

References

1. Oppenheim V.A., Schaffer R.W. *Discrete time signal processing*. Pearson Education, 1999, 870 p. (Russ. ed.: Oppenheim A.V., Schaffer R.W. *Tsifrovaia obrabotka signalov*. Moscow, Tekhnosfera, 2006. 856 p.)
2. Zaitsev V.V., Davydenko S.V., Zaitsev O.V. Dinamika avtokolebaniy diskretnogo ostsillyatora Van der Polya [Dynamics of self-oscillations of the discrete oscillator of Van der Pol]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2000, no. 2, pp. 64-67.
3. Zaitsev V.V., Zaitsev O.V. Sposob zaschity informatsii s ispolzovaniem algoritma generatsii haoticheskikh avtokolebaniy [Method of information security with use of algorithm of generation of chaotic self-oscillations]. *Vestnik SamGU*, 2006, no. 9, pp. 66-71.

Received 10.09.2015

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 535.31; 681.7; 53.082.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАЛОМОДОВЫХ РЕЖИМОВ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК НА МНОГОМОДОВЫХ СВЕТОВОДАХ

Бурдин А.В.¹, Василец А.А.², Бурдин В.А.¹, Морозов О.Г.², Кузнецов А.А.², Нуреев И.И.²,
Фасхутдинов Л.И.², Кафарова А.М.¹, Минаева А.Ю.¹, Севрук Н.Л.¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Казань, РФ

E-mail: bourdine@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований маломодовых режимов функционирования многомодовых ОВ с нанесенными брэгговскими структурами при передаче оптических сигналов, возбуждаемых когерентными источниками оптического излучения.

Ключевые слова: Волоконно-оптическая брэгговская решетка, многомодовые оптические волокна, дифференциальная модовая задержка, маломодовые эффекты, спектральный/импульсный отклик волоконной брэгговской решетки.

Введение

На сегодняшний день волоконные брэгговские решетки (ВБР) широко применяются в различных устройствах и приложениях волоконно-оптической техники связи и фактически являются базовым волоконно-оптическим элементом при построении сенсорных сетей волоконно-оптических датчиков [1 – 8]. Подавляющее большинство таких коммерческих систем ориентировано на хорошо изученные одномодовый или, напротив, многомодовый режимы передачи оптических сигналов.

Известен ряд публикаций, посвященных вопросам исследования параметров ВБР, записанных на кварцевых многомодовых (ОВ), для различных приложений волоконной оптики и фотоники. Так, в работах [9-10] ВБР на градиентных многомодовых ОВ используются в схемах оптических фильтров волоконно-оптических систем 10G локальных сетей передачи данных, а также системах RoF на уровне микро- и пикосот. Публикации [11; 14] по-

священы исследованию параметров ВБР на многомодовых ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления. Отдельное внимание уделяется приложению многомодовых ВБР с наклонными штрихами решетки в различных схемах волоконно-оптических датчиков, в том числе датчиков вибраций, температуры, деформаций и др. [15-18]. Наконец, в работах [19-26] представлены результаты исследования параметров традиционных ВБР на типовых кварцевых телекоммуникационных многомодовых ОВ 50/125 и 62,5/125 с градиентным профилем показателя преломления, а также экспериментальной апробации волоконно-оптических датчиков разного назначения на их основе. Однако подавляющее большинство перечисленных работ ориентировано исключительно на анализ спектрального отклика ВБР при прохождении оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником оптического излучения, что соответствует непосредственно маломодовому режиму.

Маломодовый режим добавляет в пространство параметров еще одно новое измерение – направляемые моды определенного порядка, ограниченное число которых (от буквально двух до нескольких десятков) непосредственно осуществляет перенос мощности сигнала по оптическим волокнам. При этом оптический световод в маломодовом режиме уже фактически является интерферометром, что в сочетании с нанесенной ВБР позволяет рассматривать его как новую платформу для построения элементов с новыми уникальными свойствами. Вышесказанное определяет актуальность данной работы, посвященной экспериментальным исследованиям маломодовых режимов функционирования многомодовых ОВ с нанесенными брэгговскими структурами при передаче оптических сигналов, возбуждаемых когерентными источниками оптического излучения.

Исследования стабильности спектрального отклика ВБР на многомодовом ОВ

Для исследования потенциальных возможностей применения выбранной технологии записи ВБР на базе интерферометра Ллойда на случай формирования брэгговской структуры в кварцевых многомодовых ОВ с градиентным профилем показателя преломления была проведена предварительная экспериментальная апробация указанного подхода. В частности, была реализована запись образцов ВБР на телекоммуникационных кварцевых многомодовых ОВ 50/125 с градиентным профилем показателя преломления категории OM2+/OM3 на длину волны Брэгга 1550 нм и далее проведены экспериментальные исследования стабильности спектрального отклика одного из указанных образцов ВБР в маломодовом режиме при трансляции оптического сигнала лазера непрерывного излучения в области длин волн 1550 нм, пигтированного одномодовым ОВ, с применением волоконно-оптического циркулятора, также пигтированного одномодовыми волокнами. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Всего было проведено 40 измерений спектрального отклика маломодового оптического сигнала тестируемого образца ВБР. Измерения проводились без нарушения условий ввода с интервалом между перезапуском сканера оптического анализатора спектра (OSA) до 20...30 с. Скриншот рабочей программы OSA одного из измеренных спектральных откликов при проведении статистических экспериментальных исследований стабильности приведен на рис. 2. Результаты оценки длины волны Брэгга в виде гистограммы значений представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов показал, что среднее абсолютное отклонение не превышает 0,05 нм, в то время как среднее квадратическое отклонение составляет 0,06 нм.

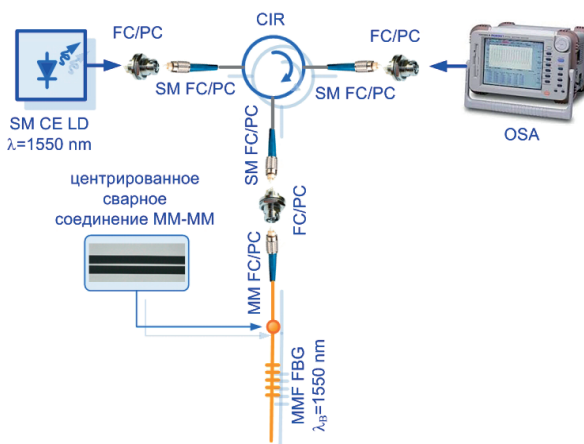


Рис. 1. Структурная схема измерения спектрального отклика ВБР

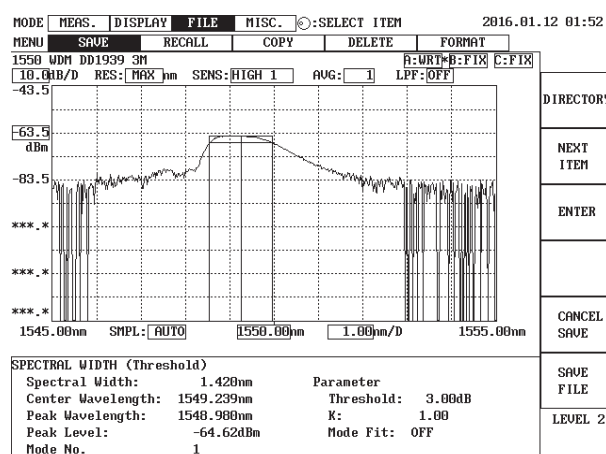


Рис. 2. Скриншот рабочей программы OSA

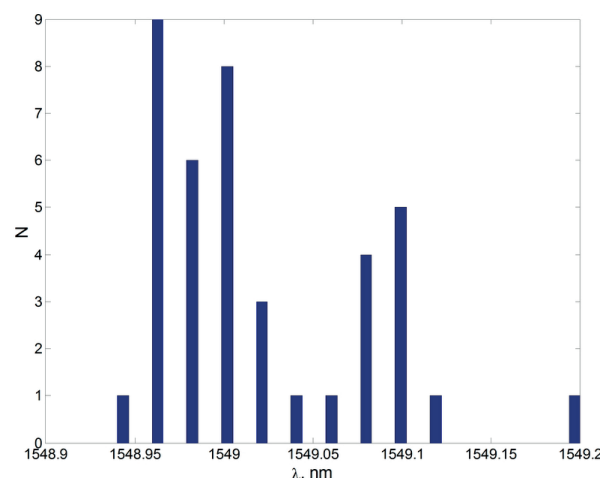


Рис. 3. Результаты измерений длины волны Брэгга ВБР

Экспериментальные исследования чувствительности ВБР, записанных на многомодовом и одномодовом ОВ, к внешнему механическому натяжению

Проведены экспериментальные исследования чувствительности образца ВБР в маломодовом режиме, записанного на кварцевом многомодовом ОВ кат. OM2+/OM3 на длину волны 1550 нм, к внешнему механическому натяжению, обеспечивающему соответствующий сдвиг длины волны Брэгга за счет изменения периода брэгговской структуры. Исследовался диапазон продольных деформаций 0...100 мкм ВБР с последующим измерением спектрального отклика и оценки пиковой длины волны (длины волны Брэгга) при трансляции оптического сигнала с выхода лазера непрерывного излучения в области длин волн 1550 нм, пигтированного одномодовым ОВ, с применением волоконно-оптического циркулятора, также оконцованного одномодовыми ОВ. Аналогичные измерения были проведены для образца ВБР, записанной на одномодовом ОВ рек. ITU-T G.652 также на длину волны 1550 нм.

Для исключения влияния изгибных эффектов в многомодовом ОВ на искажение спектрального отклика были приняты два решения: максимально уменьшить длину многомодового отрезка ОВ, а в качестве линии передачи использовать одномодовое ОВ, а также исключить механическое поперечное воздействие (изгибы) отрезка ММ ОВ в процессе экспериментов.

Для проведения эксперимента была подготовлена следующая экспериментальная установка, фиксирующая положение ОВ, которая представлена на рис. 4. В данном эксперименте для опроса ВБР использовался интеррогатор National Instruments.

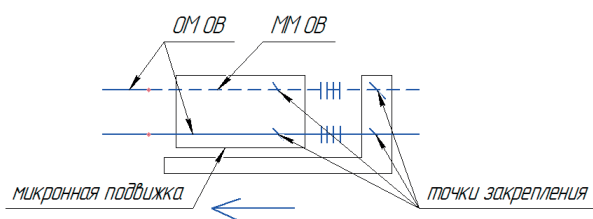


Рис. 4. Фиксация волокон с нанесенными ВБР

Результаты измерений представлены на рис. 5. Сравнительный анализ полученных данных показал, что абсолютная разность чувствительности к продольной внешней механической нагрузке, с точки зрения сдвига пиковой длины волны, для ВБР, записанной на многомодовом ОВ, по отношению к ВБР на одномодовом ОВ также выше: данная разность в среднем составляет 8%.

одномодовом ОВ выше: данная разность в отдельных случаях составляет более 40%.

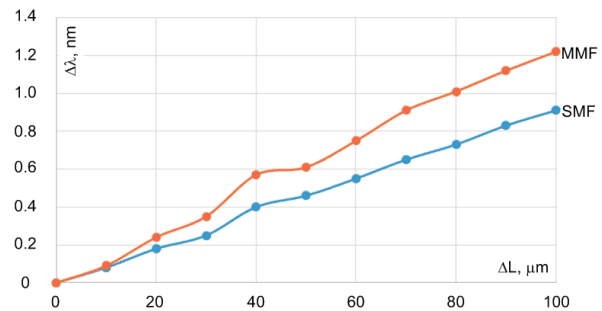


Рис. 5. Результаты измерения сдвига длины волны Брэгга в зависимости от приложенного продольного растяжения, изменяющего период ВБР

Экспериментальные исследования чувствительности ВБР, записанных на многомодовом и одномодовом ОВ, к внешнему температурному воздействию

Выполнены экспериментальные исследования сравнения чувствительности образцов ВБР, записанной на кварцевом многомодовом ОВ кат. OM2+/OM3, и ВБР, записанной на одномодовом ОВ рек. ITU-T G.652, на длину волны 1550 нм. Исследовался температурный диапазон 20...250° С. Увеличение температуры на заданное значение обеспечивалось с помощью технического фена. Схема измерения спектральных откликов ВБР аналогична предыдущему пункту: ВБР на многомодовом ОВ осуществляет трансляцию сигнала, возбуждаемого когерентным источником излучения, в маломодовом режиме.

В ходе исследования температурной зависимости были приняты аналогичные меры для снижения влияния изгибных потерь на характеристики ВРБ, также было исключено влияние температурного расширения подложки, на которую крепилось волокно в ходе эксперимента, а также возможные вибрации ОВ при подаче на него воздуха с технического фена. Результаты измерения сдвига длины волны Брэгга в зависимости от температурного воздействия, меняющего период ВБР, приведены на рис. 6.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что абсолютная разность чувствительности к внешнему температурному воздействию, с точки зрения сдвига пиковой длины волны, для ВБР, записанной на многомодовом ОВ, по отношению к ВБР на одномодовом ОВ также выше: данная разность в среднем составляет 8%.

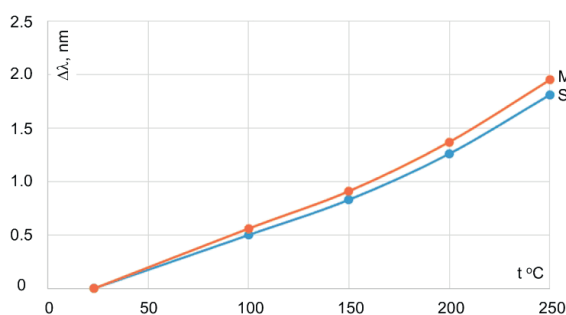


Рис. 6. Результаты измерения смещения длины волны Брэгга в зависимости от температурного воздействия, меняющего период ВБР

Экспериментальные исследования чувствительности ВБР, записанных на многомодовом ОВ, к воздействию изгибов

Проведены экспериментальные исследования чувствительности спектрального отклика образца ВРБ, записанного на многомодовом ОВ, к воздействию изгибов на это ОВ при прохождении оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником излучения. По аналогии с предыдущими пунктами рассматривался диапазон длин волн 1550 нм. Здесь на разных этапах эксперимента на отдельные участки многомодового ОВ на удалении от ВБР на входе и на выходе решетки фиксировались и изгибались с радиусом 15 мм под разной конфигурацией (отдельный полувиток, S-образный виток).

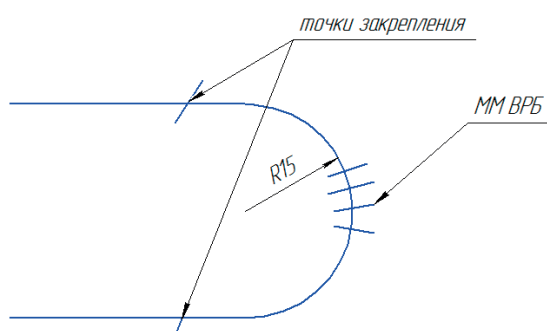
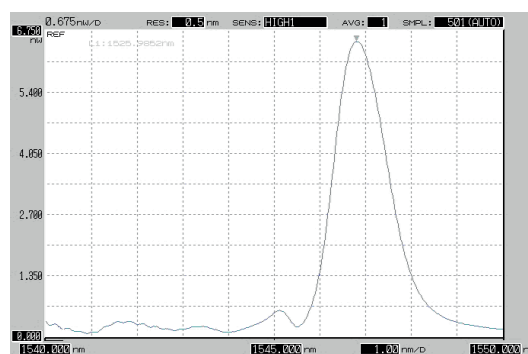
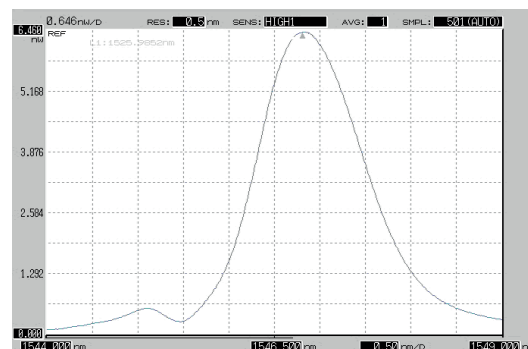


Рис. 7. Узел крепления ОВ с ВБР при исследовании влияния изгибов

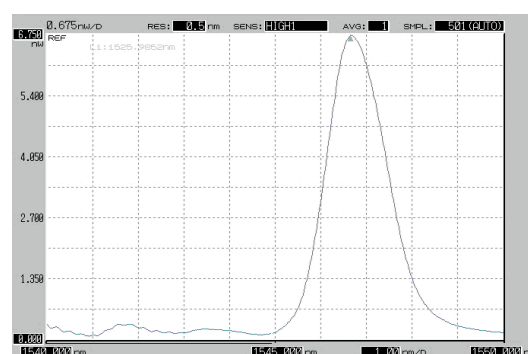
Структурная схема узла крепления приведена на рис. 7. Здесь закрепление и размещение ОВ на столе проводилось таким образом, чтобы исключить изгибы ОВ в процессе эксперимента: для этого область ВБР, подвергавшаяся изгибу, а также оставшийся отрезок многомодового ОВ фиксировались. На первом этапе исследовалось влияние изгибов на зону запись ВБР ОВ. Результаты измерения спектральных откликов ВБР приведены на рис. 8а-г.



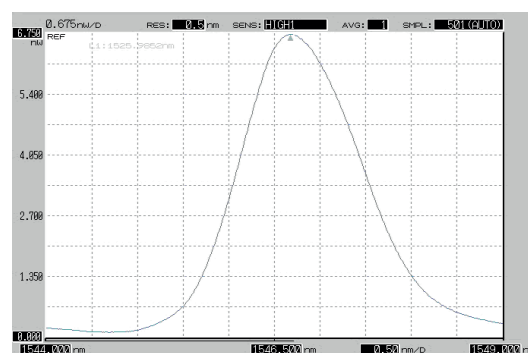
а)



б)



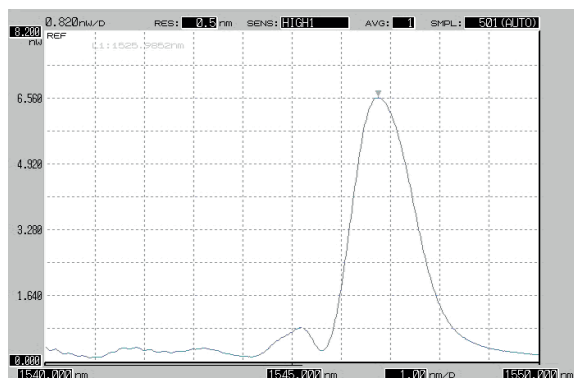
в)



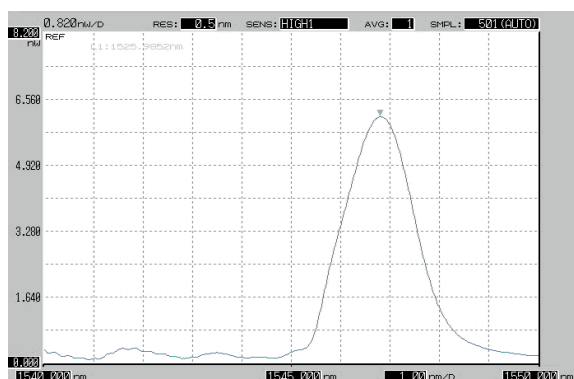
г)

Рис. 8. Результаты исследования влияния изгибов в зоне записи ВБР на спектральный отклик оптического сигнала: а) без изгиба, полоса сканирования 10 нм; б) без изгиба, полоса сканирования 5 нм; в) изгиб под радиусом 15 мм, полоса сканирования 10 нм; г) изгиб под радиусом 15 мм, полоса сканирования 5 нм

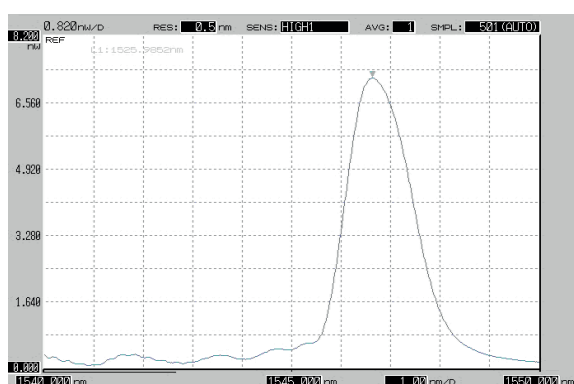
Полученные результаты показывают, что изгиб приводит к смещению пиковой центральной длины волны на 0,2 нм от 1546,8 нм до 1546,6 и к незначительным изменениям самой спектральной характеристики: так, снизился уровень левого периферийного бокового лепестка и в целом увеличилась ширина спектра ВБР.



а)



б)



в)

Рис. 9. Результаты исследования влияния изгибов в зоне записи ВБР на спектральный отклик оптического сигнала: а) без изгиба, пиковая длина волны 1546,76 нм; б) 1-ый вариант изгиба, пиковая длина волны 1546,8 нм; в) 1-ый вариант изгиба, пиковая длина волны 1546,64 нм

На следующем этапе исследовалось воздействие S-образного изгиба периферийной части отрезка ОБ с записанной ВБР вне зоны ВБР. В данном эксперименте исключалось воздействие на измеряемую ВРБ путем ее фиксации с двух сторон на рабочем столе. Изгибам подвергался участок многомодового ОБ до ВБР – ближе к ОSA (изгиб участка после ВБР не приводил к каким-либо эффектам). Как было отмечено выше, ОБ изгибалось в форме буквы «S», радиусы изгибов не превышали 15 мм. В результате было получено несколько модификаций исходной формы спектрального отклика ВБР, рис. 9а, две из которых представлены на рис. 9б и рис. 9в.

Анализ полученных результатов показал следующее. Изгибы многомодового ОБ за выходом ВБР не приводят к изменениям спектрального отклика, в то время как изгибы ОБ перед входом ВБР могут существенно модифицировать исходную спектральную характеристику. При этом помимо сдвига пиковой длины волны могут проявляться периферийные боковые максимумы. Появление новых резонансных продольных модовых составляющих излучения при прохождении ВБР частично объясняется усилением связи отдельных поперечных мод высших порядков, изменением процессов взаимодействия и смешения модовых компонентов сигнала за счет введения прецизионных макроизгибов.

Экспериментальные исследования потенциальных возможностей альтернативной схемы регистрации локальных и распределенных внешних механических воздействий на основе анализа спектрального отклика ВБР, записанной на многомодовом ОБ

Как было отмечено выше, переход к маломодовому режиму создает все предпосылки для разработки альтернативных схем детектирования внешних воздействий. В данном разделе предлагается альтернативная схема регистрации локальных и распределенных внешних механических воздействий на основе анализа спектрального отклика ВБР, записанной на многомодовом ОБ, которая представлена на рис. 10.

Данная схема отличается от известных решений тем, что в качестве распределенного сенсора выступает кварцевое многомодовое ОБ «б», функционирующее в маломодовом режиме передачи оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником непрерывного оптического излучения «1», подключаемого ко входу

сенсора «6» через волоконно-оптический циркулятор «12», пигтелированный одномодовыми ОВ «3'»...«3'''», с заданным сильным прецизионным радиальным рассогласованием «5». Последнее реализуется с помощью одномодового согласующего световода «4», соединяемого со входом многомодового ОВ сенсора «6» с сильным осевым смещением «5», обеспечивающим ввод сигнала с выхода одномодового ОВ порта циркуля-

тора в периферийную зону сердцевины данного многомодового ОВ, а также подключением ВБР «8» к выходу сенсора также с аналогичным существенным радиальным рассогласованием «7», что в целом обеспечивает возбуждение дополнительного ограниченного числа мод высших порядков, более чувствительных к появлению новых локальных микро- и макроизгибов, обусловленных внешним механическим воздействием.

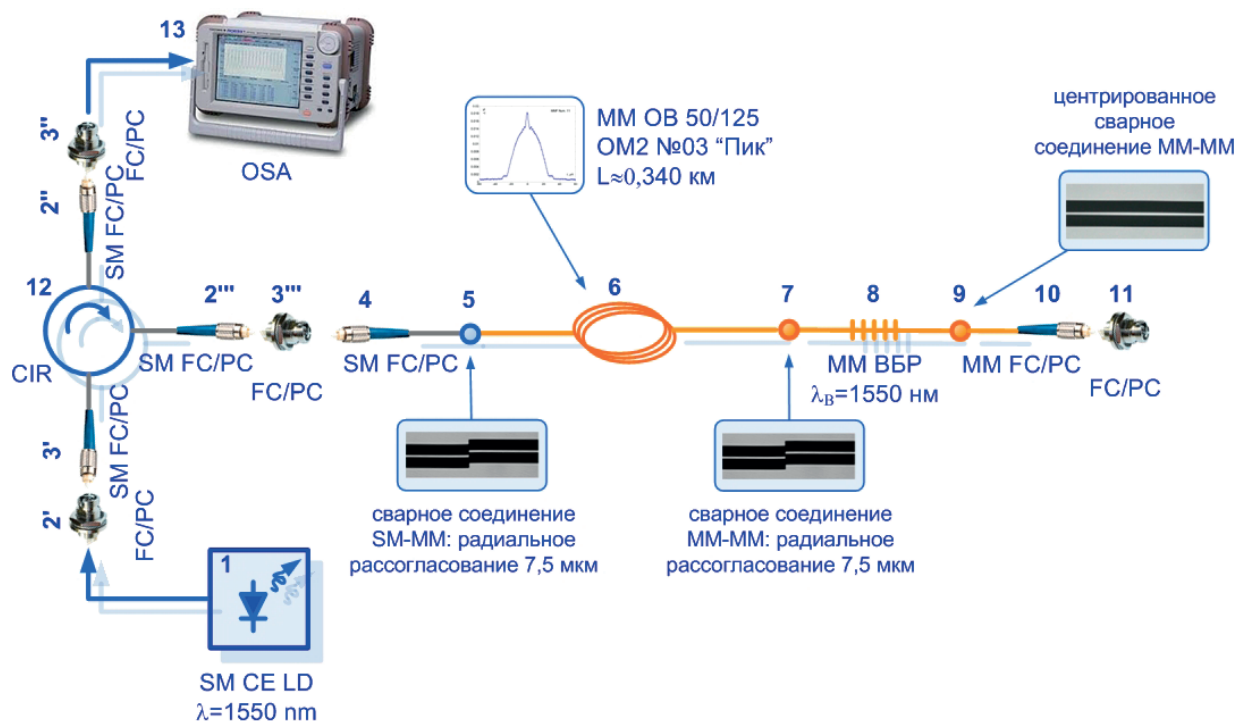


Рис. 10. Альтернативная схема регистрации внешних воздействий

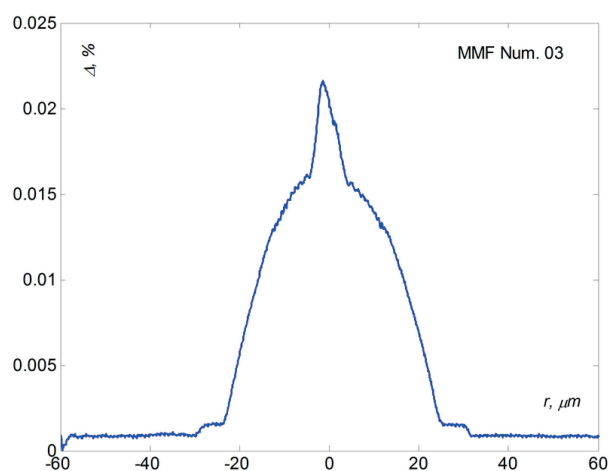


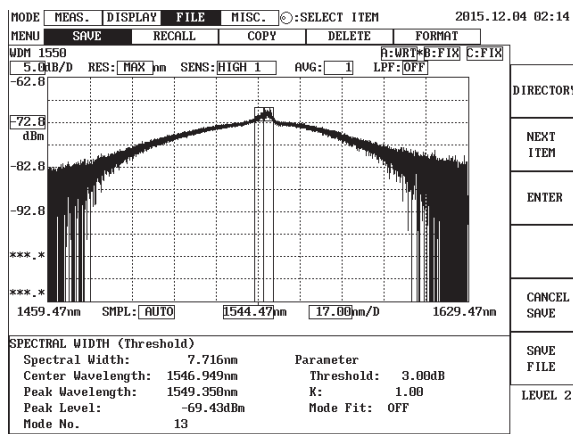
Рис. 11. Профиль показателя преломления многомодового ОВ №03, используемого в качестве сенсора альтернативной схемы регистрации внешних механических воздействий

Проведена экспериментальная апробация предложенной схемы с применением ВБР «8»,

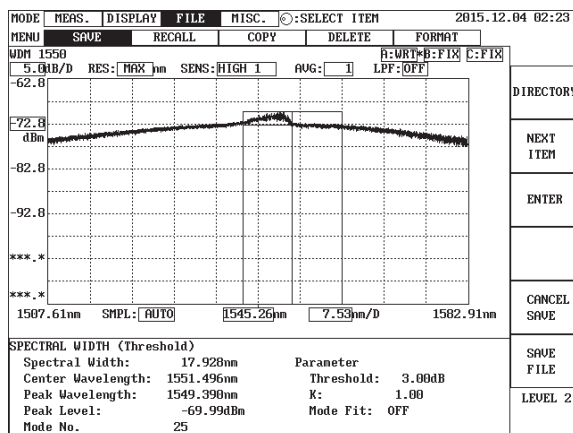
записанной на многомодовом ОВ кат. OM2+/OM3 на длину волны 1550 нм. В качестве сенсора была использована бухта промышленного образца №03 многомодового ОВ кат. OM2 общей протяженностью порядка 250 м с сильным проявлением ДМЗ [45 – 47]. Градиентный профиль показателя преломления данного ОВ отличается наличием характерного технологического дефекта в центре сердцевины, представляющий собой габаритный пик (см. рис. 11).

На рис. 12 приведены скриншоты программного обеспечения OSA при измерении спектрального отклика в условиях слабого внешнего воздействия 200 Н на сенсорное ОВ «6». На рис. 13 представлены фрагменты центральной зоны измеренных спектральных откликов: опорного, при воздействии на многомодовое ОВ №03 сенсор «6» и при воздействии на ВБР «8». Анализ полученных результатов демонстрирует возможность детектирования локального внешнего механического воздействия с помощью данной

схемы: если при давлении на саму ВБР, используемую в качестве чувствительного элемента, со слабым усилием около 200 Н обеспечивалось смещение пиковой длины волны всего на 0,1 нм, то при воздействии на ОВ сенсора с этим же усилием пиковая длина волны была смещена относительно опорного значения уже на 0,7 нм.



а)



б)

Рис. 12. Результаты измерения спектрального отклика при внешнем воздействии на сенсорное ОВ: (а) общий вид; (б) увеличенная центральная зона

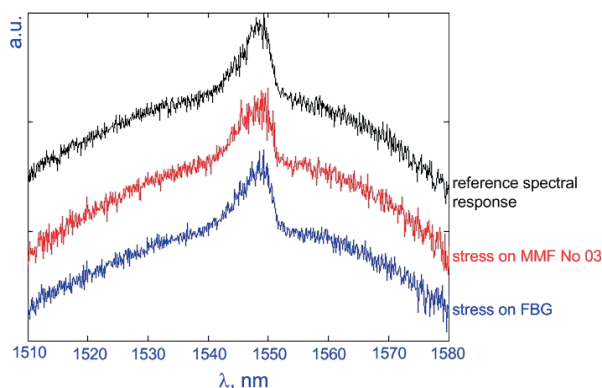


Рис. 13. Фрагменты центральной зоны измеренных спектральных откликов

Экспериментальные исследования потенциальных возможностей альтернативной схемы регистрации локальных и распределенных внешних механических воздействий на основе анализа импульсного отклика маломодового оптического сигнала

В данном разделе предложен альтернативный подход регистрации локальных и распределенных внешних механических воздействий, который, в отличие от известных решений, базируется на анализе импульсного отклика маломодового оптического сигнала при прохождении распределенного сенсора – кварцевого градиентного многомодового ОВ кат. ОМ2 с сильным проявлением ДМЗ, возбуждаемого когерентным источником оптического излучения, на выходе которого включена ВБР, записанная также на многомодовом ОВ, при этом вход многомодового ОВ сенсора, а также соединение выхода ОВ сенсора и входа ВБР выполнены с сильным прецизионным радиальным смещением. В данном случае ВБР рассматривается уже не в виде волоконно-оптического рефрактора заданной оптической несущей, а в качестве прецизионного локального микродефекта с периодической микроструктурой, обеспечивающего управление модовым составом маломодового оптического сигнала. Обобщенная структурная схема, реализующая предложенный подход, представлена на рис. 14.

Вход и выход схемы «4» и «1» подключаются непосредственно к выходу передающего «1» и входу приемного «13» оптических модулей измерителя ДМЗ, при этом ВБР «8» размещается со стороны приемного модуля «13». Таким образом, регистрация механического воздействия осуществляется на основе анализа изменения отклика маломодового оптического сигнала малой длительности, возбуждаемого в сенсоре – многомодовом ОВ «6» – лазерным источником излучения «1». В процессе мониторинга выполняется сравнение «опорной» и «текущей» формы импульса, детектируемой на выходе тестируемого многомодового ОВ, дополненного ВБР «8». Предполагается, что благодаря механическим воздействиям на многомодовое ОВ сенсора появятся новые микро- и макроизгибы, что неизбежно изменит процессы взаимодействия и смешения модовых компонентов сигнала, которые будут усиливаться за счет дополнительного возбуждения ограниченного числа мод высших порядков благодаря смещенному вводу сигнала с выхода лазера, а наличие ВБР на приеме позво-

лит повысить чувствительность схемы в целом. Все это должно существенно повлиять на искаженную за счет ДМЗ форму импульсного откли-

ка маломодового оптического сигнала, возбуждаемого в многомодовом ОВ сенсора лазерным источником оптического излучения.

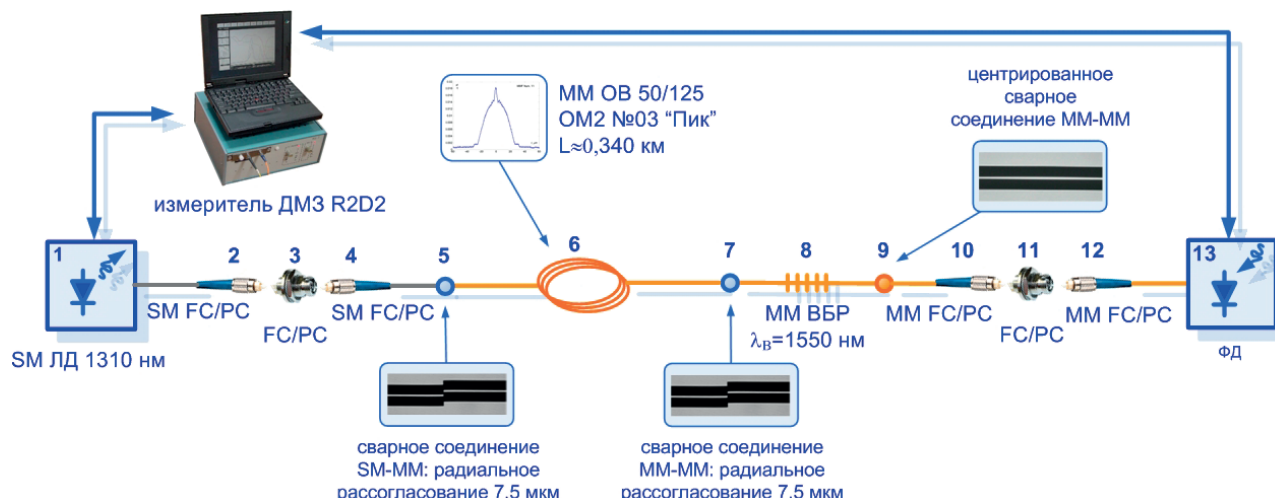


Рис. 14. Альтернативная схема регистрации внешних воздействий на основе анализа импульсного отклика маломодового оптического сигнала

Проведена экспериментальная апробация предложенного подхода. Для измерения импульсного отклика использовался комплект анализатора ДМЗ R2D2. В качестве распределенного сенсора использовалась бухта кварцевого градиентного многомодового ОВ 50/125 кат. OM2 длиной около 250 м с сильным проявлением ДМЗ, в том числе обусловленным наличием габаритного дефекта профиля показателя преломления в центре сердцевины в виде пика, приведенный на рис. 11. Между выходом сенсора и входом приемного модуля анализатора ДМЗ подключалась ВБР «8», записанная в центре короткого (не более 40 см) отрезка многомодового ОВ 50/125 кат. OM2+/-OM3 на длину волны 1550 нм. Как было отмечено выше, стыки «одномодовый согласующий световод» – «вход многомодового ОВ сенсора» «5» и «выход многомодового ОВ сенсора» – «вход ВБР» «7» были выполнены с помощью сварочного аппарата с сильным радиальным рассогласованием 7,5 мкм. Регистрация формы импульсного отклика без и в условиях наличия внешнего воздействия (как на многомодовое ОВ сенсора, так и на саму ВБР) проводилась на длине волны $\lambda = 1310$ нм, исходная длительность вводимого с выхода одномодового лазерного диода передающего модуля анализатора ДМЗ R2D2 оптического импульса квазигауссовой формы составила $\tau_{05} = 340$ пс.

На рис. 15 представлена диаграмма динамики импульсного отклика маломодового оптического сигнала – от опорной формы до воздействия на

решетку, а на рис. 16 – результаты их сопоставления.

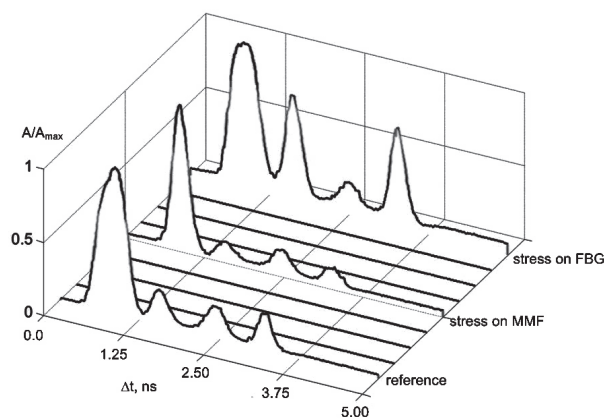


Рис. 15. Диаграмма динамики формы импульсного отклика

Полученные результаты продемонстрировали возможность детектирования внешних механических воздействий на ОВ сенсора. Так, сравнительный анализ опорной формы импульсного отклика и формы импульсного отклика при механическом воздействии на ОВ, включающие в себя несколько компонентов, что обусловлено проявлением ДМЗ, в том числе главный максимум, который выбирается как опорный пик для одного и того же отклика, а также три периферийных пика, как показал смещение периферийных максимумов относительно главного при сопоставлении с опорным импульсным откликом на 5,3 пс; 76,8 пс и 34,8 пс, соответственно, в то время как из-

менение нормированных амплитуд для всех трех периферийных пиков составило менее 0,1.

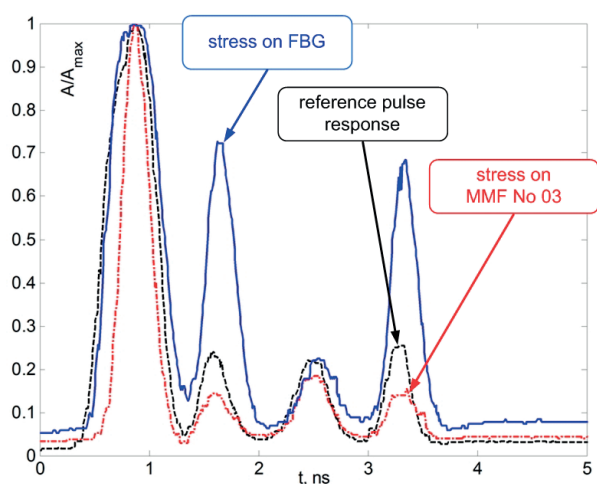


Рис. 16. Сопоставление измеренной формы импульсных откликов: опорного, при воздействии на многомодовое ОВ №03 – сенсор, при воздействии на ВБР

Вместе с тем при воздействии на саму ВБР наблюдалось намного более сильное изменение формы импульсного отклика. Так, во временной области изменение положения трех периферийных максимумов достигало значений 45,3 пс, 108,7 пс и 38,3 пс, а по нормированной амплитуде для первого и третьего пиков более 0,4. Таким образом, анализ полученных результатов позволяет предположить о потенциальных возможностях применения описанной схемы регистрации внешних механических воздействий в волоконно-оптических датчиках на базе маломодовых эффектов. При этом исходя из полученных данных в качестве чувствительного элемента может использоваться как многомодовое ОВ с сильным проявлением ДМЗ, так и сама ВБР, записанная на многомодовом ОВ на длине волны 1550 нм, подключенная между длиной многомодового ОВ, обеспечивающего разделение импульса на отдельные компоненты за счет ДМЗ, и приемным модулем анализатора ДМЗ, формирующим зондирующие импульсы малой длительности на оптической несущей 1310 нм.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований маломодовых режимов функционирования многомодовых ОВ категории OM2+/OM3 с нанесенными брэгговскими структурами с помощью схемы записи на базе интерферометра Ллойда при передаче оптических сигналов, возбуждаемых когерентными

источниками оптического излучения. Проведены статистические исследования стабильности длины волны Брэгга ВБР на многомодовых ОВ в области длины волны 1550 нм. Показано, что разброс значений брэгговской длины волны ВБР на многомодовых ОВ, функционирующих в маломодовом режиме, по сравнению с ВБР на одномодовых ОВ отличается более чем в два раза. Однако при этом чувствительность ВБР на многомодовых ОВ по сравнению с ВБР на одномодовых ОВ как к продольным растяжениям, так и к температурным воздействиям выше. Предложена и экспериментально апробирована альтернативная схема регистрации внешних механических воздействий, где в качестве сенсора может выступать как сама решетка, так и строительная длина многомодового ОВ, к выходу которого подключена многомодовая ВБР. В отличие от известных решений данная схема может использовать результаты анализа не только спектрального, но и импульсного отклика оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником оптического излучения и распространяющегося по многомодовому ОВ схемы в маломодовом режиме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-37-51254 мол_нр.

Литература

1. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики // Л.: Энергоатомиздат. 1990. – 256 с.
2. Othonos A., Kalli K. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing // Boston, MA, USA: Artech House Optoelectronics Library. 1999. – 422 p.
3. Grattan L.S., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology / Advances Applications – Bragg Gratings and Distributed Sensors. New York, NY, USA: Springer Science. 2000. – 385 p.
4. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings (Optics and Photonics) 1st Edition // San Diego, CA, USA: Academic Press. 1999. – 458 p.
5. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы // М.: Физматлит. 2001. – 272 с.
6. Васильев С. А. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, А. С. Божков, А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085 – 1103.

7. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings (Optics and Photonics) 3st Edition // San Diego, CA, USA: Academic Press. 2009. – 632 p.
8. Rajan G. Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems) // Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis. – 2015. – 575 p.
9. Yam S. S.-H., Gu X., Mohammed W., Smith P. Multimode fiber Bragg grating wavelength filter in a 10-Gb/s system // IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – vol. 20, no. 8. – P. 584 – 586.
10. Das Sh., Zahir Eb. Performance enhancement of radio over multimode fiber system using fiber Bragg Grating for micro and pico cell applications // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2014. – vol. 5, no. 7. – P. 718 – 722.
11. Sang Xi., Yu Ch., Yan B. Bragg gratings in multimode optical fibres and their applications // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2006. – vol. 8, no. 5. – P. 1616 – 1621.
12. Lu Ch., Cui Y. Fiber Bragg Grating Spectra in Multimode Optical Fibers // Journal of Lightwave Technology. – 2006. – vol. 24, no. 1. – P. 598 – 604.
13. Jin Yo., Dong Xi., Gong H., Shen Ch. Refractive-index sensor based on tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber // Microwave and Optical Technology Letters. – 2010. – vol. 52(6). – P. 1375 – 1377.
14. Zhao Ch.-L., Yang X., Demokan M.S., Jin W. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber Bragg grating // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2006. – vol. 24, no. 2. – P. 879 – 883.
15. Zhao Ch.-L., Li Zh., Demokan M.S., Yang X., Jin W, Lu Ch. Studies on strain and temperature characteristics of a slanted multimode fiber Bragg grating and its application in multiwavelength fiber Raman ring laser // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2006. – vol. 24, no. 6. – P. 2394 – 2400.
16. An J., Liu T., Jin Y. Fiber optic vibration sensor based on the tilted fiber Bragg grating // Advances in Materials Science and Engineering. – 2013. – 545013. – P. 1 – 4.
17. Li D., Gong Yu., Wu Yu. Tilted fiber Bragg grating in graded-index multimode fiber and its sensing characteristics // Photonic Sensors. – 2013. – vol. 3, no. 2. – P. 112 – 117.
18. Guo T., Guan B.-O., Albert J. Polarimetric multimode tilted fiber grating sensors // Optics Express. – 2014. – vol. 22, no. 6. – P. 7330 – 7336.
19. Mizunami T., Djambova T.V., Niiho Ts., Gupta S. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2006. – vol. 18, no. 2. – P. 230 – 235.
20. Su L., Lu Ch. Multimode fiber Bragg grating based fiber lasers and optical sensors // Proceedings of OFC. – 2005. – P. OME-16-1 – OME-16-3.
21. Liu T., Wang D., Raenaei R., Cheng X., Zhang L., Bennion I. A low-cost multimode fiber Bragg grating sensor system // Proceedings of SPIE. – 2005. – vol. 5634. – P. 54 – 61.
22. Yong Zh., Zh. Ch., Yom Sh. Multiple parameter vector bending and hightemperature sensors based on asymmetric multimode fiber Bragg gratings inscribed by an infrared femtosecond laser // Optics Letters. – 2006. – vol. 31, no. 12. – P. 1794 – 1796.
23. Yu H.-H., Wang Yo., Xu Q.-Y. Characteristics of multimode fiber Bragg gratings and their influences on external-cavity semiconductor lasers // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2006. – vol. 24, no. 4. – P. 1903 – 1912.
24. Song D., Fang S., Li B., Zh. J., Sun W. Multi-parameter sensing based on graded-index multimode fiber // Proceedings of Imaging and Applied Optics. – 2013. – P. JTu4A.29-1 – JTu4A.29-3.
25. Fang Sh., Li B., Song D., Zhang J., Sun W., Yuan L. A smart graded-index multimode fiber based sensor unit for multi-parameter sensing applications // Optics and Photonics Journal. – 2013. – no. 3. – P. 265 – 267.
26. Schmid M.J., Muller M.S. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers // Optics Express. – 2015. – vol. 23, no. 6. – P. 8087 – 8094.
27. Теумин И.И. Волноводы оптической связи // М.: Связь, 1978. – 178 с.
28. Snyder A., Love J. Optical waveguide theory / – London: Chapman & Hall. 1983. – 734 p.
29. Гроднев Г.И. Переходные помехи между волоконными световодами в режиме маломодовой передачи // Электросвязь. – 1981. – №6. – С. 20 – 22.
30. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Лазеры и волоконная оптика // Успехи физических наук. – 1986. – т.148, вып. 2. – С. 289 – 311.
31. Андрушко Л.М., Вознесенский В.А., Каток В.Б. и др. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Киев: Тэхника, 1988. – 239 с.
32. Bottacchi S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre // Theory and design methods for 10GbE systems. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 654 p.
33. Маззарес Д. Выбор волокна и новые стандарты меняют характеристики сети // Вестник связи. – 2009. – №5. – С. 33 – 37.

34. Маззарес Д. Выбор оптического волокна для центров обработки данных // Технологии и средства связи. – 2009. – №4. – С. 30 – 32.
35. Becker, M. Fiber Bragg Grating Inscription with UV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference for Fiber Laser Applications / M. Becker, S. Bruckner, E. Lindner, M. Rothhardt, S. Unger, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7750, 775015-1.
36. Meltz, G. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method / G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn // Opt. Lett. – 1989. – V. 14. – № 15. – P. 823 – 825.
37. Варжель, С.В. Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски / С. В. Варжель, А.В. Куликов, В.А. Асеев, В.С. Брунов, В.Г. Калько, В.А. Артеев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – Т. 75. – № 5. – С. 27 – 30.
38. Lai, Y. Point-by-point inscription of sub-micrometer period fiber Bragg gratings / Y. Lai, K. Zhou, K. Sugden, I. Bennon // OSA/CLEO/QELS. – 2008. – paper CTuU2.
40. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи // М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.
41. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / – М.: Академия Айти; ДМК Пресс. 2007. – 632 с.
42. Irujo T. OM4 fiber – the next generation of multimode fiber // [Электронный ресурс]: FOLS Webconference materials, 2010. – Режим доступа: http://www.fols.org/fols_library/archived_webvonferences/index.cfm, свободный. – Загл. с экрана.
43. TIA-492-AAAD. Detail specification for 850 nm laser-optimized, 50 μm core diameter / 125 μm cladding diameter class Ia graded-index multimode optical fibers of OM4 performance. – 2009.
44. Bois Sh. Bend-insensitive multimode fiber improve enterprise networks // Lightwave. – 2009. – N4. – P. 7 – 9.
45. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // Фотон-Экспресс. – 2008. – №5-6(69-70). – С. 20 – 22.
46. Бурдин А.В. О диагностике дифференциальной модовой задержки многомодовых оптических волокон // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – №4. – С. 33 – 38.
47. Bourdine A.V., Prokopyev V.I., Dmitriev E.V., Yablochkin K.A. Results of conventional field-test equipment application for identification of multimode optical fibers with high DMD // Proceedings of SPIE. – 2009. – vol. 7374. – P. 73740J-01 – 73740J-07.
48. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – №2. – С. 22 – 27.
49. Bourdine A.V., Praporshchikov D.E., Yablochkin K.A. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers // Proceedings of SPIE. – 2011. – vol. 7992. – P. 799206-1 – 799206-6.

Получено 18.01.2016

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., доцент, помощник ректора по инновациям, профессор Кафедры линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: bourdine@psuti.ru

Василец Александр Александрович, аспирант Кафедры радиотехники и микроволновых технологий (РМВТ) Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ) им. А.Н. Туполева – КАИ. Тел. 8-937-529-50-55. E-mail: a.vasilets@mail.ru

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор, проректор по науке и инновациям ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: burdin@psati.ru

Морозов Олег Геннадьевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой РМВТ КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ. Тел.: 8-917-266-32-27. E-mail: microoil@mail.ru

Кафарова Анастасия Михайловна, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: nastya59494@mail.ru

Минаева Алина Юрьевна, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: minaeva1993@mail.ru

Севрук Никита Львович, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: nikasevruk@mail.ru

Нуреев Ильнур Ильдарович, к.т.н., доцент Кафедры РМБТ им. А.Н. Туполева – КАИ. Тел. 8-917-871-00-76. E-mail: n2i2@mail.ru

Кузнецов Артем Анатольевич, аспирант Кафедры РМБТ им. А.Н. Туполева – КАИ. Тел. 8-919-642-56-89. E-mail: serius_91@mail.ru

Фасхутдинов Ленар Маликович, аспирант Кафедры РМБТ им. А.Н. Туполева – КАИ. Тел. 8-919-642-56-89. E-mail: serius_91@mail.ru

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF MULTIMODE FIBER BRAGG GRATINGS ON MULTIMODE FIBERS

*Anton V. Bourdine¹, Alexander A. Vasilets², Vladimir A. Burdin¹, Oleg G. Morozov², Anastasia M. Kafarova¹,
Alina Yu. Minaeva¹, Nikita L. Sevruk¹, Ilnur I. Nureev², Artem A. Kuznetsov², Lenar M. Faskhutdinov²*

*¹Dept. of Communications Lines, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77,
Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation*

*²Dept. of Radiophotonics and Microwave Tech., Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation
E-mail: bourdine@yandex.ru*

Nowadays fiber Bragg gratings (FBGs) are widely used in various devices and applications of fiber optics. They become a basic component for fiber optic sensor networks. The most of those both commercial and prototype fiber optic sensor systems are based on well-researched either singlemode or multimode regime of signal transmission over optical fibers. However some works are concerned with researches of FBGs written on silica multimode optical fibers (MMF) for various photonics and fiber optics applications. Thus, FBGs written on graded-index MMFs are used in optical filters of fiber optic data transmission systems 10G designed for local area networks and radio-over-fiber systems covering micro- and pico-cells. Some works are focused on FBGs written on step-index MMFs. Slanted or tilted multimode FBGs are also widely used in vibration, temperature, deformation etc. fiber optic sensors. Another group of publications is devoted to conventional FBGs on silica telecommunication graded-index MMFs 50/125 as well as 62.5/125 and experimental approbation of various fiber optic sensors based on them. However, the most part of mentioned papers are focused on just analysis of FBG spectral response during laser-excited optical signal propagation that corresponds to a few-mode regime. Few-mode regime adds a new another one di-mension to parameter space that is associated with guided modes of particular order which limited number (from two to a few dozens) transfer the most part of optical signal power over tested optical fiber. Optical fiber operating in a few-mode regime of data transmission is interferometer that in combination with FBG can be considered as an alternative basis for design of elements with new unique properties. This work is concerned with experimental researches of few-mode regimes of FBG operating during transferring of laser based optical signals. We tested FBGs written on silica graded-index multimode fibers 50/125 Cat. OM2+/OM3 with Bragg wavelength 1550 nm by using them in a set of developed experimental schemes based on excitation of multimode fibers by cor-responding laser sources. The researches were also focused on analysis of both spectral and pulse responses under changing of selected mode mixing and power diffusion processes due to tension and/or stress local and distributed action to FBG or sensor fiber. Results of spectral and pulse re-sponse measurements at the output of schemes with installed described FBGs are represented.

Keywords: fiber Bragg grating, multimode optical fibers, graded-index profile, few-mode effects, differential mode delay, Bragg wavelength, FBG pulse/spectral response, higher-order modes, stress sensing

The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 15-37-51254 mol_nr

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.1.03

Bourdine Anton Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science; Associated Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: bourdine@psuti.ru.

Vasilets Alexander Alexandrovich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; PhD student of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Tel.: +79375295055; E-mail: a.vasilets@mail.ru

Burdin Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23 L. Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; vicerektor on science activity and innovation; Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: burdin@psati.ru

Morozov Oleg Gennadievich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; Head of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +79172663227; E-mail: microoil@mail.ru

Kafarova Anastasia Michailovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Master Student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78463322161. E-mail: nastya59494@mail.ru

Minaeva Alina Yurievna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Master Student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78463322161. E-mail: minaeva1993@mail.ru

Sevruck Nikita Lvovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Master Student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78463322161. E-mail: nikas-evruck@mail.ru

Nureev Ilnur Ildarovich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; Professor Assistant of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies; PhD in Technical Sciences. Tel.: +79178710076. E-mail: n2i2@mail.ru

Kuznetsov Artem Anatolievich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; PhD student of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Tel.: +79196425689; E-mail: serius_91@mail.ru

Faskhutdinov Lenar Malikovich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; PhD student of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Tel.: +79196425689; E-mail: serius_91@mail.ru

References

1. Okosi T. *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber-optics sensors]. Leningrad, Energisamizdat, 1990. 256 p.
2. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Boston, MA, USA, Artech House Optoelectronics Library, 1999. 422 p.
3. Grattan L.S., Meggitt B.T. *Optical Fiber Sensor Technology. Advances Applications – Bragg Gratings and Distributed Sensors*. New York, NY, USA, Springer Science. 2000. 385 p.
4. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings (Optics and Photonics) 1st Edition*. San Diego, CA, USA, Academic Press, 1999. 458 p.
5. Kul'chin Yu.N. *Raspredelemnnye volokonno-opticheskie izmeritel'nye sistemy* [Distributed fiber optic measuring system]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 272 c.
6. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005. vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103.
7. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings (Optics and Photonics) 3rd Edition*. San Diego, CA, USA, Academic Press, 2009. 632 p.
8. Rajan G. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems)*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, Taylor & Francis, 2015. 575 p.

9. Yam S. S.-H., Gu X., Mohammed W., Smith P. Multimode fiber Bragg grating wavelength filter in a 10-Gb/s system. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, no. 8, pp. 584-586.
10. Das Sh., Zahir Eb. Performance enhancement of radio over multimode fiber system using fiber Bragg Grating for micro and pico cell applications. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2014, vol. 5, no. 7, pp. 718-722.
11. Sang Xi., Yu Ch., Yan B. Bragg gratings in multimode optical fibres and their applications. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2006, vol. 8, no. 5, pp. 1616-1621.
12. Lu Ch., Cui Y. Fiber Bragg Grating Spectra in Multimode Optical Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 1, pp. 598-604.
13. Jin Yo., Dong Xi., Gong H., Shen Ch. Refractive-index sensor based on tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, vol. 52 no. 6, pp. 1375-1377.
14. Zhao Ch.-L., Yang X., Demokan M.S., Jin W. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber Bragg grating. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 2, pp. 879-883.
15. Zhao Ch.-L., Li Zh., Demokan M.S., Yang X., Jin W, Lu Ch. Studies on strain and temperature characteristics of a slanted multimode fiber Bragg grating and its application in multiwave-length fiber Raman ring laser. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 6, pp. 2394-2400.
16. An J., Liu T., Jin Y. Fiber optic vibration sensor based on the tilted fiber Bragg grating. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 545013, pp. 1-4.
17. Li D., Gong Yu., Wu Yu. Tilted fiber Bragg grating in graded-index multimode fiber and its sensing characteristics. *Photonic Sensors*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 112-117.
18. Guo T., Guan B.-O., Albert J. Polarimetric multimode tilted fiber grating sensors. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 6, pp. 7330-7336.
19. Mizunami T., Djambova T.V., Niiho Ts., Gupta S. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 18, no. 2, p. 230-235.
20. Su L., Lu Ch. Multimode fiber Bragg grating based fiber lasers and optical sensors. *Proceedings of OFC*, 2005, pp. OME-16-1 – OME-16-3.
21. Liu T., Wang D., Raenaei R., Cheng X., Zhang L., Bennion I. A low-cost multimode fiber Bragg grating sensor system. *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5634, pp. 54-61.
22. Yong Zh., Zh. Ch., Yom Sh. Multiple parameter vector bending and hightemperature sensors based on asymmetric multimode fiber Bragg gratings inscribed by an infrared femtosecond laser. *Optics Letters*, 2006, vol. 31, no. 12, pp. 1794-1796.
23. Yu H.-H., Wang Yo., Xu Q.-Y. Characteristics of multimode fiber Bragg gratings and their influences on external-cavity semiconductor lasers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 4, pp. 1903-1912.
24. Song D., Fang S., Li B., Zh. J., Sun W. Multi-parameter sensing based on graded-index multimode fiber. *Proceedings of Imaging and Applied Optics*, 2013, pp. JTu4A.29-1 – JTu4A.29-3.
25. Fang Sh., Li B., Song D., Zhang J., Sun W., Yuan L. A smart graded-index multimode fiber based sensor unit for multi-parameter sensing applications. *Optics and Photonics Journal*, 2013, no. 3, pp. 265-267.
26. Schmid M.J., Muller M.S. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 6, pp. 8087 – 8094.
27. Teumin I.I. *Volnovody opticheskoy svyazi* [Waveguides of optical communications]. Moscow, Svyaz' Publ., 1978. 178 p.
28. Snyder A., Love J. *Optical waveguide theory*. London, Chapman & Hall, 1983. 734 p.
29. Grodnev G.I. Perekhodnye pomekhi mezhd u volokonnyimi svetovodami v rezhime malomodovoy peredachi [Crosstalk between fiber-optic waveguides in few-mode transmission mode]. *Elektrosvyaz*, 1981, no. 6, pp. 20-22.
30. Dianov E.M., Prokhorov A.M. Lasers and fiber optics. *Sov. Phys. Usp*, 1986, vol. 29, pp. 166–178. doi: 10.1070/PUI986v029n02ABEH003161.
31. Andrushko L.M., Voznesenskiy V.A., Katok V.B. et al. *Spravochnik po volokonno-opticheskim liniyam svyazi* [Handbook of fiber-optic communication lines]. Kiev, Tekhnika Publ., 1988. 239 p.
32. Bottacchi S. *Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems*. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd., 2006. 654 p.
33. Mazzares D. Vybor volokna i novye standarty menyayut kharakteristiki seti [Choice of fiber and new standards are changing network characteristics]. *Vestnik svyazi*, 2009, no. 5, pp. 33-37.

34. Mazzares D. Vybor opticheskogo volokna dlya tsentrov obrabotki dannykh [Selection of optical fiber for data centers] *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2009, no. 4, pp. 30-32.
35. Becker M. et al. Fiber Bragg Grating Inscription with UV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference for Fiber Laser Applications. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7750, 775015.
36. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, vol. 14, no. 15, pp. 823-825.
37. Varzhel' S.V. et al. Zapis' uzkopolosnykh volokonnykh breggovskikh otrazhateley odinochnym impul'som eksimernogo lazera metodom fazovoy maski [Recording narrowband fiber Bragg reflectors by a single pulse excimer laser by the method phase mask]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik SPbGU ITMO*, 2011, vol. 75, no. 5, pp. 27-30.
38. Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennon I. Point-by-point inscription of sub-micrometer period fiber Bragg gratings. *OSA/CLEO/QELS*, 2008, paper CTuU2.
39. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskie volokna dlya liniy svyazi* [Optical fiber for communication lines]. Moscow, LESARart Publ, 2003. 288 p.
40. Semenov A.B. *Volokonno-opticheskie podsystemy sovremennykh SKS* [Fiber-optic subsystem of modern SCS]. Moscow, Akademiya AyTi, DMK Press, 2007. 632 p.
41. Irujo T. *OM4 fiber – the next generation of multimode fiber*. FOLS Webconference materials, 2010. Accessed at: http://www.fols.org/fols_library/archived_webconferences/index.cfm (accessed 17.01.16)
42. TIA-492-AAAD. Detail specification for 850 nm laser-optimized, 50 μ m core diameter / 125 μ m cladding diameter class Ia graded-index multimode optical fibers of OM4 performance. 2009.
43. Bois Sh. Bend-insensitive multimode fiber improve enterprise networks. *Lightwave*, 2009, no. 4, pp. 7-9.
44. Bourdine A.V. Differentsial'naya modovaya zaderzhka kvartsevykh mnogomodovykh opticheskikh volokon raznykh pokoleniy [Differential mode delay of quartz multimode optical fibers of different generations]. *Foton-Ekspress*, 2008, no. 5-6, pp. 20-22.
45. Bourdine A.V. O diagnostike differentsial'noy modovoy zaderzhki mnogomodovykh opticheskikh volokon [About multimode optical fiber differential mode delay diagnostics]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2008, no. 4, pp. 33-38.
46. Bourdine A.V., Prokopyev V.I., Dmitriev E.V., Yablochkin K.A. Results of conventional field-test equipment application for identification of multimode optical fibers with high DMD. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7374., pp. 73740J-01 – 73740J-07.
47. Bourdine A.V., Yablochkin K.A. Issledovanie defektov profilya pokazatelya prelomleniya mnogomodovykh opticheskikh volokon kabeley svyazi [Investigations of refractive index profile defects of silica graded-index multimode fibers of telecommunication cables]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2010, no. 2, pp. 22 – 27.
48. Bourdine A.V., Praporshchikov D.E., Yablochkin K.A. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7992, pp. 799206-1 – 799206-6.

Received 18.01.2016

УДК 654.16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ОБЪЕМА РЕСУРСА ТЕЛЕФОННОЙ НУМЕРАЦИИ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА ПЕРСПЕКТИВУ

Росляков А.В.¹, Назметдинов Д.Е.², Кабаева К.А.¹

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² ПАО «МегаФон», Самара, РФ

E-mail: arosl@mail.ru

На основе анализа существующей нормативной базы, определяющей порядок распределения и использования ресурсов нумерации единой сети электросвязи Российской Федерации, предложена временная модель закупки и использования ресурса телефонной нумерации оператором сети мобильной связи. Данная модель использована для определения объема необходимого ресурса нумерации на перспективу. Приведен пример прогноза необходимого ресурса телефонной нумерации в ПАО «МегаФон» на период 2015–2017 гг. Прогноз выполнен методом экстраполяции логарифмической функции аппроксимации статистических данных о количестве абонентов в сети ПАО «МегаФон» в 2009–2014 гг.