

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ**Оптимизация акустической антиволноводной структуры для повышения порога ВРМБ в волоконных световодах****М.М.Худяков, М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, Д.С.Липатов, А.Н.Гурьянов, В.Темьянко, Дж.Нагел, Н.Пейгамбарян**

Изготовлены и исследованы волоконные световоды с неоднородной по радиусу акустической антиволноводной структурой, созданной посредством совместного легирования оксидами алюминия и германия сердцевины световода. Исследована зависимость порога и спектра усиления ВРМБ от формы звукового антиволноводного профиля и диаметра сердцевины. Продемонстрировано увеличение порога ВРМБ на 4.4 дБ по сравнению со случаем германосиликатного световода, имеющего такой же диаметр поля моды.

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

1. Введение

Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна является основным фактором, ограничивающим пиковую (либо среднюю) мощность узкополосных (с шириной линии менее 100 МГц) волоконных лазеров и усилителей. К настоящему моменту предложен ряд методов, позволяющих существенно повысить порог ВРМБ. Как правило, эти методы основаны на изменении акустических свойств световода по длине за счет продольного изменения концентрации [1–4], температуры [5] или натяжения [6]. Стоит отметить, что эти методы зачастую сложны в реализации либо не могут быть использованы вовсе (например, в случае относительно коротких длин световодов). В этой связи значительное внимание уделяется возможности создания однородных по длине световодов, имеющих увеличенный порог ВРМБ.

Еще в 1979 г. было показано, что в волоконных световодах наличие волноводной структуры не только для оптического излучения, но и для акустических волн увеличивает время взаимодействия оптической и акустической мод и, как следствие, приводит к сужению спектра ВРМБ [7]. Впоследствии было теоретически показано, что изменение акустических свойств световода позволяет наоборот увеличить ширину спектра ВРМБ и тем самым

повысить его порог [8–10]. Последнее утверждение основывалось на том, что создание акустической антиволноводной структуры приводит к вытеканию акустических мод в оболочку световода и уменьшению времени их взаимодействия с оптической модой. Практическая реализация таких структур стала возможной благодаря использованию оксида алюминия – единственной легирующей добавки, которая повышает оптический и понижает акустический показатели преломления (скорость звука при легировании оксидом алюминия повышается) [11]. В ряде работ экспериментально показано, что в световодах, легированных оксидом алюминия, возможно подавление ВРМБ на 3–11 дБ [12–17].

Однако создание антиволноводного акустического профиля не является достаточным условием для подавления ВРМБ. Так, в работе [18] исследовались световоды с фторсиликатной отражающей оболочкой и слабо фторированной либо чисто кварцевой сердцевиной. Поскольку фтор понижает оптический и повышает акустический показатели преломления, такие световоды являются акустически антиволноводными. В то же время ширина спектра и величина порога ВРМБ в них не отличались от таковых в германосиликатном световоде с близкими оптическими параметрами. Более того, в работе [19] нами показано, что использование алюмосиликатных световодов с равномерным легированием по радиусу сердцевины не позволяет уширить спектр ВРМБ при разумных волноводных параметрах (по оценкам существенное уширение спектра ВРМБ возможно при рабочей длине волны, вдвое большей длины волны отсечки, – чувствительность к изгибам в этом случае становится неприемлемо высокой). Стоит отметить, что для подавления ВРМБ авторы вышеперечисленных работ зачастую используют довольно сложные трехслойные профили световодов, но при этом не приводят достаточных данных (точное распределение легирующих добавок по радиусу изготовленного световода, волноводные параметры), необходимых для повторения экспериментов с такими структурами, а в ряде работ [13, 17] дизайн световода вообще не раскрывается.

Цель настоящей работы – выявление факторов, ответственных за увеличение порога ВРМБ в световодах с ан-

М.М.Худяков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

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

Д.С.Липатов. Институт химии высокочистых веществ им Г.Г.Девярых 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 им Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

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

тиволноводным акустическим профилем. Оптимизация профиля легирования сердцевинки световода позволила нам существенно (более чем на 3 дБ) повысить порог ВРМБ. Установлено, что данный эффект наблюдается лишь при фиксированных волноводных параметрах световода.

2. Оптимизация конструкции световода с антиволноводным акустическим профилем

Детальный анализ работ [12–17] показывает, что подавление ВРМБ достигалось за счет сложной акустической структуры – использования дополнительной отражающей оболочки с высоким акустическим показателем преломления между сердцевинкой и нелегированной кварцевой оболочкой [12, 14–16]. Более того, в ряде работ указано, что для более эффективного подавления ВРМБ необходимо использовать так называемый треугольный акустический антиволноводный профиль (акустический показатель преломления линейно уменьшается к оси световода, тогда как оптический не изменяется) [16, 17, 20, 21]. Стоит отметить, что в работах, где говорится о равномерном легировании сердцевинки [13, 18], реальный профиль легирования мог оказаться градиентным вследствие высокого коэффициента диффузии оксида алюминия (см., напр., профиль показателя преломления алюмосиликатного световода в [15]). Таким образом, можно предположить, что неудача в подавлении усиления ВРМБ в работах [18, 19] связана именно с однородным профилем легирования вдоль радиуса сердцевинки световода.

С целью проверки данного предположения в настоящей работе методом MCVD были созданы две заготовки. В обеих заготовках совместным легированием оксидами алюминия и германия получен неоднородный по радиусу акустический антиволноводный профиль. Различие между заготовками заключалось в форме акустического показателя преломления. В первой заготовке (I) акустический показатель преломления уменьшался медленно на краю сердцевинки и быстро – ближе к оси (показатель с «вогнутым» треугольным профилем). Во второй заготовке (II), наоборот, быстрое снижение акустического показателя преломления на краю сердцевинки сменялось медленным изменением ближе к оси световода («выгнутый» треугольный профиль). Концентрации оксида германия и оксида алюминия на границе сердцевинки и оболочки подбирались таким образом, чтобы акустический показатель преломления был равен показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. Профили легирования оксидами алюминия и оксидами германия, а также оптический и акустический показатели преломления (рассчитанные на основании [12]) в созданных заготовках представлены на рис. 1.

Из этих заготовок было вытянуто три световода: два из первой заготовки с внешними диаметрами 100 и 125 мкм и один из второй – с внешним диаметром 100 мкм. Для сравнения были взяты алюмосиликатный (Al), фосфоросиликатный (P) и германосиликатный (Ge) световоды с равномерным по радиусу легированием сердцевинки и чисто кварцевой оболочкой. В качестве опорного световода служил стандартный световод SMF-28. Сводные характеристики всех световодов приведены в табл. 1.

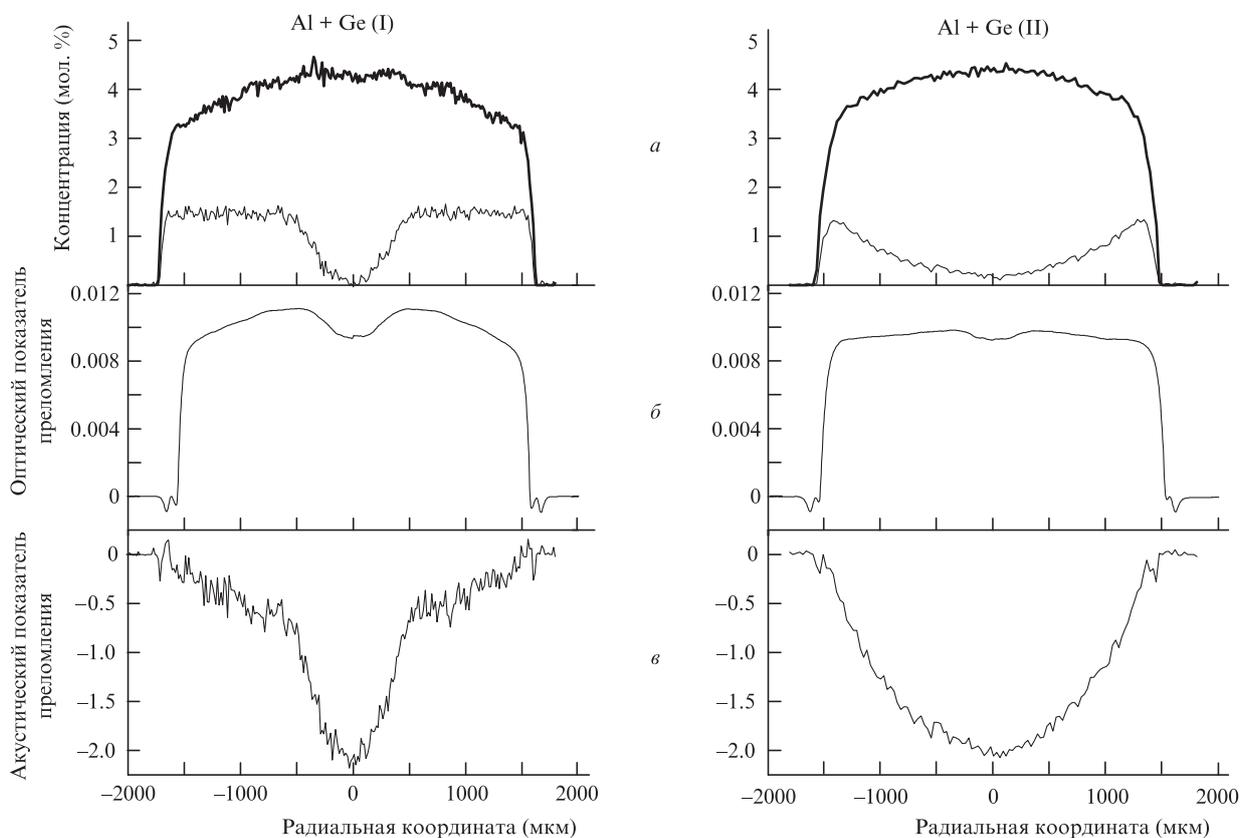


Рис. 1. Профили легирования, измеренные на электронном микроскопе (а), профили показателя преломления (б) и акустические профили (в) для первой (слева) и второй (справа) заготовок (Al_2O_3 – жирная кривая, GeO_2 – тонкая кривая).

Табл.1. Характеристики исследованных световодов, измеренный порог и коэффициент бриллюэновского усиления, полученный прямым методом (g_B^1) и посчитанный по измеренному порогу (g_B^2).

Название световода и внешний диаметр	$\Delta n (10^{-3})^*$	Диаметр поля моды (мкм)	Порог ВРМБ I_{th} (мВт/мкм ²)			$g_B^1 (10^{-12} \text{ м/Вт})$	$g_B^2 (10^{-12} \text{ м/Вт})$
			min	max	(min + max)/3		
SMF-28	5.5	10.4	40.1	38.5	26.2	13.6	16.0
P	11	7.20	64.3	69.6	44.63	9.6	9.4
Al	8.5	7.83	59.8	74.2	44.67	7.8	9.4
Ge	8.2	8.82	38.3	40.9	26.4	13.8	15.9
Al + Ge (I), 100 мкм	10	8.76	82.2	85.3	55.83	5.6	7.5
Al + Ge (I), 125 мкм		7.93	64.9	78.4	47.77	7.3	8.8
Al + Ge (II), 100 мкм	9.5	10.09	99.7	117.1	72.27	4.4	5.8

*Приведено для длины волны 1550 нм.

3. Спектры усиления ВРМБ

Измерение спектра ВРМБ осуществлялось прямым методом [10] с использованием установки, схема которой представлена на рис.2. Сигнал одночастотного диодного лазера Д1 усиливался эрбиевым волоконным усилителем ЭУ и через циркулятор Ц вводился в исследуемый световод ИС. Навстречу ему, через изолятор ИЗО и контроллер поляризации КП, вводилось пробное излучение мало-мощного сканирующего по частоте одночастотного диодного лазера Д2. Изменение частоты излучения Д2 достигалось за счет пилообразной формы тока накачки. Смещение частоты с током было предварительно откалибровано. Усиленный сигнал регистрировался фотоприемником ФП. Достоинством данного метода является возможность измерения коэффициента бриллюэновского усиления напрямую.

Однако стоит отметить, что коэффициент усиления зависит от поляризации излучения накачки по отношению к поляризации сканирующего излучения (излучение лазерных диодов линейно поляризовано). Таким образом, меняя поляризацию сканирующего излучения, можно получить минимальное и максимальное усиление. Если бы в схеме использовались только сохраняющие поляризацию световоды, то минимальное усиление (при ортогональности плоскостей поляризации пробного излучения и излучения накачки) было бы равно нулю, а максимальное (плоскости поляризаций совпадают) – g_B . (g_B – коэффициент бриллюэновского усиления в случае линейной поляризации накачки и пробного излучения в одной плоскости). Однако, если поляризация не сохраняется, различные внешние факторы (изгиб световода, механические напряжения и пр.) приводят к изменению состояния поляризации по длине световода. По этой причине различие между минимальным и максимальным коэффициентами усиления, измеряемыми (с использованием

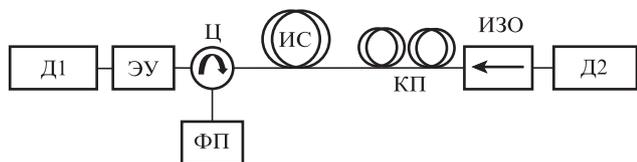


Рис.2. Схема установки для измерения спектра ВРМБ.

контроллера поляризации) при различных состояниях поляризации излучения накачки и пробного сигнала, оказывается меньше: минимальное усиление равно $1/3 g_B$, а максимальное – $2/3 g_B$ [22]. Таким образом, получить коэффициент усиления для линейной поляризации можно, сложив измеренные спектры, соответствующие минимальному и максимальному усилению.

Полученные спектры представлены на рис.3. Видно, что спектры световодов, не обладающих акустической антиволноводной структурой (P, Al, Ge, SMF-28) имеют один ярко выраженный пик, тогда как спектры исследуемых световодов (Al+Ge, I и II) имеют два соизмеримых пика, наличие которых обусловлено взаимодействием оптической моды с акустическими модами сердцевинки и оболочки [23,24]. Можно видеть, что уширение спектра ВРМБ сопровождается уменьшением максимального усиления. Так, в разработанных световодах с неоднородной акустической антиволноводной структурой Al + Ge (II), 100 мкм, Al + Ge (I), 100 мкм и Al + Ge (II), 125 мкм максимальные коэффициенты составили (4.4, 5.6 и 7.3) × 10⁻¹² м/Вт соответственно. В то же время максимальный коэффициент усиления световодов с равномерным легированием сердцевинки составил (13.8, 13.6, 9.6 и 7.8) × 10⁻¹² м/Вт для Ge, SMF-28, P и Al соответственно. Таким образом, в лучшем световоде Al + Ge (II), 100 мкм коэф-

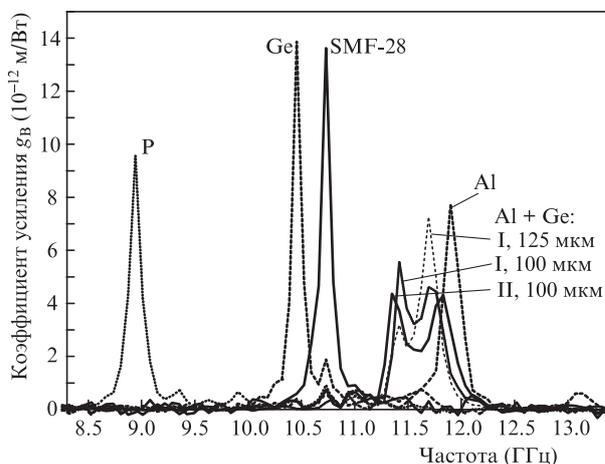


Рис.3. Спектры ВРМБ.

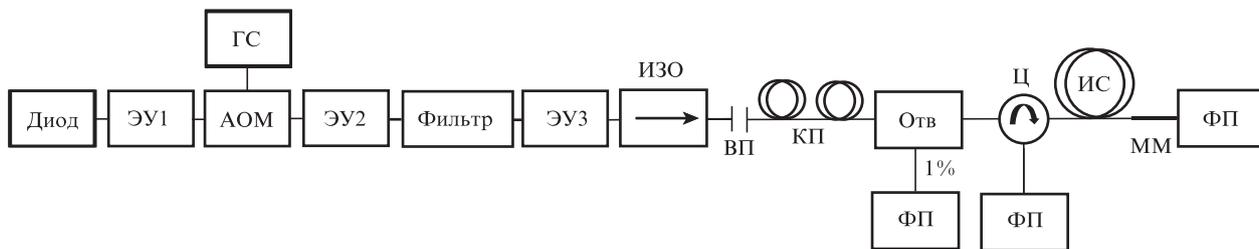


Рис.4. Схема установки для измерения порога ВРМБ.

коэффициент усиления ВРМБ в 3.1 раза меньше, чем в стандартном световоде SMF-28.

4. Измерение порога ВРМБ

Схема установки для измерения порога ВРМБ показана на рис.4. Источником сигнала служил лазерный диод с длиной волны 1555 нм. Нами использовались два эрбиевых усилителя с длиной волны накачки 1460 нм (ЭУ1 и ЭУ2) и один с длиной волны накачки 980 нм (ЭУ3). Из сигнала диода, прошедшего через усилитель ЭУ1, при помощи акустооптического модулятора АОМ, подключенного к генератору сигналов ГС, вырезались импульсы длительностью 500 нс с частотой следования 2 кГц; после чего узкополосным фильтром с шириной полосы пропускания ~1 нм на 1555 нм отсекались полностью люминесценция и прошедшее излучение накачки. Полученный сигнал, усиленный в усилителе ЭУ3 до пиковой мощности 30 Вт, через изолятор ИЗО, воздушную прослойку с переменным расстоянием между сколами ВП, контроллер поляризации КП, ответвитель Отв и циркулятор Ц заводился в исследуемое волокно ИС.

Форма управляющего акустооптическим модулятором сигнала подбиралась таким образом, чтобы выходной импульс на выходе АОМ имел форму, близкую к прямоугольной (рис.5). Однако сделать это можно было лишь для фиксированных мощностей накачки первого и второго усилителей. Поэтому для управления мощностью на входе исследуемого световода использовалась воздушная прослойка с переменным расстоянием между торцами волокон. Для предотвращения отражения от выходного конца ИС к нему был приварен отрезок многомодового световода ММ (60/125 мкм). Сигнал ВРМБ регистрировался при помощи циркулятора. Мощность введенного в световод сигнала определялась на 1%-ном выходе ответвителя. Порог ВРМБ измерялся для световодов длиной 50 м. Следует отметить, что длина пространственного импульса при его длительности в 500 нс состав-

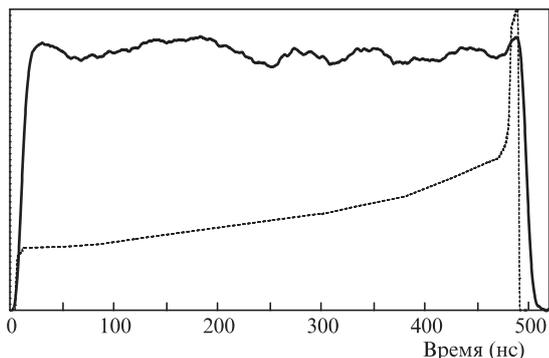


Рис.5. Форма управляющего сигнала (пунктирная кривая) и форма импульса излучения (сплошная кривая).

ляет примерно 100 м. Таким образом, измеренный порог соответствует порогу, который был бы определен в непрерывном режиме при средней мощности, равной пиковой мощности импульса. Порог фиксировался при превышении отраженным сигналом 1% от введенной в световод мощности.

Как уже отмечалось выше, порог ВРМБ зависит от поляризации излучений. В данном случае минимальный порог I_{th} достигается при линейной поляризации излучения, а максимальный ($2I_{th}$) – для круговой. Так же, как и в предыдущем случае, наличие неконтролируемого двулучепреломления в исследуемом световоде приводит к тому, что поляризация не будет сохраняться вдоль его длины. Учтеть данный факт можно, введя фактор x ($0 < x < 0.5$), соответствующий «деполяризации» излучения в исследуемом световоде. Таким образом, максимальный порог (поляризация близка к круговой) соответствует $I_{max} = (2 - x)I_{th}$, а минимальный (поляризация близка к линейной) – $I_{min} = (1 + x)I_{th}$, где I_{th} – порог для линейной поляризации. С учетом измеренных порогов оценивался коэффициент усиления по формуле [25]:

$$g_B = \frac{2I}{I_{th}} = \frac{2I}{I(I_{min} + I_{max})/3},$$

где $l = 50$ м – длина измеряемых световодов.

В качестве примера на рис.6,а показаны характерные зависимости отраженного сигнала от плотности мощности накачки для световода Ge, измеренные для двух положений контроллера поляризации, при которых обеспечивались максимальный и минимальный пороги ВРМБ, а также оценочные зависимости в случае линейно поляризованного излучения (жирная кривая) и излучения с круговой поляризацией (штриховая кривая). На рис.6,б представлены оценочные зависимости при линейной поляризации излучения для всех исследуемых световодов. Подчеркнем, что, откладывая по оси абсцисс именно интенсивности введенного излучения, мы исключаем влияние диаметра поля моды в исследуемом световоде на результаты сравнения. Данное утверждение легко проверить, сравнив пороги для световодов Ge и SMF-28 с сердцевиной, легированной оксидом германия, у которых превышение показателя преломления сердцевины и площадь поля моды различаются почти в полтора раза. Тем не менее, пороги ВРМБ в данных световодах практически идентичны.

Оценка максимального коэффициента усиления ВРМБ дублирует более точные прямые измерения коэффициента усиления (см. разд.3) и показывает, что погрешность расчета порога ВРМБ через коэффициент усиления и обратного расчета может достигать 10%–20%.

Для световодов с равномерным легированием сердцевины – фосфоросиликатного и алюмосиликатного (формально с антиволноводным акустическим профилем) – порог ВРМБ практически одинаков и составляет около

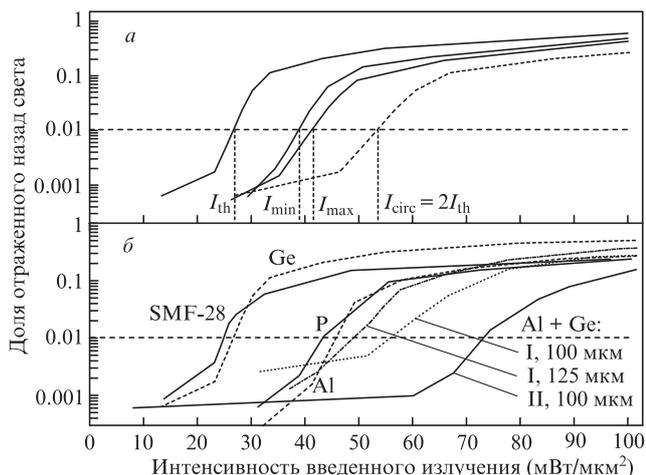


Рис.6. Зависимости отраженного сигнала от уровня плотности мощности в сердцевине световода: *a* – измеренные при двух крайних положениях контроллера поляризации (сплошные кривые) и оценочные – для случая линейной (жирная кривая) и круговой (штриховая кривая) поляризации излучения; *б* – оценочные зависимости для случая линейной поляризации для всех исследуемых световодов.

53.6 мВт/мкм², что в 1.7 раза больше порога для германо-силикатных световодов, составляющего ~31.5 мВт/мкм². Для разработанных световодов с неоднородным анти-волноводным акустическим профилем порог ВРМБ оказался существенно выше и составил 57.3 (для Al + Ge (I), 125 мкм), 67.0 (для Al + Ge (I), 100 мкм) и 86.7 мВт/мкм² (для Al + Ge (II), 100 мкм). Таким образом, максимальное полученное повышение порога ВРМБ составило 4.4 дБ по сравнению с порогом для стандартного световода SMF-28. Заметим, что в световоде Al + Ge (II), 100 мкм диаметр поля моды при $\lambda = 1550$ нм равен диаметру поля моды в SMF-28, а значит, этот световод может быть успешно использован для замены световода SMF-28 в приложениях, чувствительных к ВРМБ.

5. Обсуждение результатов и выводы

Проведенное исследование спектров ВРМБ в различных световодах, обладающих как волноводной, так и антиволноводной акустической структурой, показало, что равномерное по радиусу легирование сердцевин световода не позволяет существенно увеличить порог ВРМБ даже в световоде с антиволноводным акустическим профилем (алюмосиликатный световод). Для достижения эффективного подавления ВРМБ в алюмосиликатном световоде длина волны отсечки должна быть в три раза меньше рабочей длины волны, что приводит к высокой чувствительности к изгибам таких световодов [19]. В то же время неравномерный по радиусу антиволноводный акустический профиль, сформированный совместным легированием оксидами алюминия и оксидами германия, позволил заметно (примерно в 3 раза) повысить порог ВРМБ. Важно отметить, что «вогнутый» треугольный акустический профиль (заготовка I) оказался менее эффективным для подавления ВРМБ, чем «выпуклый», близкий к параболическому. Данный факт коррелирует с теоретическими расчетами по оптимизации акустическо-

го профиля, проведенными в работе [20]. И хотя ранее уже указывалось, что в световодах с треугольным анти-волноводным профилем возможно подавление ВРМБ [16, 17, 20, 21], в настоящей работе впервые показано, что наличие неравномерного акустического профиля является необходимым условием для повышения порога ВРМБ. Более того, даже в этом случае эффективного подавления ВРМБ удастся добиться лишь при определенных волноводных параметрах световода, так как спектр ВРМБ имеет сильную зависимость от диаметра сердцевин световода. Продемонстрировано повышение порога ВРМБ на 4.4 дБ по сравнению с порогом германо-силикатного световода SMF-28, имеющего такой же диаметр поля моды.

Авторы выражают глубокую благодарность Е.М.Дианову и С.Л.Семенову за постоянную поддержку и интерес, проявленный к данной работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-38-20923).

1. Takahashi M., Tadakuma M., Hiroishi J., Yagi T. *Proc. ECOC 2007* (Berlin, 2007, paper P014).
2. Tateda M., Ohashi M., Shiraki K. *Proc. OFC* (San Jose, 1993, paper ThJ4).
3. Achmetshin U.G., Bubnov M.M., Guryanov A.N., Dianov E.M., Khopin V.F., Sysoliatin A.A., LiM.-J., Li S., Nolan D.A. *Proc. ECOC 2005* (Glasgow, 2005, paper OFH5).
4. Nagel J., Temyanko V., Dobler J., Salganskii M., Likhachev M., Alexeev V., Bubnov M., Dianov E., Norwood R., Peyghambarian N. *IEEE Photon. Conf.* (Bellevue, 2013, pp 271 – 272).
5. Liu A. *Opt. Express*, **15**, 977 (2007).
6. Rothenberg J.E., Thielen P.A., Wickham M., Asman C.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6873**, 68730O (2008).
7. Thomas P.J., Rowell N.L., van Driel H.M., Stegeman G.I. *Phys. Rev. B*, **19**, 4986 (1979).
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. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 631 (2004).
11. Jen C.-K., Neron C., Shang A., Abe K., Bonnel L., Kushibiki J. *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 712 (1993).
12. Dragic P.D., Liu C.H., Papen G.C., Galvanauskas A. *Conf. Lasers and Electro-Optics* (Baltomor, 2005, p. CThZ3).
13. Dragic P.D., in *2006 Digest LEOS Summer Topical Meeting* (Quebec, 2006, pp. 3, 4).
14. Nakanishi T., Tanaka M., Hasegawa T., Hirano M., Okuno T., Onishi M. *Proc. ECOC 2006* (Cannes, 2006, Vol. 6, paper Th. 4.2.2).
15. Li M.J., Chen X., Wang J., Gray S., Liu A., Demeritt J.A., Ruffin A.B., Crowley A.M., Walton D.T., Zenteno L.A. *Opt. Express*, **15** (13), 8290 (2007).
16. Mermelstein M.D., Andrejco M.J., Fini J., Yablon A., Headley C., DiGiovanni D.G., McCurdy A.H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6873**, 68730N (2008).
17. Mermelstein M.D. *Opt. Express*, **17**, 16225 (2009).
18. Zou W., He Z., Hotate K. *Opt. Express*, **16**, 18804 (2008).
19. Лихачев М.Е., Алексеев В.В., Бубнов М.М., Яшков М.В., Вечканов Н.Н., Гурьянов А.Н., Пейгамбарян Н., Темьянко В., Нагел Дж. *Квантовая электроника*, **44** (11), 1043 (2014).
20. Наний О.Е., Павлова Е.Г. *Квантовая электроника*, **39** (8), 757 (2009).
21. Villafranca A., Lázaro J.A., Salinas I., Garcés I. *Opt. Express*, **13**, 7336 (2005).
22. van Deventer M.O., Boot A.J. *J. Lightwave Technol.*, **12**, 585 (1994).
23. Yoo S., Codemard C.A., Jeong Y., Sahu J.K., Nilsson J. *Appl. Opt.*, **49**, 1388 (2010).
24. Dragic P.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7195**, 71952L-1 (2009).
25. Smith R.G. *Appl. Opt.*, **11**, 2489 (1972).