

Бриллюэновский оптический рефлектометр с бриллюэновским активным фильтром

Г.С.Будылин, Б.Г.Горшков, Г.Б.Горшков, К.М.Жуков, В.М.Парамонов, Д.Е.Симикин

Экспериментально исследована новая схема волоконно-оптического бриллюэновского рефлектометра, в котором селекция спектральной линии спонтанного бриллюэновского рассеяния осуществляется активным бриллюэновским фильтром, в качестве которого используется само тестируемое волокно. Для улучшения характеристик рефлектометра применен циклический код и рамановское усиление сигнала рассеяния. При времени усреднения 5 мин обеспечивается опрос 25 км волокна с пространственным разрешением 4 м и оцифровкой через 1 м. Среднеквадратичное отклонение при определении бриллюэновской частоты составило менее 1.1 МГц. Оценена чувствительность рефлектометра по отношению к температурным изменениям и механической деформации.

Ключевые слова: распределенный датчик, бриллюэновский рефлектометр, волоконная оптика.

1. Введение

После обнаружения сильной зависимости частоты бриллюэновского сдвига от механической деформации оптического элемента, а также заметной зависимости этого сдвига от температуры [1] была впервые высказана идея бриллюэновского рефлектометра [2, 3]. Создание на этой основе распределенного датчика механических деформаций открыло новые возможности контроля состояния инфраструктурных объектов (трубопроводов, мостов и т.д.). Однако техническая реализация бриллюэновского рефлектометра и в настоящее время является сложной задачей, поскольку интенсивность спонтанного бриллюэновского рассеяния (БР) примерно на 20 дБ ниже, чем рэлеевского, к тому же малый частотный сдвиг (около 10.5 ГГц для длины волны 1550 нм) относительно частоты рэлеевского рассеяния затрудняет выделение бриллюэновской линии и точное определение его частоты.

Наиболее удачным техническим решением можно признать гетеродинную схему [4], в которой рассеянное излучение смешивается с излучением гетеродина с образованием биений на частоте бриллюэновского сдвига. Однако использование подобной схемы предполагает применение СВЧ техники и иных дорогостоящих компо-

нентов, в итоге рефлектометр оказывается технически сложным и дорогим.

Известны работы, в которых для выделения бриллюэновской компоненты рассеянного излучения используются оптические приборы, в частности интерферометры Маха–Цендера [5] и Фабри–Перо [6]. Проблемой является обеспечение температурной стабильности и устойчивости системы к механическим воздействиям. Оригинальный способ выделения бриллюэновского излучения был предложен в [7]. Он состоит в использовании для этой цели бриллюэновского усилителя с шириной полосы усиления, сравнимой с шириной линии БР (около 40 МГц для длины волны 1550 нм). До настоящего времени, насколько нам известно, эта схема применительно к бриллюэновской рефлектометрии не была реализована. Однако сама по себе идея использования вынужденного БР для целей спектрометрии находит применение [8].

Цель настоящей работы – экспериментальная проверка возможности построения бриллюэновского рефлектометра на основе бриллюэновского усилителя, выполняющего функцию активного оптического фильтра, и поиск оптимальной конфигурации бриллюэновского рефлектометра с дальностью действия не менее 25 км.

2. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов использовалась установка, схема которой представлена на рис.1.

Зондирующее излучение формировалось следующим образом. Задающий лазерный диод ЛД1 (JDS Uniphase CQF975/5827) с распределенной обратной связью (РОС) (длина волны излучения 1550.65 нм) работал в непрерывном режиме со стабилизацией температуры за счет встроенного элемента Пельтье и стабилизацией тока инжекции на уровне 80 мА. При этом выходная мощность составляла 10 мВт. Импульсы излучения формировались с помощью полупроводникового оптического усилителя ПОУ, затем они усиливались до пиковой мощности порядка единиц ватт эрбиевым волоконным усилителем с накачкой на длине волны 980 нм. Полупроводниковый усили-

Г.С.Будылин. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, химический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Б.Г.Горшков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38

Г.Б.Горшков, Д.Е.Симикин. ООО «ПетроФайбер», Россия, Тульская область, 301664 Новомосковск, Клинский пр., 7; e-mail: gorgb@petrofibre.ru

К.М.Жуков. ООО «Лаборатория электронных и оптических систем», Россия, 105082 Москва, Спартаковская пл., 14, стр. 4

В.М.Парамонов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 4 апреля 2017 г., после доработки – 2 мая 2017 г.

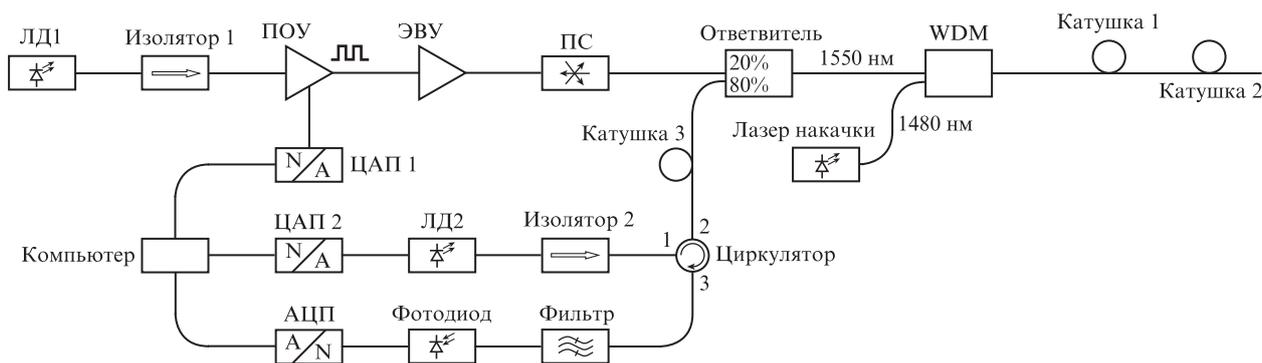


Рис.1. Схема экспериментальной установки: ЛД1 и ЛД2 – когерентные лазеры с распределенной обратной связью; ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель; ЭВУ – эрбиевый волоконный усилитель; WDM – спектральный мультиплексор; ПК – поляризационный скремблер. Длина волокон (все – Fujikura FutureGuide-LWP) катушек 1, 2 и 3 – 25 км, 200 м и 2 км соответственно.

тель управлялся цифро-аналоговым преобразователем ЦАП1 с тактовой частотой 200 МГц, что позволяло формировать как одиночные импульсы, так и произвольные последовательности импульсов. Через поляризационный скремблер ПК и направленный оптический ответвитель зондирующее излучение поступало в исследуемое волокно, намотанное на катушки 1 и 2.

Активный бриллюэновский фильтр был сформирован на основе того же исследуемого волокна, в которое поступает непрерывное излучение второго лазерного РОС-диода ЛД2, аналогичного ЛД1 и работающего на близкой частоте. Его излучение через циркулятор и ответвитель поступало в исследуемое волокно при уровне мощности 2–4 мВт, обеспечивающем усиление в максимуме линии Бриллюэна до 5 дБ для удаленного конца волокна при его длине 25 км. Для получения профиля линии Бриллюэна частота излучения этого лазерного диода сканировалась по линейному закону за счет изменения тока инжекции в малых пределах, необходимых для получения бриллюэновских спектров. В частности, при получении спектра волокна Corning LEAF (рис.2), диапазон сканирования составлял 1000 МГц. Сканирование выполнялось медленно, каждый скан занимал до 5 мин. Линейность обеспечивалась исключительно за счет точности задания тока инжекции лазерного диода (дискретно через 2 мкА, всего 65536 позиций).

Рассеянное в обратном направлении и усиленное за счет эффекта Бриллюэна излучение через ответвитель и циркулятор поступало на фотоприемный модуль, выполненный на основе рп-фотодиода с трансимпедансным усилителем, с шириной полосы частот 50 МГц.

Катушка 3 включена в схему для обеспечения бриллюэновского усиления излучения, рассеянного ближней областью исследуемого волокна, поскольку в отсутствие

катушки рассеянное излучение не испытывает бриллюэновского усиления, и, следовательно, не осуществляется его селекция. Эта катушка также содержит волокно Fujikura FutureGuide-LWP, имеющее один бриллюэновский пик. Длина волокна 2000 м.

Поскольку бриллюэновское усиление является поляризационно-зависимым процессом, для исключения поляризационного фединга («замирания» сигнала) в схему включен поляризационный скремблер собственного изготовления, хаотично изменяющий состояние поляризации излучения; он основан на наведенном двулучепреломлении в волокне, создаваемом пьезоэлементом, работает на частоте 20 кГц. Остаточная поляризация составляет 10%, что достаточно для выравнивания амплитуды спектров по всем каналам дальности, каждый из которых соответствует определенной координате по длине исследуемого волокна.

В используемой конфигурации получаемая в эксперименте ширина спектральной линии определяется сверткой спектров излучения, рассеянного волокном, импульсного лазерного источника и активного фильтра. В свою очередь, спектр бриллюэновского фильтра есть свертка бриллюэновского спектра волокна и спектра излучения непрерывного лазера ЛД2. Отсюда следует необходимость контроля ширины спектральных линий задающих лазерных диодов ЛД1 и ЛД2. По данным производителя ширина линий излучения этих диодов составляет менее 20 МГц. Для оценки ширин линий непрерывных лазеров применялся гомодинный метод с использованием существенно неравноплечего (25 км) интерферометра Маха–Цендера, подобный описанному в [9]. Было установлено, что ширины спектров наших лазерных диодов по уровню половины максимума составляли 5 МГц.

Обязательным условием работы схемы является подавление рэлеевской компоненты рассеяния. Для этого использовался фильтр, состоящий из последовательно соединенных тонкопленочных фильтров с шириной полосы 100 ГГц.

Для оценки спектрального разрешения установки в качестве исследуемого применялся отрезок волокна Corning LEAF (на рис.1 не показан), имеющий характерный спектр БР в виде четырех линий. Поскольку наша установка не дает абсолютных значений бриллюэновского сдвига, этот же отрезок исследовался с целью привязки к истинным частотам с помощью рефлектометра Ando AQ8602. Полученный нами спектр приведен на рис.2. Видно, что все четыре спектральные линии воспроизведе-

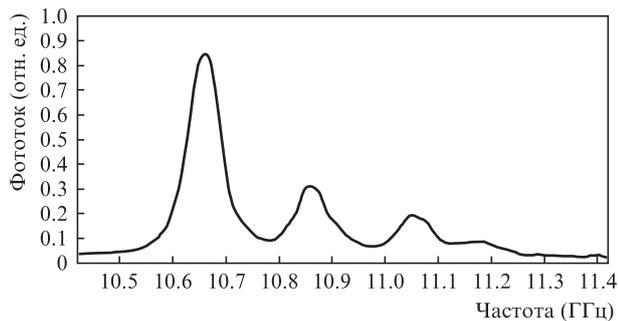


Рис.2. Бриллюэновский спектр волокна Corning LEAF.

ны, при этом ширина основного пика на полувысоте составляет 70 МГц. Эта ширина по описанным причинам превышает истинную ширину спектральных линий БР, но не препятствует измерению положения этих линий.

Первоначально применялся моноимпульсный метод, и в качестве зондирующих использовались одиночные импульсы длительностью 40, 80 и 160 нс. В этом случае вследствие ограничений, обусловленных модуляционной нестабильностью, не удалось получить приемлемых спектров БР на дальности свыше 3–5 км. Однако используемая схема, в отличие от гетеродинных, позволяет воспользоваться сложным кодированием зондирующей посылки, применив циклические кодовые последовательности [10]. Так, в этой работе при использовании циклического кода протяженностью 512 бит получен выигрыш в отношении сигнал/шум более 10 дБ в ситуации, близкой к нашей (в схеме бриллюэновского анализатора). Однако надо иметь в виду, что одновременное существование в исследуемом волокне десятков и сотен импульсов многократно увеличивает длину взаимодействия, при этом вследствие бриллюэновского усиления излучение БР от удаленных участков волокна существенно усиливается этими зондирующими импульсами. Возникает известный разработчикам бриллюэновских анализаторов эффект [11], состоящий в затягивающем действии усиливающей среды на регистрируемую частоту спонтанного БР этих участков. Поэтому и в этом случае возникает ограничение мощности зондирующих импульсов, усугубляющееся с ростом их числа и длительности каждого. Установлено, что при длительности импульса 40 нс, обеспечивающей пространственное разрешение 4 м, оптимальная длина циклического кода для исследуемого волокна длиной 25 км составляет 50–70 бит. Приведенные ниже результаты соответствуют 59-битной кодовой посылке (рис.3).

В работе [11] применительно к бриллюэновскому анализатору реализован так называемый цветовой циклический код, в котором отдельные импульсы в зондирующей последовательности различаются по частоте по меньшей мере на ширину линии бриллюэновского усиления. Это позволяет практически без ограничений увеличивать длину кодовой посылки и избежать эффекта затягивания частоты. К сожалению, в исследуемой нами схеме реализовать подобную идею невозможно. Однако частично ослабить эффект затягивания можно иным способом – составляя волоконную линию по меньшей мере из двух волокон с различающимися значениями частотного сдвига БР. В нашем случае этот прием не использовался.

Полностью от эффекта затягивания частоты можно избавиться, если выделить и усилить не стоксову, а анти-

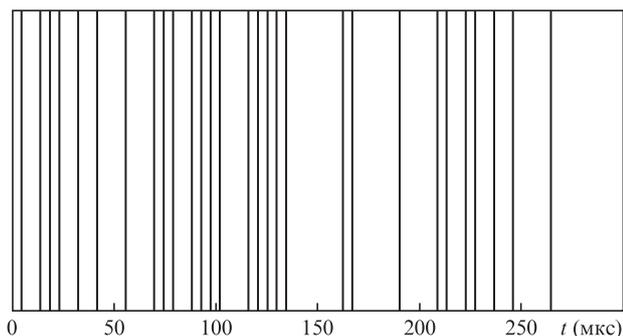


Рис.3. Кодовая посылка на выходе ЦАП1.

стоксову компоненту БР. Однако в этом случае пришлось бы отфильтровывать две линии рэлеевского рассеяния – от зондирующей посылки и от излучения активного бриллюэновского фильтра, что представляется сложным. К тому же ограничение из-за вынужденного БР полностью не исчезает – по мере увеличения произведения мощности зондирующего излучения на суммарную длительность импульсов в кодовой посылке вследствие вынужденного рассеяния растет стоксова компонента таким образом, что полезное зондирующее излучение оказывается в насыщении.

Применение циклического кода позволило существенно улучшить характеристики исследуемой схемы. Однако для достижения заданной дальности действия рефлектометра в конечном счете пришлось воспользоваться рамановским усилением в исследуемом волокне, обеспечиваемым за счет подачи в него излучения полупроводникового лазерного диода Fitel FOL-1402 с длиной волны вблизи 1480 нм и мощностью до 150 мВт.

На рис.4 представлены спектры обратного рассеяния, измеренные в точке 3 циркулятора. Спектры получены с помощью анализатора Ando AQ6319, имеющего спектральное разрешение 12 пм. Кривая 1 представляет собой спектр, соответствующий распространению в исследуемом волокне только импульсной зондирующей кодовой посылки. Из близости мощностей стоксовой и антистоксовой компоненты (различие составляет 2 дБ) следует, что преобладает спонтанное БР. После включения лазерного диода ЛД2 мощность стоксовой компоненты существенно увеличивается (кривая 2), что и требуется для селекции спонтанного БР (спектры получены в отсутствие сканирования при максимальной амплитуде рефлектограммы БР).

На рис.5 показано распределение бриллюэновского сдвига в исследуемом волокне Fujikura FutureGuide-LWP длиной 25 км, а также на отрезке волокна 24760–24950 м (вставка). Время накопления сигнала составляло 5 мин, диапазон сканирования – 200 МГц. Среднеквадратичное отклонение при определении бриллюэновского сдвига в начале волокна составило примерно 0.45 МГц, в конце – 1.05 МГц. Рост шумов к концу волокна свидетельствует о

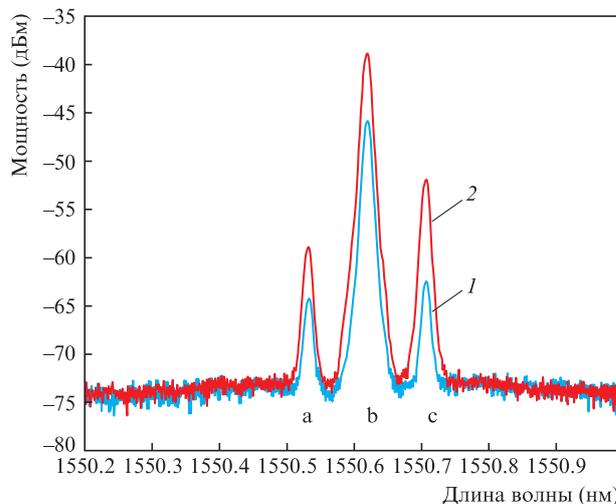


Рис.4. Спектры излучения, обратно рассеянного в исследуемом волокне: а, с – антистоксова и стоксова компоненты БР; б – рэлеевское рассеяние; 1 – рассеяние только от зондирующей последовательности импульсов; 2 – то же после бриллюэновского усиления активным фильтром.

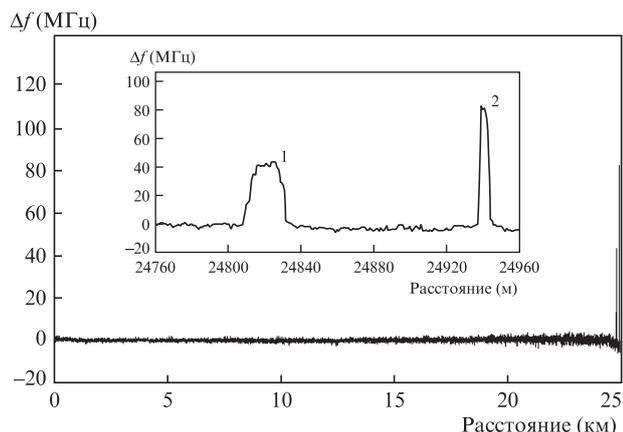


Рис.5. Сдвиг частоты бриллюэновского излучения по длине волокна (на вставке – сдвиг на участке 24760–24960 м).

том, что эффект захвата частоты не является доминирующим (при наличии захвата шумы не растут по мере приближения к дальнему концу волокна). Пространственное разрешение в соответствии с длительностью импульсов равно 4 м.

Вставка на рис.5 иллюстрирует реакцию рефлектометра на температурные изменения и механические деформации на дальности около 25 км. Участок 1 соответствует отрезку волокна, который подвергался нагреву. Катушка с волокном длиной 30 м была погружена в емкость с водой с температурой $\sim 60^\circ\text{C}$. Температура в помещении на момент эксперимента была 27°C . Таким образом, изменение температуры составило примерно 33°C . Как видно из рис.5, бриллюэновский сдвиг частоты составил 40 МГц. Температурный сдвиг частоты в этом случае равен $1.2 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$. Это значение является типичным для телекоммуникационных волокон [12, 13].

Участок 2 на рис.5 соответствует отрезку волокна длиной 9 м, подвергнутому деформации растяжения. Отрезок волокна жестко фиксировался с двух сторон. Ему было придано предварительное натяжение с целью устранения провисания. Затем волокно было растянуто на 1.5 мм, так что его относительное удлинение составило 0.167%. В данном месте оптической трассы сдвиг

бриллюэновской линии составил 82 МГц, а относительное изменение частоты – $490 \text{ МГц}/\%$. Это значение достаточно близко к результатам, опубликованным в [12, 13].

В целом полученные нами характеристики близки к характеристикам рефлектометра Ando AQ8602, в котором используется гетеродинная схема.

3. Заключение

Экспериментально показана возможность создания волоконного бриллюэновского рефлектометра, использующего для выделения спонтанного бриллюэновского рассеяния эффект бриллюэновского усиления в исследуемом волокне (без использования гетеродинирования). Достигнута дальность действия 25 км при пространственном разрешении 4 м, показана чувствительность к температурным изменениям и механической деформации растяжения. Достижению полученных результатов способствовало применение циклических кодов и использование дополнительного рамановского усиления.

1. Горбатов И.Е., Горшков Б.Г. *ФТТ*, **30**, 2226 (1988).
2. Миусов И.М. и др. Авторское свидетельство СССР SU1534304 (1988).
3. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. *Квантовая электроника*, **17**, 345 (1990) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **20**, 283 (1990)].
4. Ohno H., Naruse H., Yasue N., Miyajima Y., Uchiyama H., Sakairi Y., Li Z.X. *Proc. SPIE*, **4596**, 74 (2001).
5. Kee H.H., Less G.P., Newson T.P. *Opt. Lett.*, **25**, 695 (2000).
6. Parker T.R., Farhadiroushan M., Feced R., Handerek V.A., Rogers A.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 645 (1998).
7. Наний О.Е. Патент РФ RU 2229693 (2003).
8. Subías Domingo J. M., Pelayo J., Villuendas F., Heras C.D., Pellejer E. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 855 (2005).
9. Richter L.E., Mandelberg H.I., Kruger M.S., McGrath P.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, 2070 (1986).
10. Soto M.A., Bolognini G., Di Pasquale F., Thévenaz L. *Opt. Lett.*, **35**, 259 (2010).
11. Le Floch S., Sauser F., Llera M., Rochat E. *Proc. SPIE*, **9634**, 963431-1 (2015).
12. Nikl'es M., Thévenaz L., Robert P.A. *Lightwave Technol.*, **15**, 1842 (1997).
13. Parker T.R., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Rogers A.J. *Opt. Lett.*, **22**, 787 (1997).