

ИЗМЕРЕНИЕ ПОРОГА ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА В СВЕТОВОДАХ С АКУСТИЧЕСКОЙ АНТИВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Худяков М.М.^{1,2}, Лихачёв М.Е.², Бубнов М.М.², Липатов Д.С.³, Гурьянов А.Н.³, Темялко В.А., Нагел Дж.⁴, Пейгамбарян Н.⁴

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет)

² Научный центр волоконной оптики РАН

³ Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН

⁴ College of Optical Sciences, University of Arizona

Введение

Узкополосные (с шириной линии менее 100 МГц) источники лазерного излучения с высокой пиковой либо средней мощностью в настоящее время широко используются в распределенных датчиках, спектроскопии, астрономических системах адаптивной оптики, дистанционном зондировании (LIDAR - Light Detection And Ranging). Основным фактором, который ограничивает максимальную выходную пиковую или среднюю мощность, является вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ), обладающее среди прочих нелинейных эффектов наименьшим порогом и в первую очередь проявляющееся при повышении выходной мощности узкополосных лазеров [1].

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 [2]. Кроме того, можно изменять профиль показателя преломления световода вдоль длины путем переменного легирования заготовки [3] [4], а также создавать по длине световода температурный градиент [5] либо переменные напряжения [6]. 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. 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 [7]. Создание антиволноводной акустической структуры могло бы решить данную проблему и, тем самым, повысить порог ВРМБ.

Среди легирующих добавок, используемых при изготовлении световодов на основе кварцевого стекла, только оксид алюминия повышает оптический показатель преломления и понижает акустический [8], 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 сравнению со световодом с германосиликатной сердцевиной [9] [10].

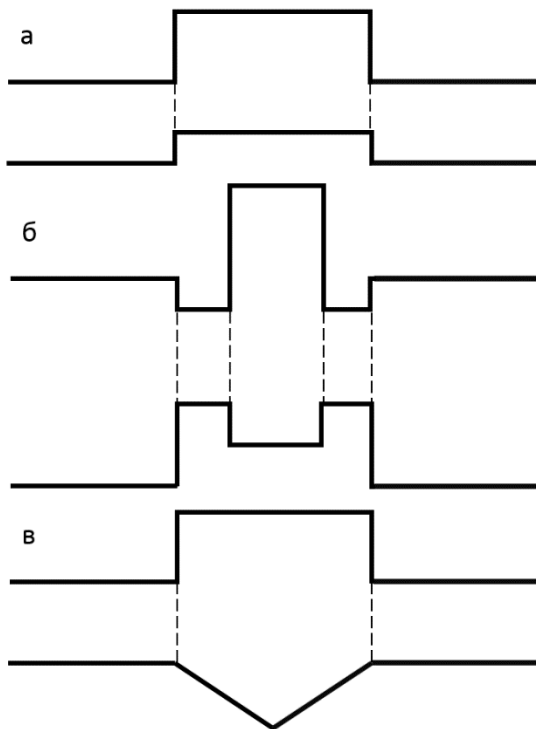


Рисунок 1. Оптический(сверху) и акустический(снизу) профили показателя преломления. (а)-обычный, (б)-ступенчатый, (в)-треугольный.

Развитие данного подхода для иных легирующих добавок сердцевины так же предложено в статье [8]. В этой работе показано, что, создавая трехслойные световоды, где вокруг сердцевины располагается слой другого состава с акустическим показателем преломления большим чем в сердцевине, возможно так же добиться акустически антиволноводного профиля, сохранив при этом световедущие свойства. Типичный акустический и оптический профили при таком подходе представлены на рисунке 1б.

Стоит отметить, однако, что эффективность данного подхода, вообще говоря, не столь очевидна. Так, например, в работе [11], экспериментально исследовались ВРМБ-характеристики световодов с кварцевой

сердцевинной и фторированной оболочкой. Так как фторсиликатная отражающая оболочка имеет акустический индекс выше нелегированного кварцевого стекла, то такие световоды так же обладают акустически антиволноводной структурой. Однако в [11] было обнаружено, что порог ВРМБ в световодах с кварцевой сердцевиной и фторированной оболочкой не увеличивается по сравнению со световодами с германосиликатной

сердцевинной и кварцевой оболочкой. То есть, наличие антиволноводного профиля само по себе не является достаточным условием для подавления ВРМБ.

В работе [12] было показано, что спектр ВРМБ (а, следовательно, и порог), в значительной степени определяется длиной волны отсечки световода и существенное влияние на спектр ВРМБ играет распределение легирующих добавок по радиусу сердцевинны. Так при равномерном легировании сердцевинны оксидом алюминия максимальная ширина спектра ВРМБ может быть достигнута лишь при достаточно короткой длине волны отсечки. Это, в свою очередь, делает такие световоды чрезвычайно чувствительными к изгибу, что нивелирует практическую ценность таких световодов. Стоит отметить, что в свете вышесказанного перспективность подхода использующего трехслойные световоды так же вызывает сомнения. Дело в том, что такой подход мало отличается от случая равномерного легирования сердцевинны и, соответственно, будет так же требовать работы при очень коротко длине волны отсечки.

Более перспективный подход был предложен в работе [13], где было показано, что для эффективного повышения порога ВРМБ следует создать акустической антиволноводный профиль треугольной формы (рисунок 1в). Такой профиль ускоряет вытекание звука в оболочку и тем самым позволяет добиться уширения спектра ВРМБ при больших диаметрах сердцевинны (и соответственно большей длине волны отсечки).

Целью настоящей работы является проверка данного предположения и сравнение характеристик световодов с обычным и антиволноводным акустическим профилем.

Эксперимент

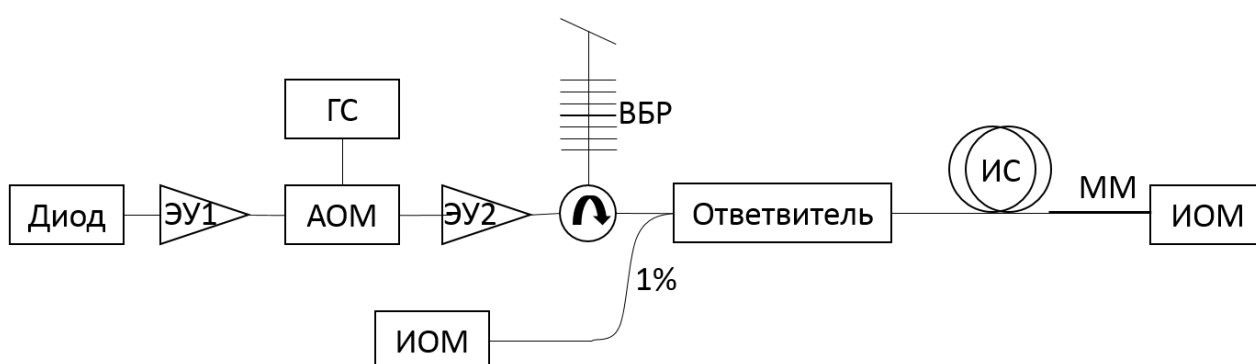


Рисунок 2. Схема установки для измерения порога ВРМБ. ЭУ1 и ЭУ2 – эрбиевые волоконные усилители. АОМ – акустооптический модулятор. ГС-генератор импульсных сигналов. ВБР – волоконная брегговская решётка. ИС – исследуемый световод. ММ – многомодовое волокно. ИОМ – измеритель оптической мощности

Установка для измерения порога ВРМБ представлена на рисунке 2. В качестве источника сигнала использовался лазерный диод с длиной волны 1555нм. Диод работал в непрерывном режиме. Были использованы два эрбиевых волоконных усилителя с длиной

волны накачки 1460нм. Сигнал после первого усилителя проходил через акустооптический модулятор. На вход драйвера с генератора сигналов Г5 78 подавались

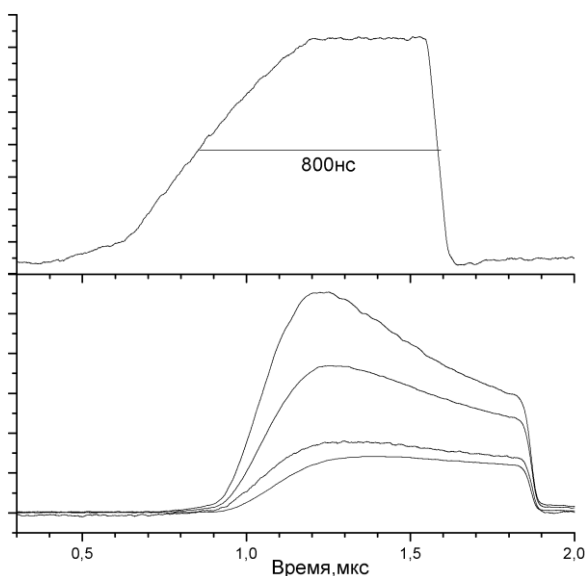


Рисунок 3. Сигналы: (а)-выход генератора сигналов; (б)-после второго усилителя.

импульсы длиной 800 нс и частотой повторения 3 кГц. Далее полученный импульсный сигнал усиливался вторым эрбиевым услителем.

Стоит отметить, что при усилении столь длинных импульсов до относительно высокой пиковой мощности происходит искажение их формы вследствие снижения населенности верхнего лазерного уровня активной среды по мере прохождения импульса. Для выправления его формы передний край подаваемого на акусто-оптический модулятор сигнала был срезан. Это позволило достичь почти

одиноковой мощности на протяжении всего импульса при малых мощностях накачки усилителя второго каскада (две нижние кривые на рисунке 3б). Но этого всё равно не достаточно для полного сглаживания пика на больших мощностях (верхняя кривая на рисунке 3б).

Ещё одной проблемой является то, что при усилении импульсов с относительно низкой частотой повторения (расстояние между импульсами лишь на порядок меньше времени жизни фотона на верхнем лазерном уровне, которое составляет 10 мкс) основной проблемой является появление усиленной спонтанно люминесценции. Для подавления этого нежелательно эффекта, а также устранения непоглощенной накачки на выходе второго каскада усиления нами был использован волоконно-оптический циркулятор с отражающей на длине волны 1555нм волоконной брегговской решёткой (ширина спектра отражения – около 0.5 нм). Усиленный и “очищенный” от люминесценции и накачки сигнал заводился через ответвитель в исследуемый световод. Для предотвращения отражения от выходного торца исследуемого световода к нему был приварен многомодовый световод 60/125 мкм, который в свою очередь был сколот под углом. Сигнал ВРМБ регистрировался через 1% хвост ответвителя.

Отдельно подчеркнем, что величина порога ВРМБ в существенной степени определяется диаметром поля моды световода (или, иными словами – плотностью мощности излучения в сердцевине). Для того, что бы исключить данный эффект из

рассмотрения введенная в световод мощность нормировалась на площадь поля моды. То есть по оси “у” отложена именно плотность мощности в сердцевине световода, что позволяет проводить аккуратное сравнения световодов с различными параметрами сердцевины.

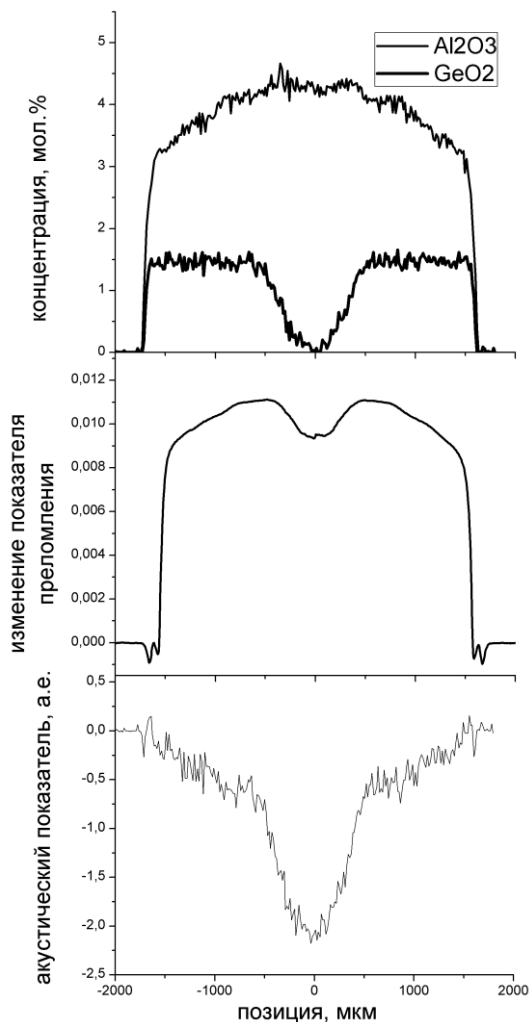


Рисунок 4. Сверху вниз: профиль легирования; оптический профиль; акустический профиль

Характеристики световодов, исследованных в настоящей работе представлены в таблице ниже. В рамках настоящей работы была изготовлена заготовка LD339 световода с сердцевиной, легированной Al₂O₃ и GeO₂, и вытянуты световоды с диаметром 100 мкм и 125 мкм с акустической антиволноводной структурой. Профиль легирования, оценочный оптический и акустический профили показаны на рисунке 4. Такое легирование позволило получить антиволноводный акустический профиль треугольной формы, сохранив оптический волноведущий.

Так же, для сравнения были взяты световоды SMF-28 (легированный только GeO₂) и P918 (легированный только P₂O₅) имеющие равномерное распределение легирующей добавки по сердцевине и, соответственно обычный, волноведущий акустический профиль.

Методом, приведённым в статье [12], были измерены спектры ВРМБ данных световодов. Они представлены на рисунке 5. Видно, что спектр ВРМБ световодов, вытянутых из заготовки LD339 заметно отличается от спектров SMF-28 и P918. В спектрах последних двух световодов наличествует единственный узкий доминирующий пик. Это свидетельствует о том, что практически всё взаимодействие между

световой и звуковой волнами происходит в сердцевине. На спектре световодов LD339 присутствуют два соразмерных пика. Это говорит о том, что оптическая волна взаимодействует в равной степени как со звуковыми модами оболочки, так и сердцевины. Уже из одного этого обстоятельства можно предположить, что порог в световодах LD339 будет заметно выше. В то же время интересно отметить, что равного значения эти два пика (и,

Название световода	Состав сердцевины	Δn сердцевины	Диаметр поля моды, мкм
SMF-28	SiO ₂ - GeO ₂	0,0055	10,4
P918	SiO ₂ -P ₂ O ₅	0,012	8,4
LD339 100мкм	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -GeO ₂	0,011	8,76
LD339 125мкм	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -GeO ₂	0,011	7,93

соответственно, минимальной амплитуды) достигают только в одном из световодов – с диаметром оболочки 100 мкм.

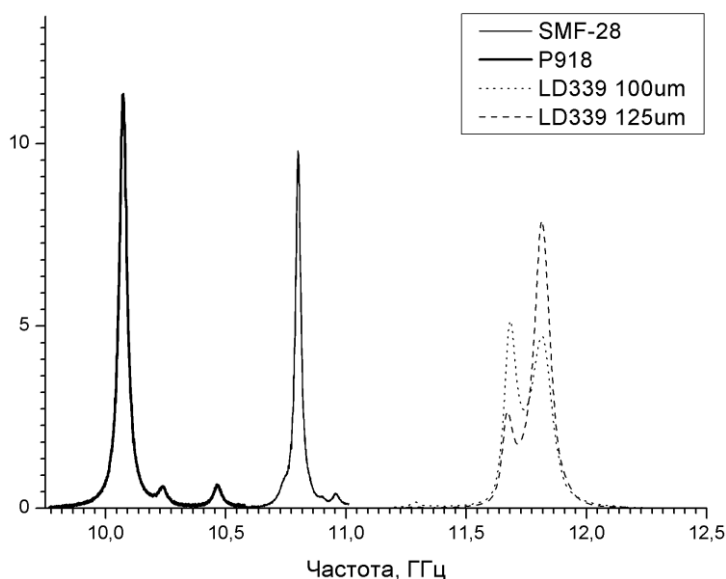


Рисунок 5. Спектры ВРМБ

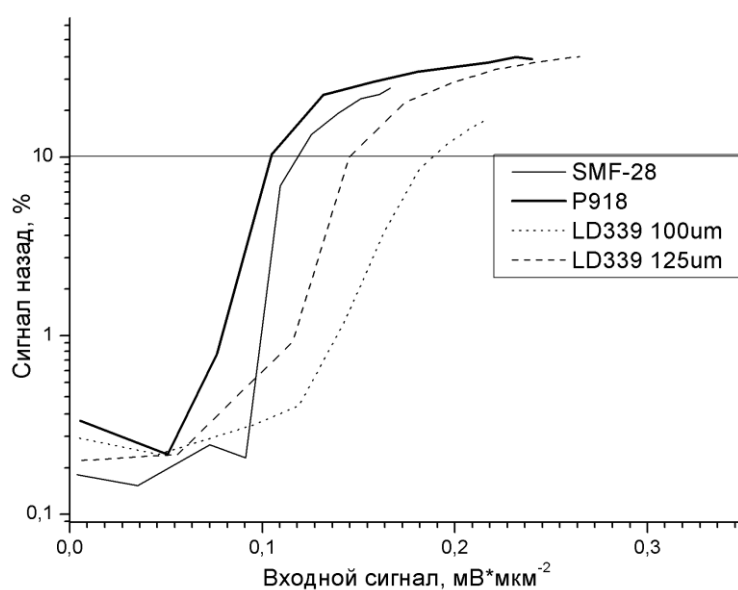


Рисунок 6. Зависимости доли мощности, идущей назад, от входной мощности, нормированной на поле моды

Заключение

Была собрана установка для измерения порога ВРМБ. На ней был произведён ряд измерений для световодов с известными спектрами ВРМБ. Показано, что порог, в соответствии со спектром, для световодов с акустической антиволноводной структурой выше, чем для обычных световодов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-38-20923.

Измеренные зависимости доли сигнала ВРМБ от входной мощности нормированные на площадь поля моды представлены на рисунке 6. Условием порога было выбрано превышение сигналом, идущим назад, 10% от входного. Как и предсказывалось выше, порог ВРМБ для световодов, вытянутых из заготовки LD339 оказался выше, чем порог для световодов SMF-28 и P918, что обусловлено антиволноводными акустическими свойствами этих световодов.

Разница между порогами для 100 мкм и 125 мкм световода объясняется разным диаметром сердцевин. Как было показано в работе [12] спектр ВРМБ существенно зависит от диаметра сердцевин. И действительно, можно видеть, что максимально ширины спектр достигает в световоде с внешним диаметром 100 мкм. Именно в этом световоде наблюдается максимально высокий порог ВРМБ.

Список литературы

- [1] R. G. Smith, "Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering," *Applied Optics*, vol. 11, no. 11, pp. 2489-2494, 1972.
- [2] T. M. H. J. Y. T. Takahashi M., "Proc. ECOC," in *Paper P014*, Berlin, 2007.
- [3] O. M. S. K. Tateda M., "Proc. OFC," in *Paper ThJ14*, San Jose, 1993.
- [4] B. M. G. A. D. E. Achmetshin U.G., "Proc. ECOC," in *Paper OFH5*, Los Angeles, 2005.
- [5] A. Liu, "Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient," *Optics Express*, vol. 15, no. 3, pp. 977-984, 2007.
- [6] J. E. Rothenberg, P. A. Thielen and M. W. a. C. P. Asman, "Fiber Lasers V: Technology, Systems, and Applications," in *Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers*, San Jose, 2008.
- [7] А. Н. П. Б. Я. Зельдович, «Роль звуковода и антизвуковода при ВРМБ в одномодовом световоде,» *Квантовая электроника*, т. 15, № 6, pp. 1297-1304, 1988.
- [8] С.-Н. Л. ., G. C. P. ., а. А. G. Peter D. Draglc, "Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies," in *paper CThZ3*, Baltimore, 2005.
- [9] T. M. H. T. H. M. O. T. M. Nakanishi T., "Proc. ECOC," in *paper Th4.2.2*, Cannes, 2006.
- [10] M. D. Mermelstein, "SBS threshold measurements and acoustic beam propagation modeling in guiding and anti-guiding single mode optical fibers," *Optics Express*, vol. 17, no. 18, pp. 16225-16237, 2009.
- [11] H. Z. H. K. Zou W., "Proc. OFC," in *paper OMH1*, San Diego, 2008.
- [12] В. М. М. Н. Н. В. Д. М.Е.Лихачев, «Влияние длины волны накачки и размера сердцевинны световодов с акустической антиволноводной структурой на спектры ВРМБ,» *Квантовая электроника*, т. 11, № 44, 2014.
- [13] Е. П. О.Е. Наний, «Методика расчёта порога ВРМБ в оптических волокнах,» *Квантовая электроника*, т. 8, № 39, 2009.
- [14] Л. М. Б. М. Л. Д. Г. А. Т. В. Н. Д. П. Худяков М.М., «Всероссийская конференция по волоконной оптике,» в *Измерение порога ВРМБ в световодах с акустической антиволноводной структурой*, Пермь, 2015.