

Волоконный световод со смещённой сердцевиной для подавления ВРМБ

М.М.Худяков, В.В.Алексеев, Д.С.Липатов, А.Н.Гурьянов,
В.Темьянко, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачёв

С целью повышения порога вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна (ВРМБ) изготовлен волоконный световод со смещённой относительно оси волокна сердцевиной, высоколегированной оксидом германия. Предложен способ уширения спектра ВРМБ при намотке такого световода на катушку малого диаметра, и продемонстрировано уширение спектра на 5.4 дБ, последнее позволяет оценить повышение порога ВРМБ на 4.1 дБ.

Ключевые слова: ВРМБ, волоконный световод, смещённая сердцевина.

1. Введение

Основанные на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) волоконные лазеры и усилители широко применяются в качестве источников излучения в спектральных областях, которые не доступны излучателям, легированным редкоземельными элементами. При этом в ряде применений, таких как детектирование газов низкой концентрации [1], лидарные измерения концентрации газов в атмосфере [2] и создание лазерных опорных звезд [3], требуется малая спектральная ширина излучения. Однако последнее, при использовании волоконных излучателей большой длины, имеющих высоколегированную сердцевину малого диаметра, приводит к тому, что вынужденное рассеяние Манделъштама – Бриллюэна (ВРМБ) становится главным нелинейным эффектом, который ограничивает их выходную мощность.

Коэффициент усиления ВРМБ обратно пропорционален ширине спектра его усиления при ширине линии излучения, много меньшей ширины спектра ВРМБ. Существует ряд способов уширения спектра ВРМБ в волоконном световоде (ВС): модификация акустического профиля (распределения скорости звука по сердцевине ВС) [4–10], создание градиента температуры [11], натяжения [12] или концентрации легирующей добавки в сердцевине [13, 14] по длине ВС. В первом методе используется изменение распределения скорости звука в сердцевине ВС путём одновременного легирования ее несколькими добавками, одна из которых повышает скорость звука

(оксид алюминия), а другие – понижают (оксиды германия и фосфора, фтор). В результате спектр ВРМБ такого световода приобретает сложную структуру с несколькими пиками со сравнительно близкими амплитудами, что приводит к повышению порога ВРМБ на 6.4 дБ для пассивного [4] и 11.2 дБ для активного световода [5] по сравнению с порогом ВРМБ для стандартных ВС с аналогичными оптическими параметрами. Однако этот метод требует точного контроля концентраций легирующих добавок для достижения существенного повышения порога, что обуславливает технологическую сложность и высокую стоимость таких ВС. Наличие градиента температуры позволяет сдвинуть частоту пика ВРМБ по длине ВС, уширяя тем самым его спектр. Поэтому сигнал ВРМБ из одной части световода может усиливаться только там, где еще есть перекрытие спектров, что уменьшает эффективную длину взаимодействия сигналов ВРМБ от различных участков ВС. Использование градиентов температуры [11], натяжения [12] и легирующей добавки [14] позволило повысить порог ВРМБ на 4.8, 15.3 и 6 дБ соответственно. Большой разброс результатов объясняется тем, что максимальная температура ВС в [11] была ограничена температурой разрушения полимерного покрытия (140 °С), это обеспечило сдвиг спектра ВРМБ лишь на 180 МГц. Максимальный градиент легирующей добавки определяется необходимостью сохранения волноводных свойств ВС. Наилучший результат [12] обусловлен тем, что максимальное натяжение ВС, ограниченное его механической прочностью, позволяет получить на порядок больший сдвиг частоты пика ВРМБ – 1.7 ГГц при растяжении световода $\varepsilon = \Delta l/l = 3.1\%$ (l – длина нерастянутого ВС, Δl – изменение длины при натяжении). К сожалению, использование данных методов в практических условиях весьма затруднительно из-за необходимости создания однородного градиента для достижения максимального результата. Более того, долговременная надёжность ВС в условиях высокой температуры или сильного растяжения сильно сокращается.

В настоящей работе нами предложен и реализован новый метод подавления ВРМБ в световоде путём смещения его сердцевины к краю оболочки с последующим наматыванием световода на катушку малого диаметра. Это позволяет создать в сердцевине ВС периодический гради-

М.М.Худяков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул.Вавилова, 38; Московский физико-технический институт, Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: DAngeL.74@gmail.com

В.В.Алексеев, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачёв. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул.Вавилова, 38

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

В.Темьянко. The University of Arizona, Wyant College of Optical Sciences 1630 E. University Blvd., Tucson, AZ 85721, USA

Поступила в редакцию 1 сентября 2020 г., после доработки – 7 декабря 2020 г.

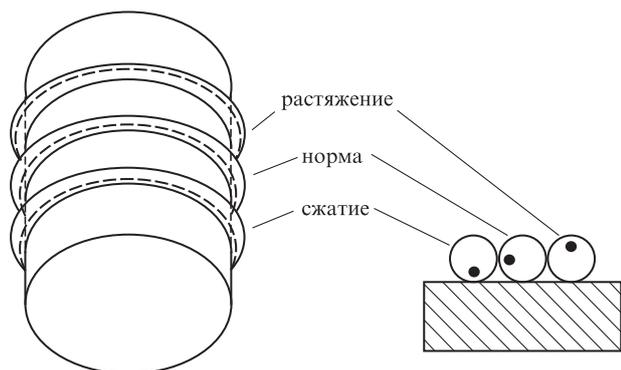


Рис.1. Схема намотки ВС со смещённой сердцевинной.

ент деформации без сложной системы, используемой в [12]. Причем в нашей схеме сердцевина ВС претерпевает периодическое растяжение и сжатие (рис.1), что позволяет удвоить сдвиг частоты пика ВРМБ при той же величине деформации по сравнению с вариантом, обеспечивающим только растяжение световода. Таким образом, максимальная деформация для достижения одного и того же уширения спектра ВРМБ уменьшается вдвое, что положительно сказывается на долговременной прочности ВС.

2. Конструкция световода

Заготовка ВС была получена методом MCVD. Легирование сердцевины оксидом германия (24 мол. % GeO_2) обеспечило разность показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = 0.035$. Соотношение диаметров сердцевины и оболочки заготовки составляло $\sim 1/4$. Затем для уменьшения этого соотношения на неё были нахлопнуты несколько стеклянных труб, после чего полученная новая заготовка была несоосно сполитрована так, чтобы ее сердцевина была сильно смещена к краю оболочки. Полученный после вытяжки этой заготовки световод имел диаметры оболочки и сердцевины 125 и 8 мкм, при этом ось сердцевины была на расстоянии 13 мкм от края оболочки (рис.2,а). Рассчитанный диаметр поля фундаментальной моды на длине волны 1550 нм составил 6.7 мкм, а длина волны отсечки второй моды была 1750 нм. Данный ВС не

является строго одномодовым на рабочей длине волны 1555 нм, однако наличие сильных изгибов при его намотке на катушку малого диаметра приводит к большим потерям для высших мод и обеспечивает практически одномодовый режим работы. Для повышения прочности и долговременной надёжности помимо полимерного покрытия непосредственно на световод наносилось также герметичное углеродное покрытие [15]. Это позволило намотать ВС на катушку с внешним диаметром 28 мм без риска обрывов световода на протяжении его срока службы.

Основную трудность при использовании ВС со смещённой сердцевинной вызывает сварка их со стандартными ВС. Для этого необходимо совместить смещённую сердцевину ВС с центрированной сердцевинной стандартного ВС. При несоосной сварке световодов возникающие силы поверхностного натяжения стремятся сместить материалы обоих световодов к общей оси. Для уменьшения смещения сварка производилась при низком токе дуги и короткой её длительности. Поскольку это не исключает смещения материала сердцевины ВС, необходима его дополнительная компенсация до начала сварки. Юстировка обоих ВС осуществлялась по амплитуде сигнала, который вводился в стандартный ВС и регистрировался на другом конце ВС со смещённой сердцевинной. Перемещая последний по оси, проходящей через его центр и центр сердцевины (ось x на рис.2,б), мы находили максимум сигнала, а затем, продолжая дальнейшее смещение от оси стандартного ВС, останавливались при достижении сигналом уровня 80%–90% от максимума. Конкретная величина сигнала зависит от вязкости сердцевины ВС в процессе сварки, от длительности и мощности сварочной дуги. Оптимизация процесса позволила получить потери на одну сварку световодов менее 0.5 дБ.

3. Спектр усиления ВРМБ

Схема установки для измерения спектра ВРМБ представлена на рис.3. Излучение непрерывного лазерного диода ЛД с распределённой обратной связью (длина волны 1555 нм, ширина линии менее 2 МГц) усиливалось до 20 мВт при помощи эрбиевого волоконного усилителя ЭВУ1 с накачкой по сердцевине. Затем усиленное излучение делилось на две равные части. Одна часть выступала

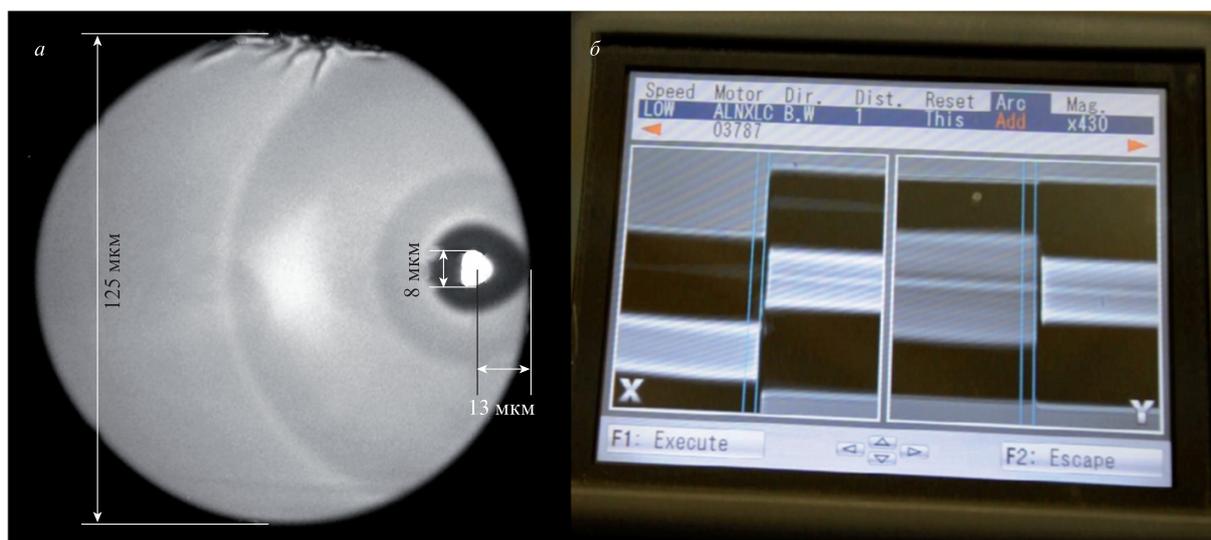


Рис.2. Фотографии торца ВС со смещённой сердцевинной (а) и процесса сварки ВС со смещённой сердцевинной со стандартным ВС (б).

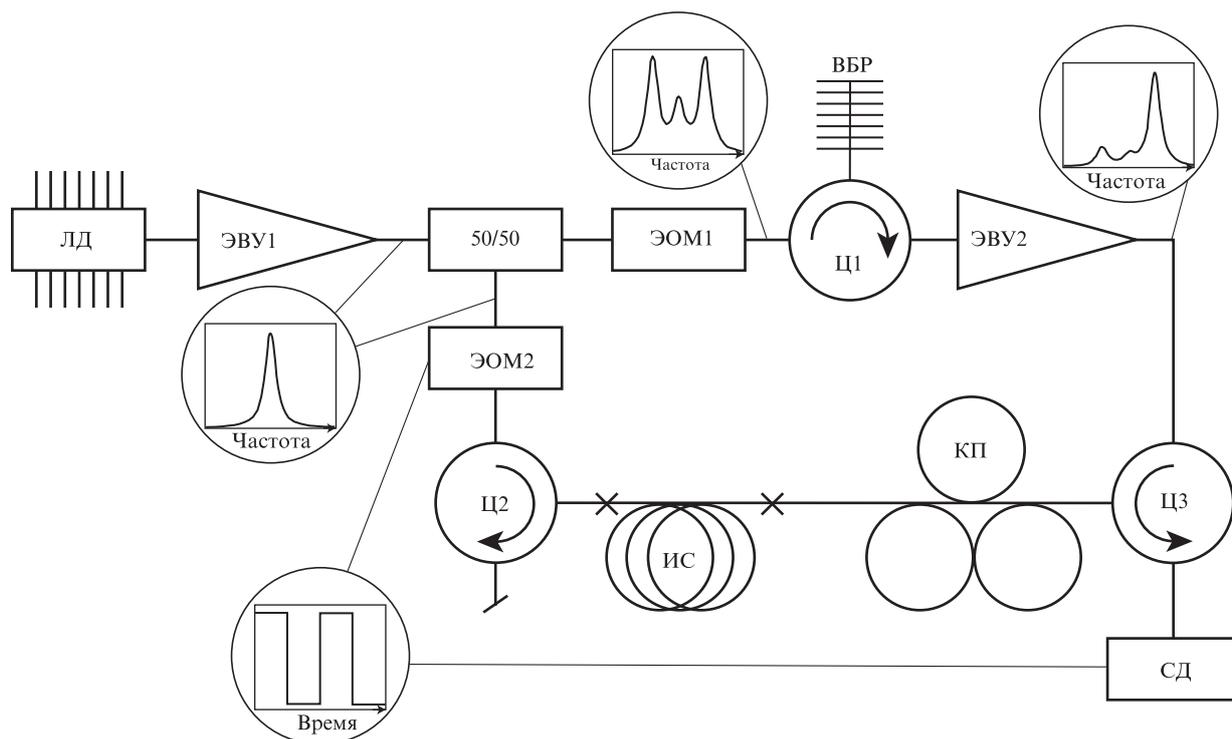


Рис.3. Схема измерения спектра ВРМБ: ЛД – лазерный диод; ЭВУ1, ЭВУ2 – эрбиевые волоконные усилители; ИС – исследуемый ВС; ЭОМ1, ЭОМ2 – электрооптические модуляторы; Ц1, Ц2, Ц3 – циркуляторы; ВБР – волоконная брэгговская решётка; КП – контроллер поляризации; СД – синхронный детектор.

в роли излучения накачки для исследуемого ВС (ИС) в процессе ВРМБ, которое модулировалось электрооптическим модулятором ЭОМ1 на частоте от 8 до 12 ГГц. Центральная и низкочастотная компоненты отфильтровывались при помощи циркулятора Ц1 и волоконной брэгговской решётки ВБР с шириной полосы пропускания по полувысоте 0.08 нм. Оставшаяся высокочастотная компонента усиливалась при помощи волоконного усилителя ЭВУ2 до 100 мВт и заводилась в ИС через циркулятор Ц3 и контроллер поляризации КП. Вторая часть излучения непрерывного ЛД выполняла роль «сигнала» на центральной частоте. Она модулировалась с частотой 1 кГц электрооптическим модулятором ЭОМ2 и вводилась в ИС через циркулятор Ц2. Усиленный ВРМБ-сигнал регистрировался при помощи синхронного детектора СД.

Коэффициент усиления ВРМБ зависит от поляризации излучения накачки по отношению к сигналу в каждой точке ВС. Таким образом, изменение положения контроллера поляризации КП позволяло измерять максимальное и минимальное усиление. При использовании ВС, сохраняющего поляризацию, минимальное значение усиления нулевое, а максимальное значение соответствует коэффициенту усиления ВРМБ. В случае ВС без сохранения поляризации минимальное значение соответствует 1/3 коэффициента усиления ВРМБ, а максимальное – 2/3 [16]. Таким образом, спектральная зависимость коэффициента ВРМБ получалась путём сложения его минимального и максимального значений.

Спектры усиления ВРМБ измерялись для относительно недеформированного отрезка ВС длиной 50 м, намотанного на катушку диаметром 180 мм, а также для того же отрезка, деформированного намоткой на катушку диаметром 28 мм. При таком диаметре намотки суммарная

деформация растяжения и сжатия ϵ составила 0.7%. Результаты измерений спектра ВРМБ приведены на рис.4. Для недеформированного ВС ширина спектра на

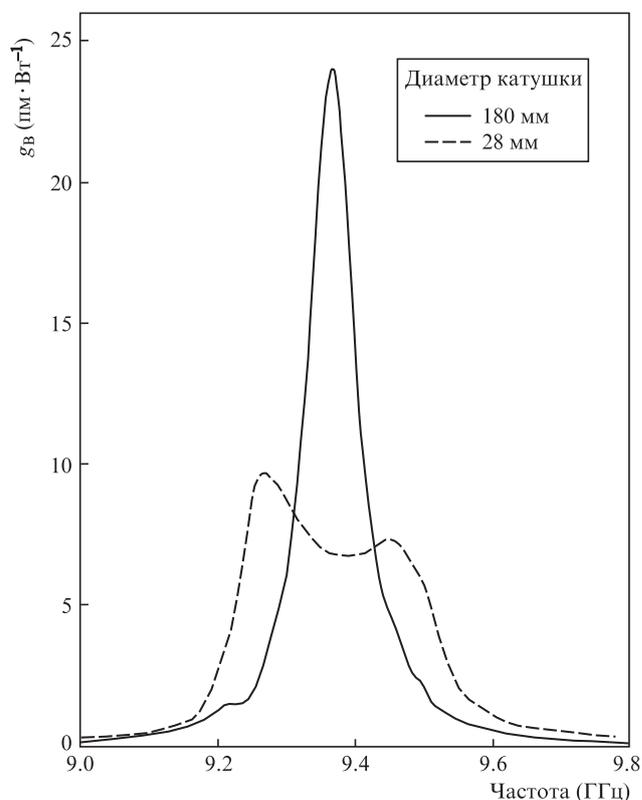


Рис.4. Измеренная спектральная зависимость коэффициента усиления ВРМБ для световода, намотанного на катушки диаметром 180 и 28 мм.

полувысоте составила 78 МГц при пиковом значении коэффициента усиления $24 \text{ пм} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Для ВС, намотанного на катушку диаметром 28 мм, ширина на полувысоте увеличилась до 272 МГц, а пиковое усиление уменьшилось до $9.3 \text{ пм} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Следует отметить, что сдвиг частоты ВРМБ в положительную сторону пропорционален деформации ВС при его растяжении, а в отрицательную – при сжатии. Таким образом, два пика (рис.4) в спектре ВС, намотанного на катушку диаметром 28 мм, отвечают положениям световода на катушке, при которых сердцевина была наиболее сжата (левый пик) и максимально растянута (правый пик). Из-за невозможности при намотке точно контролировать поворот ВС относительно своей оси у большей его части смещённая сердцевина оказалась ориентированной к центру катушки, что привело к «перекоосу» спектра усиления и уменьшению величины максимального подавления ВРМБ до 4.1 дБ.

4. Заключение

Изготовлен ВС со смещённой относительно оси волновода сердцевинной с большой концентрацией оксида германия. По результатам измерений спектров ВРМБ световода, намотанного на катушки с диаметрами 180 и 28 мм, получено подавление ВРМБ на 4.1 дБ. Следует отметить, что большего подавления можно достичь при меньшем диаметре катушки, однако механическая прочность ВС ограничивает диаметр катушки. Так, у коммерчески доступного ВС SMF-28 минимальный диаметр долговременного изгиба составляет 16 мм для отрезка длиной 10 м [17]. При таком диаметре намотки ВС со смещённой сердцевинной суммарная деформация составит 1.2%, что приведёт к уширению спектра ВРМБ на 7.7 дБ по сравнению со спектром недеформированного ВС.

Отметим также, что основная перспективность данного метода заключается в возможности его комбинирования с методом модификации акустического профиля ВС. При использовании последнего в [4] был получен спектр ВРМБ в виде трех пиков, удалённых друг от друга более чем на 200 МГц. В этом случае использование ВС

со смещённой сердцевинной позволит получить повышение порога ВРМБ более 8 дБ без уменьшения диаметра катушки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90281.

1. Bauer R., Legg T., Mitchell D., Flockhart G.M.H., Stewart G., Johnstone W., Lengden M. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 3773 (2015).
2. Dobler J.T., Braun M., Nagel J., Temyanko V.L., Zaccheo T.S., Harrison F.W., Browell E.V., Kooi S.A. *Proc. SPIE*, **8601**, 86011Q (2013).
3. Duering M., Kolev V., Luther-Davies B. *Opt. Express*, **17**, 437 (2009).
4. Khudyakov M.M., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Lobanov A.S., Guryanov A.N. *Proc. SPIE*, **10083**, 1008313 (2017).
5. Mermelstein M.D., Andrejco M.J., Fini J., Yablon A., Headley C. III, DiGiovanni D.J., McCurdy A.H. *Proc. SPIE*, **6873**, 68730N (2008).
6. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 631 (2004).
7. 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**, 8290 (2007).
8. Худяков М.М., Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Гурьянов А.Н., Темьянко В., Нагел Дж., Пейгамбарян Н. *Квантовая электроника*, **46**, 468 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 468 (2016)].
9. 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**, 1043 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 1043 (2014)].
10. Наний О.Е., Павлова Е.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 757 (2009) [*Quantum Electron.*, **39**, 757 (2009)].
11. Hansryd J., Dross F., Westlund M., Andrekson P.A., Knudsen S.N. *J. Lightwave Technol.*, **19**, 1691 (2001).
12. Engelbrecht R., Mueller M., Schmauss B., in *2009 IEEE/LEOS Winter Topicals Meeting Series* (Innsbruck, Austria, 2009, p. 248).
13. Nagel J., Temyanko V., Dobler J., Salganskii M., Likhachev M., Alexeev V., Bubnov M., Dianov E., Norwood R., Peyghambarian N., in *2013 IEEE Photonics Conf.* (Bellevue, WA, 2013, Vol. 2, p. 271).
14. Evert A., James A., Hawkins T., Foy P., Stolen R., Dragic P., Dong L., Rice R., Ballato J. *Opt. Express*, **20**, 17393 (2012).
15. Bogatyryov V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Rumjantsev S.D., Semjonov S.L. *Opt. Eng.*, **30**, 690 (1991).
16. Foschini G.J., Poole C.D. *J. Lightwave Technol.*, **9**, 1439 (1991).
17. <https://www.corning.com/microsites/coc/oem/documents/specialty-fiber/WP3690-Mech-Reliability-of-COF-in-bending.pdf>.