцевиной [12, 13].

Стоит отметить, однако, что эффективность данного подхода, вообще говоря, не столь очевидна. Так, например, в работе [14] экспериментально исследовались ВРМБ-характеристики световодов с кварцевой сердцевиной и фторированной оболочкой. Так как фторсилкатная отражающая оболочка имеет акустический индекс выше, чем у нелегированного кварцевого стекла, то такие световоды также обладают акустически антиволноводной структурой. Однако в [14] было обнаружено, что порог ВРМБ в световодах с кварцевой сердцевиной и фторированной оболочкой не увеличивается по сравнению со световодами с германосиликатной сердцевиной и кварцевой оболочкой. Следовательно, наличие антиволноводного профиля само по себе не является достаточным условием для подавления ВРМБ.

Целью настоящей работы является выявление факторов, определяющих условия, при которых антиволноводный профиль действительно приводит к уширению спектра ВРМБ (и, как следствие, к повышению порога появления данного эффекта при фиксированном диаметре поля моды). В частности, будут представлены результаты исследований трех алюмосиликатных световодов, имеющих акустическую антиволноводную конструкцию.

## 2. Экспериментальные результаты

На первом этапе настоящей работы методом MCVD были изготовлены два алюмосиликатных световода Y-404 и Y-807 с приблизительно равномерным легированием оксидом алюминия по сердцевине. Световоды различались только уровнем легирования  $Al_2O_3$  и, следовательно, показателем преломления сердцевины (рис.1). Исследуемые световоды вытягивались с различными диаметрами, максимальный из которых определялся условием одномодовой работы на длине волны 1550 нм, а минимальный – приемлемо низкими потерями на вытекание.

Для измерения спектров ВРМБ в световоде Y-404 был применен метод бриллюэновской рефлектометрии (BOTDR – Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry), аналогичный использованному в работе [15]. Для этих целей был использован бриллюэновский рефлектометр Ando AQ8602. Принципиальная схема установки показана на рис.2.

Задающий сигнал от одночастотного источника излучения (ЛД РОС) разделяется на опорный и основной сиг-

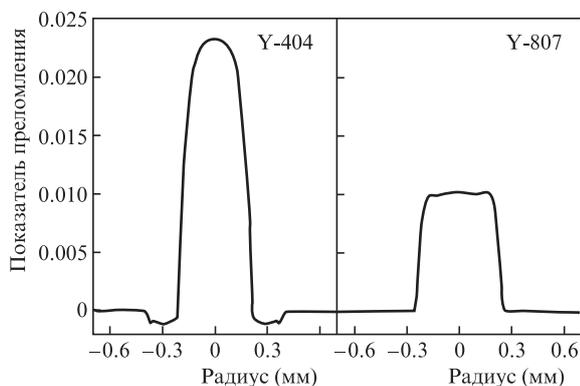


Рис.1. Профили показателя преломления, измеренные в заготовках световодов Y-404 и Y-807.

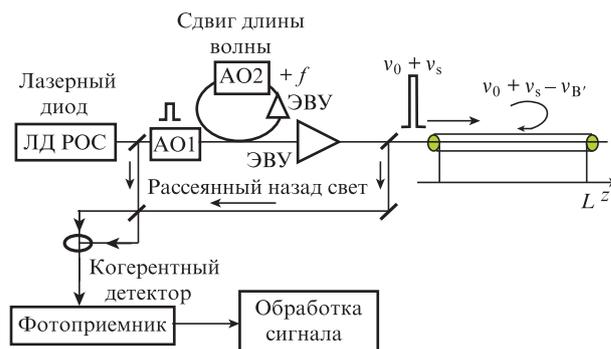


Рис.2. Схема установки для измерения спектров ВРМБ.

налы. Основной сначала модулируется при помощи акусто-оптического модулятора АО1 для формирования импульсов длительностью 20–1000 нс (для обеспечения требуемого разрешения по длине измеряемого световода), затем при помощи высокоскоростного модулятора АО2 формируется оптический сигнал с увеличенной оптической частотой (сдвиг частоты  $+f$  равен частоте модуляции в АО2 и может меняться), который, в свою очередь, усиливается эрбиевым усилителем (ЭВУ). Усиленный сигнал поступает на вход оптического циркулятора и далее в тестируемый световод. Рассеянный назад свет выходит из третьего порта циркулятора и поступает в схему когерентного детектора, где смешивается с опорным сигналом и регистрируется фотодетектором. Развертка полученного сигнала по времени позволяет установить область световода, откуда прошло рассеяние излучения. Сканирование частоты модулятора АО2, в свою очередь, позволяет регистрировать спектр ВРМБ. Отметим, что использованный метод не позволяет определить абсолютную величину усиления за счет ВРМБ, поэтому для удобства все спектры ВРМБ нормированы так, чтобы максимальное усиление ВРМБ было бы равно единице. Подчеркнем, что относительную интенсивность максимального усиления ВРМБ можно оценить, учтя тот факт, что площадь под спектрами ВРМБ остается приблизительно одинаковой (с точностью до изменения диаметра поля основной моды). Таким образом, уширение спектра ВРМБ приводит к существенному снижению пикового (максимального) коэффициента усиления ВРМБ и, следовательно, к повышению его порога. Именно относительное уширение спектра ВРМБ интересовало нас в рамках настоящего исследования.

Измеренные спектры ВРМБ для световодов, вытянутых из заготовки Y-404, показаны на рис.3. Видно, что в спектре ВРМБ наблюдается два пика. Это связано с тем, что, несмотря на антиволноводный акустический профиль, звуковая волна при распространении оптического излучения возникает именно в сердцевине световода (где максимальна интенсивность оптического поля) и лишь затем «вытекает» в оболочку. Фактически в световоде распространяется несколько акустических волн, каждая из которых приводит к появлению пика ВРМБ на своей частоте. Пик с меньшей частотой образован в результате взаимодействия части оптической моды, распространяющейся по оболочке с акустическими модами оболочки, в то время как правый пик с большей частотой является результатом перекрытия излучения, распространяющегося по сердцевине, с акустическими модами сердцевины [16]. Тут стоит уточнить, что поскольку длина затухания аку-

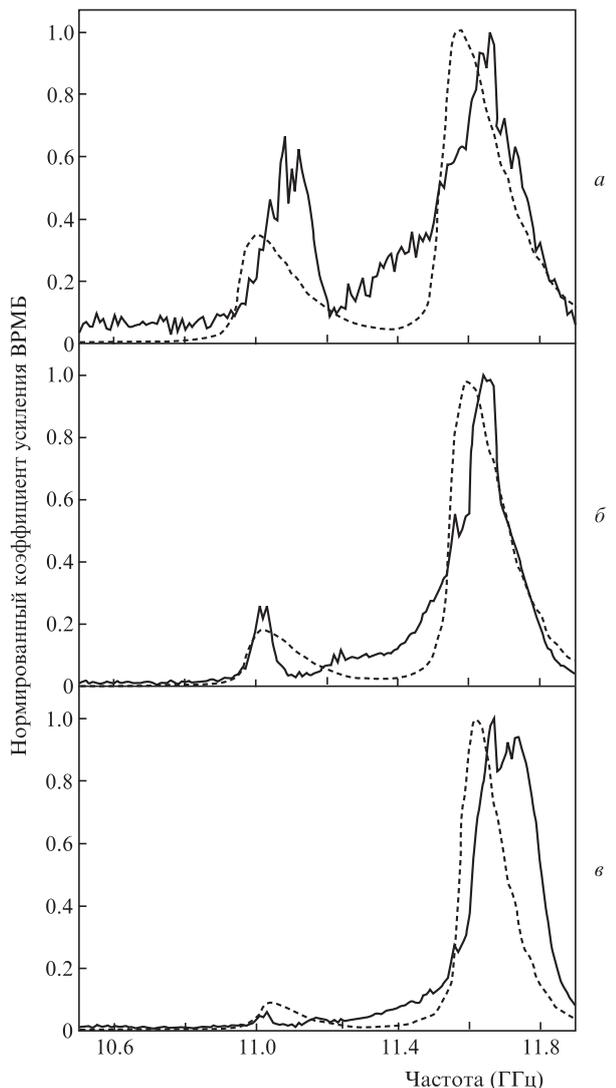


Рис.3. Измеренные (сплошные кривые) и рассчитанные (штриховые кривые) спектры ВРМБ световодов, вытянутых из заготовки Y-404, при внешних диаметрах световода 100 (а), 125 (б) и 165 мкм (в).

стической волны порядка диаметра оболочки и волноводные свойства выражены крайне слабо, то разделение акустических мод на моды оболочки и сердцевины в значительной степени условно.

Для максимального подавления ВРМБ (при сравнении со световодом, имеющим такой же диаметр поля моды) необходимо получить спектр усиления ВРМБ с двумя пиками примерно одинаковой интенсивности [15]. Из спектров, приведенных на рис.3, можно видеть, что наиболее близкие интенсивности пиков наблюдаются для световода с внешним диаметром 100 мкм (рис.3,а). Также можно видеть, что при изменении диаметра световода меняется и относительная интенсивность пиков в спектре ВРМБ (рис.3,б и в). Данный эффект можно объяснить тем, что при уменьшении диаметра сердцевины (пропорционального внешнему диаметру световода) доля электрического поля фундаментальной оптической моды, распространяющаяся в оболочке, увеличивается. В результате происходит повышение интенсивности пика усиления ВРМБ с меньшей частотой (связанного с оболочечными акустическими модами). В то же время уменьшение пика с большей частотой (связанного с акустической модой сердцевины) при уменьшении диаметра сердцевины

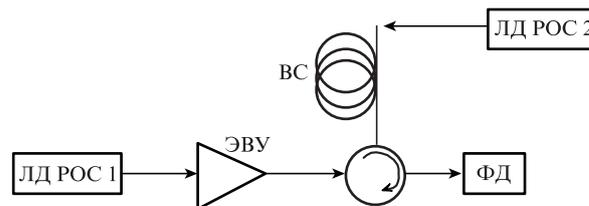


Рис.4. Схема установки для измерения спектров ВРМБ с использованием пробного излучения.

обусловлено уменьшением перекрытия акустических мод сердцевины и оптической моды. Теоретические расчеты спектров ВРМБ, учитывающие перекрытие оптической и акустических мод (выполненные нами с использованием модели, предложенной в [17]), хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис.3) и подтверждают данный вывод.

Методика измерения спектров ВРМБ с помощью бриллюэновского рефлектометра Ando AQ8602 достаточно проста и удобна. Недостатком ее является относительно низкое отношение сигнал/шум, что затрудняет получение качественных спектров ВРМБ. Поэтому дальнейшее измерение спектров ВРМБ проводилось нами прямым методом [18] на установке, принципиальная схема которой показана на рис.4. В данном методе сигнал одночастотного лазера (ЛД РОС 1) усиливается в эрбиевом усилителе (ЭВУ) и через циркулятор вводится с исследуемый световод (ВС). Через противоположный конец исследуемого световода вводится пробное излучение маломощного одночастотного лазерного диода (ЛД РОС 2) с перестраиваемой длиной волны. Сканирование длины волны последнего позволяет с высокой точностью прописывать спектр усиления ВРМБ. Преимуществом такого метода по сравнению с бриллюэновской рефлектометрией оказалось существенно лучшее отношение сигнал/шум.

Исследование световода Y-807 показало, что, как и в предыдущем случае, спектр ВРМБ имеет два отчетливо разделенных пика (рис.5,а). В зависимости от размера сердцевины световода Y-807 отношение интенсивностей обоих пиков также изменяется. Интересно отметить, что моделирование спектра ВРМБ в обоих случаях показало, что изменение длины волны накачки приводит к изменению соотношения интенсивности левого (за счет ВРМБ в оболочке) и правого (за счет ВРМБ в сердцевине) пиков (рис.5,б). Объяснение данного эффекта полностью аналогично объяснению изменения спектра ВРМБ при изменении диаметра сердцевины (см. выше), поскольку изменение длины волны накачки эквивалентно изменению диаметра сердцевины. Так, увеличение рабочей длины волны повышает долю оптической моды, распространяющуюся по оболочке, что эквивалентно уменьшению размера сердцевины при фиксированной длине волны.

Отметим, что путем изменения диаметров световодов Y-404 и Y-807 нам не удалось добиться выравнивания по амплитуде пиков в спектре ВРМБ, связанных с акустическими модами оболочки и сердцевины. Моделирование показало, что интенсивности обоих пиков сравняются, если нормированная частота  $V$  будет уменьшена до 0.8 путем уменьшения диаметра сердцевины световода. Однако в этом случае световоды становятся чрезвычайно чувствительными к изгибу и перестают каналировать излучение. Необходимо подчеркнуть, что показатель преломления сердцевины обоих световодов (Y-807 и Y-404)

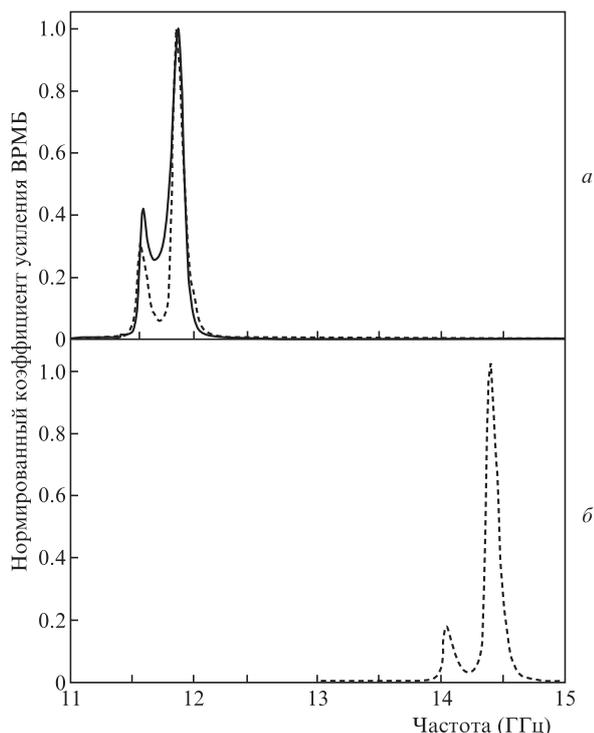


Рис.5. Измеренная (сплошная кривая) и рассчитанные (штриховые кривые) спектры ВРМБ световодов, вытянутых из заготовки Y-807, на длинах волн 1.55 (а) и 1.27 мкм (б).

существенно выше показателя преломления стандартных световодов типа SMF28 (в 2 и 4 раза соответственно), т. е. такая конструкция исследуемых световодов, вообще говоря, «малочувствительна» к изгибу (по сравнению со световодами с апертурой сердцевинки, близкой к стандартной). Таким образом, световоды со ступенчатой антиволноводной структурой (в которой акустический индекс не изменяется по сечению сердцевинки) достаточно проблематично использовать на практике для подавления ВРМБ. Это связано с достаточно специфичными требованиями к волноводным параметрам таких световодов, при которых не удается добиться приемлемо малой чувствительности к изгибам. По всей видимости, именно данным фактором объясняется то, что ранее во фторсиликатном световоде с антиволноводной акустической структурой не было обнаружено уширения спектра ВРМБ [14] и повышения порога этого эффекта.

В ряде работ для увеличения вытекания акустической моды в оболочку было предложено создать антиволноводный акустический профиль, имеющий треугольную форму (вместо близкой к прямоугольной – как в световодах Y-807 и Y-404) [19, 20]. В этих работах рассматривалось совместное легирование оксидом германия и оксидом алюминия с концентрациями, изменяющимися по сечению сердцевинки световода. Основная идея такого легирования заключается в том, что при добавлении в кварцевое стекло оксида германия увеличиваются как оптический, так и акустический показатели преломления, оксид алюминия же увеличивает только оптический показатель преломления, уменьшая акустический. Легируя сердцевину данными добавками в необходимой пропорции, теоретически можно сформировать практически любые (при этом несовпадающие) акустический и оптический профили [19]. Для проверки эффективности данной методики нами был изготовлен световод Y-814 с двумя легирующими

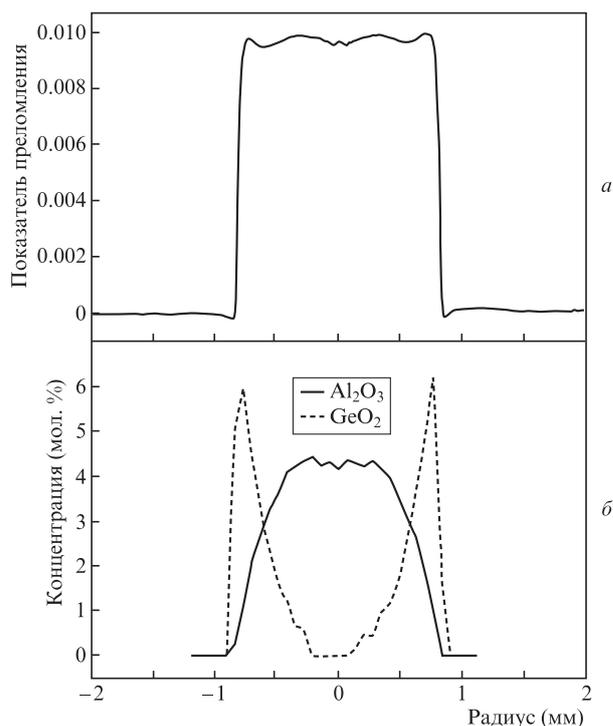


Рис.6. Профиль показателя преломления (а) и распределение легирующих добавок в сердцевине (б) световода Y-814.

ми добавками,  $\text{GeO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Его профиль показателя преломления (рис.6,а) практически совпадает с профилем световода Y-807 (рис.2,б), легированного только  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Измеренные профили распределения легирующих добавок в сердцевине заготовки световода Y-814 показаны на рис.6,б.

Измерение спектра ВРМБ в световоде Y-814 показало, что полностью решить поставленную задачу не удалось – в спектре по-прежнему доминирует лишь один пик (рис.7). В то же время, существенным отличием от спектров ВРМБ предыдущих световодов является то, что большую интенсивность имеет теперь левый пик, соответствующий перекрытию основной моды и оболочечных акустических мод (а не правый, как в случае равномерного легирования). Таким образом, подбирая распределение оксида германия и оксида алюминия по сечению световода можно теоретически выравнивать амплитуды пиков в спектре ВРМБ (и, следовательно, добиться максимального снижения пикового усиления ВРМБ) при заданных волноводных параметрах световода. На практике создание

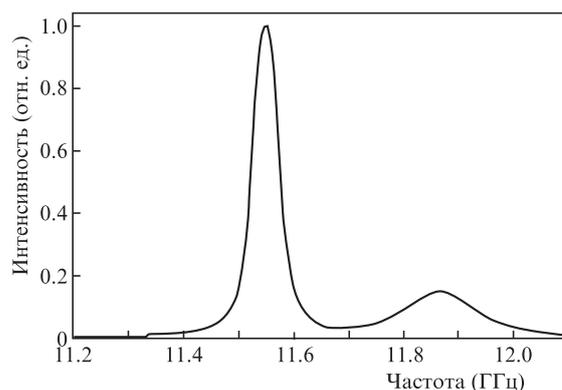


Рис.7. Измеренный спектр ВРМБ световода Y-814.

требуемого распределения легирующих добавок затруднено высокой неуправляемой термодиффузией алюминия в процессе изготовления заготовок и световодов. В случае успеха следует иметь в виду, что полученный световод будет иметь максимальный порог ВРМБ только на одной длине волны (в отличие, например, от методов приложения переменного напряжения или температуры, изменения концентрации по длине световода и т.п.), что существенно снижает ценность подобного метода.

### 3. Заключение

Проанализированы спектры ВРМБ трех изготовленных нами световодов, обладающих акустическим антиволноводным профилем. Обнаружено, что спектр ВРМБ существенно изменяется как при вариации длины волны зондирующего излучения, так и при изменении размера сердцевины световода. Установлено, что при равномерном по сечению легировании сердцевины световода для существенного уширения спектра ВРМБ необходимо обеспечить достаточно короткую длину волны отсечки (приблизительно в три раза меньшую рабочей длины волны), что приводит к неприемлемо высокой чувствительности такого световода к изгибу. Показано, что данная проблема может быть решена путем тщательного подбора профилей распределения легирующих добавок, обеспечивающих разные знаки акустического показателя преломления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-02-01267). Работа частично поддержана грантом Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение от 27 августа 2013 г. №02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

Авторы благодарят С.Г.Акопова (ООО «Корнинг СНГ») за техническое содействие при проведении исследований

и Е.М.Дианова за постоянную поддержку и проявленный интерес к работе.

1. Smith R.G. *Appl. Opt.*, **11**, 2489 (1972).
2. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press, 1995).
3. Takahashi M., Tadakuma M., Hiroishi J., Yagi T. *Proc. ECOC 2007* (Berlin, 2007, paper P014).
4. Tateda M., Ohashi M., Shiraki K. *Proc. OFC 1993* (San Jose, 1993, paper ThJ4).
5. Achmetshin U.G., Bubnov M.M., Guryanov A.N., Dianov E.M., Khopin V.F., Sysoliatin A.A., Li M.-J., Li S., Nolan D.A. *Proc. ECOC 2005* (Los Angeles, 2005, paper OFH5).
6. Liu A. *Opt. Express*, **15**, 977 (2007).
7. Rothenberg J.E., Thielen P.A., Wickham M., Asman C.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6873**, 68730O (2008).
8. Зельдович Б.Я., Пилипецкий А.Н. *Квантовая электроника*, **15** (6), 1297 (1988).
9. Дианов Е.М., Карасик А.Я., Лучников А.В., Пилипецкий А.Н. *Квантовая электроника*, **16** (4), 752 (1989).
10. Thomas P.J., Rowell N.L., van Driel H.M., Stegeman G.I. *Phys. Rev. B*, **19**, 4986 (1979).
11. Jen C.-K., Neron C., Shang A., Abe K., Bonnel L., Kushibiki J. *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 712 (1993).
12. Nakanishi T., Tanaka M., Hesegawa T., Hirano M., Okuno T., Onishi M. *Proc. ECOC 2006* (Cannes, 2006, Vol. 6, paper Th4.2.2).
13. Mermelstein M.D. *Opt. Express*, **17**, 16225 (2009).
14. Zou W., He Z., Hotate K. *Proc. OFC 2008* (San Diego, 2008, paper OMH1).
15. Dragic P.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7197**, 719710-2 (2009).
16. Yoo S., Codemard C.A., Jeong Y., Sahu J.K., Nilsson J. *Appl. Opt.*, **49**, 1388 (2010).
17. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 631 (2004).
18. Villafranca A., Lázaro J.A., Salinas I., Garcés I. *Opt. Express*, **13**, 7336 (2005).
19. Mermelstein M.D., Andrejco M.J., Fini J., Yablon A., Headley C., DiGiovanni D.J., McCurdy A.H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6873**, 68730N (2008).
20. Наний О.Е., Павлова Е.Г. *Квантовая электроника*, **39** (8), 757 (2009).