ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 102–108

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535.92

КОГЕРЕНТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЧАСТОТНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С САМОСКАНИРОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ[1]

© 2020 г. А. Ю. Ткаченко[a,*], Н. Н. Смолянинов[a], М. И. Скворцов[a], И. А. Лобач[a], С. И. Каблуков[a]

[a] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН*
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
**e-mail: alinka.tkacenko@yandex.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.
После доработки 17.03.2020 г.
Принята к публикации 18.03.2020 г.

Представлены первые результаты, демонстрирующие возможность применения когерентного оптического частотного рефлектометра на основе волоконного лазера с самосканированием частоты для сенсорики. В качестве сенсорной линии был использован массив различных волоконных брэгговских решеток (в.б.р.). Было показано, что в разработанном рефлектометре могут быть использованы в.б.р. со спектром отражения, лежащим вне области сканирования нашего источника. Техника частотной рефлектометрии также позволяет осуществлять пространственное разделение в.б.р.-датчиков, даже в случае одинаковых длин волн отражения. Экспериментально продемонстрирована возможность измерения температуры.

DOI: 10.31857/S0032816220040333

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая рефлектометрия является ключевой технологией для распределенного измерения физических величин вдоль оптических линий. Для этого используются зависимости параметров излучения (например, поляризации, интенсивности или оптической частоты), рассеянного в оптическом волокне, от внешних физических воздействий (температуры или механической деформации) [1]. По принципу работы разделяют временную и частотную рефлектометрию. Временная рефлектометрия основана на зондировании волоконной линии короткими импульсами излучения. Короткий импульс, отраженный от дефектов или рассеянный на неоднородностях показателя преломления волокна, детектируется и анализируется. В этом случае местоположение отражателя линейно связано с временем задержки между входным и отраженным сигналами.

Пространственное разрешение временного рефлектометра определяется длительностью импульса и составляет порядка 1 м. Для повышения пространственного разрешения необходимо уменьшать длительность зондирующего импульса, что приводит к снижению чувствительности рефлектометра к измеряемой мощности вследствие уменьшения отношения сигнал/шум. Увеличение пиковой мощности зондирующего импульса для увеличения отношения сигнал/шум ограничено нелинейными процессами в волокне [2], которые искажают измеряемый сигнал.

Когерентная оптическая рефлектометрия в частотной области (для краткости – оптическая частотная рефлектометрия) является принципиально иным методом, позволяющим улучшить пространственное разрешение [3]. Принцип ее работы основан на спектральном анализе интерференционного сигнала, возникающего при смешении зондирующего и рассеянного излучений. Данный анализ может осуществляться при перестройке оптической частоты непрерывного зондирующего излучения. В этом случае пространственная координата отражателей, расположенных вдоль исследуемой линии, пропорциональна частотной координате максимумов фурье-спектра от измеренного в процессе перестройки оптической частоты интерференционного сигнала.

Основным элементом когерентного оптического частотного рефлектометра является перестраиваемый источник излучения, обладающий большой длиной когерентности. В этом случае

[1] Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020” (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

пространственное разрешение определяется диапазоном перестройки длины волны зондирующего лазера. Высокая чувствительность такого рефлектометра к коэффициенту отражения (лучше, чем –120 дБ/мм) позволяет характеризовать вмороженные в оптическое волокно неоднородности показателя преломления. В частности, это свойство позволяет использовать характерные для обычного оптического волокна малые вмороженные флуктуации показателя преломления для различных сенсорных задач [4].

В работе [5] была продемонстрирована возможность применения лазера нового типа – лазера с самосканированием частоты [6] – в качестве источника зондирующего излучения для достижения строгой дискретности перестройки частоты. В лазерах такого типа оптическая перестройка частоты происходит за счет внутренних процессов, происходящих в активном волокне, без использования каких-либо перестраиваемых элементов.

Важной особенностью лазера является генерация последовательности микросекундных когерентных импульсов со спектральной шириной не более 1 МГц и строгой дискретностью оптической частоты. В [5] была показана возможность достижения пространственной дискретизации ~200 мкм и чувствительности по коэффициенту отражения приблизительно до –85 дБ/мм при длине тестовой линии ~9 м.

Испытания проводились на примере точечного отражателя в виде скола волокна. Полученный уровень чувствительности в разработанном приборе не позволил измерить вмороженные флуктуации показателя преломления, которые находятся на уровне –100 дБ/мм (типичный коэффициент обратного рассеяния Рэлея). По этой причине использование такого прибора для каких-либо сенсорных задач ограничено необходимостью увеличения уровня отраженного сигнала.

Этого можно достичь, увеличив модуляцию показателя преломления в оптическом волокне, использовав, например, волоконные брэгговские решетки (в.б.р.) с наведенной внешним образом модуляцией показателя преломления. В данной работе тестирование на сенсорных задачах разработанного частотного рефлектометра на основе самосканирующего лазера проводилось с использованием массива в.б.р.

Очевидно, что если спектр отражения в.б.р. лежит в области частотной перестройки лазера, то частотный рефлектометр аналогичен обычному устройству опроса [7], за исключением получения дополнительной возможности пространственного разделения откликов от в.б.р. с одинаковыми длинами волн. Однако, как будет показано ниже, в разработанном рефлектометре могут быть использованы в.б.р. со спектром отражения, лежащим вне области сканирования нашего источника. В частности, на примере сенсорной линии, состоящей из массива в.б.р. с близкими нерезонансными для сканирующего лазера длинами волн отражения, была показана возможность измерения температуры.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема оптического частотного рефлектометра, аналогичная [5], представлена на рис. 1. Основным элементом схемы является самосканирующий волоконный лазер, изготовленный из компонентов и волокон, сохраняющих поляризацию. Резонатор лазера образован высокоотражающим волоконным кольцевым зеркалом на основе поляризующего волоконного разветвителя с одной стороны и торцом сколотого под прямым углом волокна – с другой.

В качестве активной среды используется волокно, легированное ионами иттербия (Nufern PM-YDF-5/130), длиной 3 м. Активная среда накачивалась многомодовым лазерным диодом с длиной волны 975 нм и мощностью до 9 Вт через объединитель накачки со сквозной сигнальной жилой. Ответвитель 20/80 позволял выводить 80% выходной мощности из резонатора лазера через изолятор. Далее, 10% выходной мощности использовалось для регистрации данных в опорном канале, а остальная часть мощности поступала в схему интерферометра. При уровне мощности накачки 2 Вт перестраиваемый лазер работает в режиме самосканирования длины волны в области 1060–1080 нм (рис. 2).

Излучение лазера поступает в схему интерферометра Маха–Цендера, образованного тремя ответвителями. Одно из плеч интерферометра содержит сенсорную линию, состоящую из массива в.б.р., сформированных в волокне с сохранением поляризации (Fujikura SM98-PS-U25D). Массив в.б.р. состоял из одной в.б.р. с пиком отражения вблизи 1064 нм (коэффициент отражения ~27%) и набора из 28 в.б.р. с пиком отражения вблизи 1092 нм.

Массив в.б.р. на 1092 нм записывался голографическим методом с использованием фазовой маски на ≈1092 нм [8]. Коэффициент отражения в.б.р. варьировался случайным образом. При этом средний коэффициент отражения решеток составил ~30%. Длина каждой в.б.р. была равна ≈40 мм, а расстояние между их центрами ≈240 мм. Оптические спектры отражения для одной из в.б.р. и всего массива в целом представлены рис. 3. Стоит отметить, что в.б.р. с длиной волны 1064 нм была помещена в начало линии. Ее спектр отражения в отличие от всех остальных в.б.р. попадает в область перестройки самосканирующего лазера. По этой причине далее будем разделять в.б.р. на резонансную (на 1064 нм) и нерезонансные (на

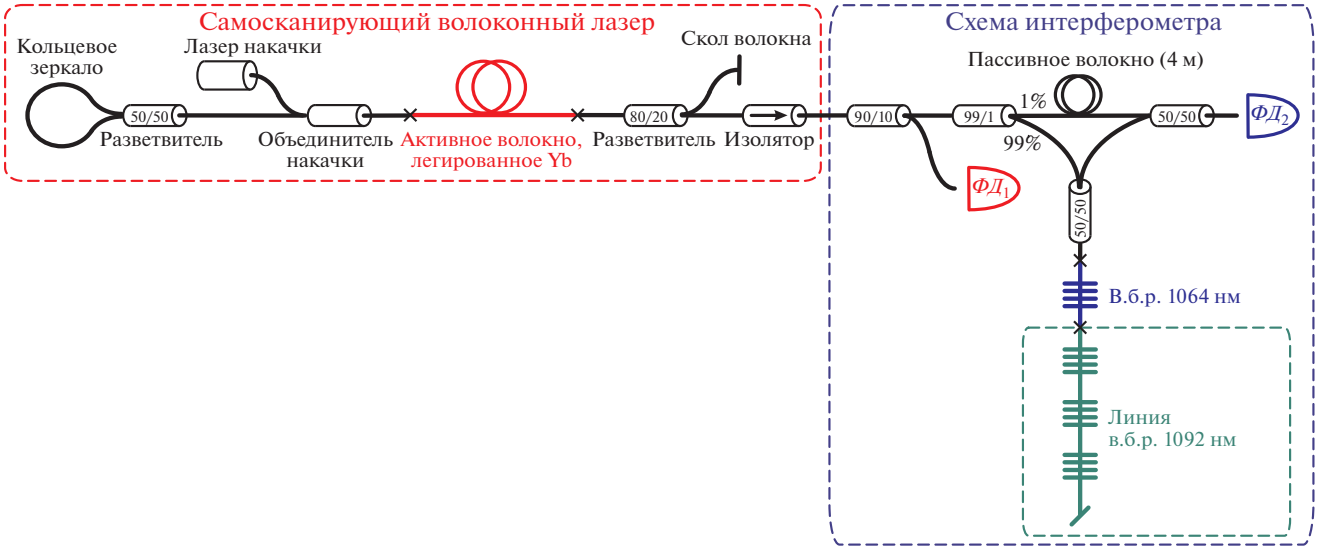

Рис. 1. Схема частотного рефлектометра, состоящего из самосканирующего лазера и интерферометра Маха–Цендера. $ФД_1$ и $ФД_2$ – фотодиоды.

1092 нм). К концу линии был приварен PC/APC-коннектор для подавления паразитного отражения.

ОБРАБОТКА СИГНАЛА

Сигналы на входе и выходе интерферометра регистрировались с помощью двух быстрых фотодетекторов ($ФД_1$ и $ФД_2$ на рис. 1 соответственно) с полосой пропускания 1 ГГц (Thorlabs, DET01CFC) и оцифровывались с помощью модуля, состоящего из двух частей – аппаратно-программного устройства для поиска пиков и программы для персонального компьютера, выполняющей разбивку потока данных на отдельные измерения, соответствующие одному сканированию, с их последующей обработкой.

Аппаратная часть, реализованная на микроконтроллере STM32F303 со встроенным аналого-цифровым преобразователем, работает на частоте дискретизации ~5 МГц и позволяет одновременно оцифровывать нескольких аналоговых сигналов. Известно, что перестраиваемый лазер генерирует микросекундные импульсы. В процессе сбора и обработки данных ведется поиск вершин импульсов в опорном сигнале. Модуль может детектировать импульсы, следующие с интервалом от 13 мкс и длительностью одного импульса от 2 мкс (10 точек на импульс), при этом само время сбора данных неограниченно. Модуль передает усредненное по 10 точкам значение амплитуды импульсов опорного и интерференционного сигналов, а программная часть на компьютере делит непрерывный поток данных на отдельные измерения (сканы) длительностью порядка 20 с.

Для устранения влияния флуктуаций мощности входного излучения проводилась поимпульсная нормировка выходного интерференционного сигнала на опорный входной. Для используемого

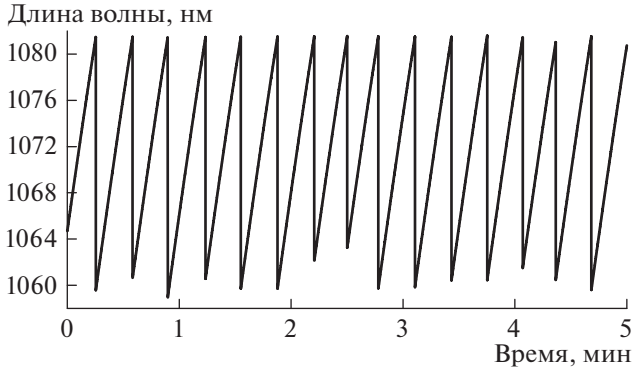

Рис. 2. Характерная динамика длины волны самосканирующего лазера.

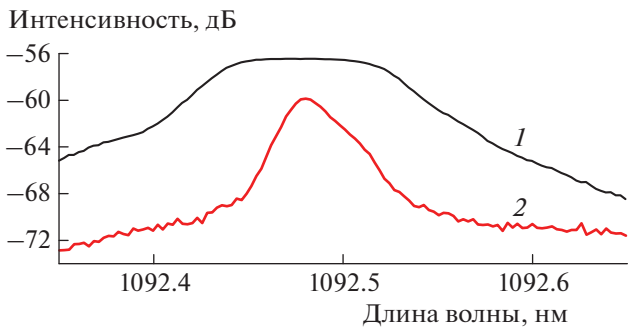

Рис. 3. Оптические спектры для массива (*1*) и единичной в.б.р. (*2*).

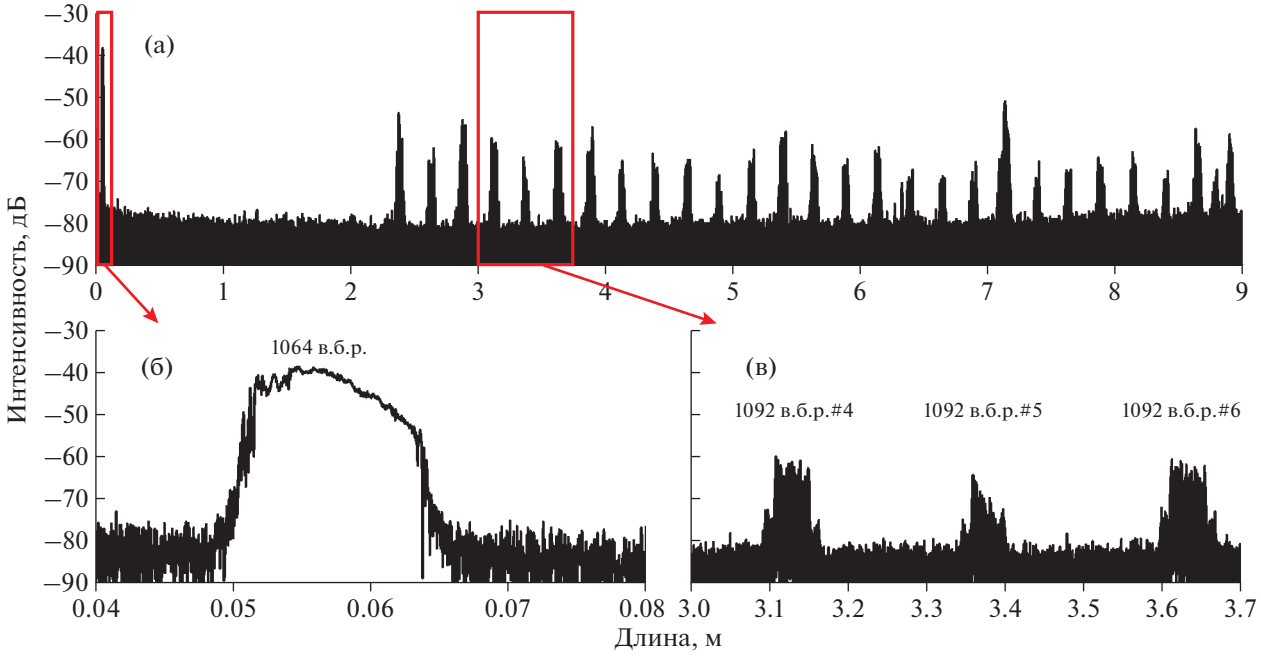

Рис. 4. Рефлектограмма сенсорной линии в разных масштабах.

лазера с самосканированием частоты один импульс во временной области соответствует одной определенной оптической частоте в спектральной области. На протяжении одного скана все импульсы являются эквидистантными в частотной области, поскольку оптическая частота изменяется между импульсами на один интервал межмодовых биений ~5.5 МГц.

Благодаря линейной связи оптической частоты и номера импульса можно получить спектральную зависимость нормированной амплитуды сигнала интерференции, основываясь на относительном номере импульса. Рефлектограмма, т.е. продольное распределение отраженного сигнала вдоль волоконной линии, получалась в результате применения быстрого преобразования Фурье к зависимости нормированного сигнала интерференции от оптической частоты (номера импульса).

Пример рефлектограммы для изучаемой сенсорной линии представлен на рис. 4. На рис. 4а видно, что рефлектограмма состоит из множества пиков. Каждый пик соответствует отдельной в.б.р. Из рис. 4а видно, что амплитуда сигнала отражения резонансной в.б.р. выше, чем у нерезонансных в.б.р. Это связано с тем, что в.б.р. 1064 нм попадает в диапазон перестройки самосканирующего лазера, а отражение нерезонансных в.б.р. сильно подавлено. Также на рефлектограмме можно увидеть, что фактическая длина в.б.р. 1064 нм составляет ~1 см, а у в.б.р. 1092 нм она ~4 см, что для нерезонансных в.б.р. соответствует их реальным условиям записи.

Нормированный интерференционный сигнал соответствует отражению линейки в.б.р. целиком. Для получения оптического спектра отражения отдельной в.б.р. в линии необходимо провести обратное преобразование Фурье не для всей рефлектограммы, а только для области, в которой находится интересующая нас в.б.р. На рис. 5 приведены восстановленные спектры резонансной в.б.р. (1064 нм) (рис. 5а, 5в) и четвертой нерезонансной в.б.р. (1092 нм) (рис. 5б, 5г) для двух реализаций сканирования.

Пример двух реализаций на рис. 5а, 5в показывает, что спектры одной и той же в.б.р. в этом случае могут отличаться с точностью до постоянного сдвига по частоте. Этот относительный сдвиг возникает в результате того, что границы области самосканирования длины волны в лазере флуктуируют во времени (рис. 2). Это смещение границ, а также соответствующее им смещение спектров можно найти, применяя корреляционный анализ к измеренным оптическим спектрам (рис. 6).

На рис. 6 показаны корреляционные функции для резонансной (кривая *1*) и нерезонансной (кривая *2*) в.б.р. В обоих спектрах наблюдается по одному узкому пику. Его положение в обоих случаях совпадает и соответствует величине относительного смещения оптических спектров. Это означает, что для применения такой системы на практике требуется использовать дополнительный частотный репер, как в работе [7], или стабилизировать границы лазера сканирования [9, 10]. В нашей работе был применен частотный репер.

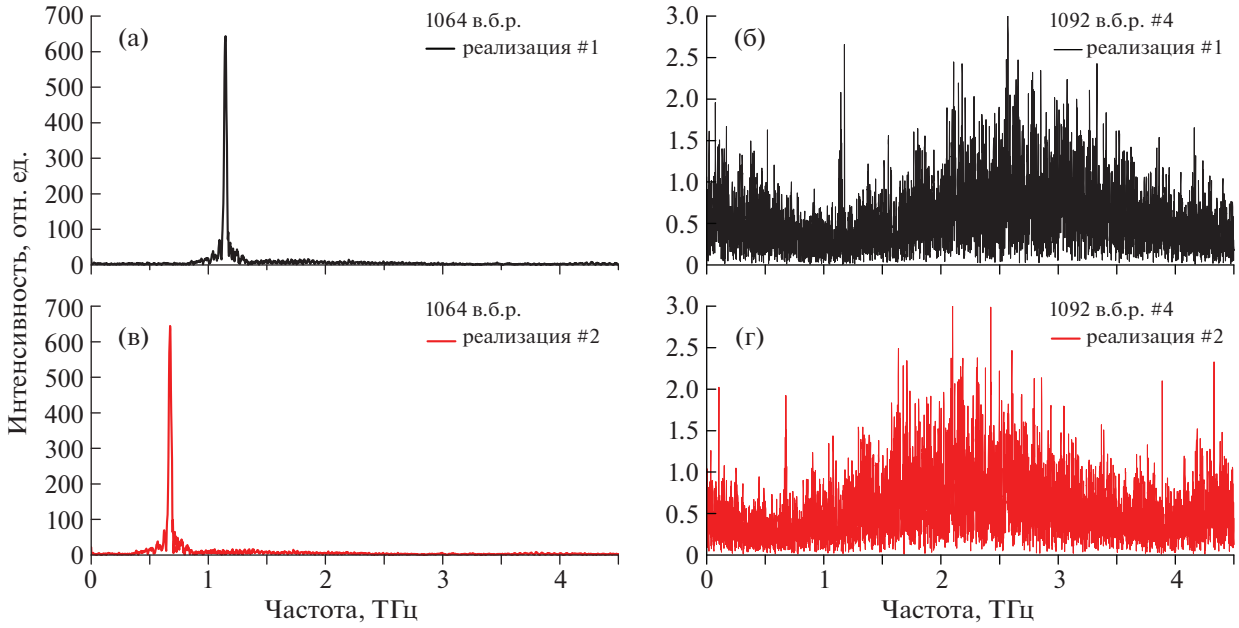

Рис. 5. Спектры резонансной (**а, в**) и нерезонансной (**б, г**) решеток при двух различных реализациях сканирования и при комнатной температуре.

Оптический спектр нерезонансной в.б.р. (рис. 5б, 5г) имеет более сложную структуру по сравнению с резонансной в.б.р. и на первый взгляд имеет случайное наполнение. Однако корреляционный анализ двух реализаций показывает наличие узкого корреляционного пика, соответствующего такому же смещению, что и для резонансной в.б.р. В частности, это свидетельствует о наличии некоторой фиксированной структуры в спектре отражения в.б.р., которая задается модуляцией показателя преломления. Этот факт может быть использован для сенсорных задач. При этом ширина корреляционного пика для нерезонансной в.б.р. существенно меньше, чем для резонансной, что можно связать с большей физической длиной нерезонансных в.б.р. По этой причине, было решено использовать в качестве частотного репера одну из нерезонансных в.б.р. (1092 в.б.р. #5).

Для демонстрации сенсорных задач одна из в.б.р. (1092 в.б.р. #4) помещалась в термостат, позволяющий производить нагрев от комнатной температуры до 100°C. В экспериментах анализировалась корреляционная функция спектров отражения в.б.р. при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии. Смещение пика корреляции может быть связано как с нагревом, так и со случайным началом частотного сканирования лазера.

Для исключения последнего вклада проводился учет сдвига по корреляционному пику реперной в.б.р., находящейся при комнатной температуре. Для этого корреляционный спектр для тестовой 1092 в.б.р. # 4 смещался по оси частот как целое на величину смещения пика в корреляционном спектре реперной 1092 в.б.р. #5 (рис. 7).

Для каждой температуры (25, 50, 75, 100°C) измерялись две реализации спектров. Рис. 7 показывает смещение корреляционного узкого пика в область меньших частот при нагреве нерезонансной в.б.р. Величина смещения корреляционного пика линейно связана с температурой (рис. 8) с

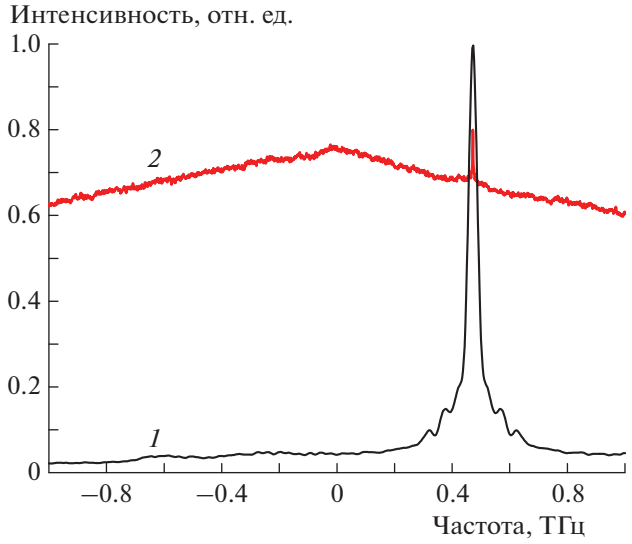

Рис. 6. Корреляционные функции между двумя спектрами для резонансной (*1*) и нерезонансной (*2*) решеток.

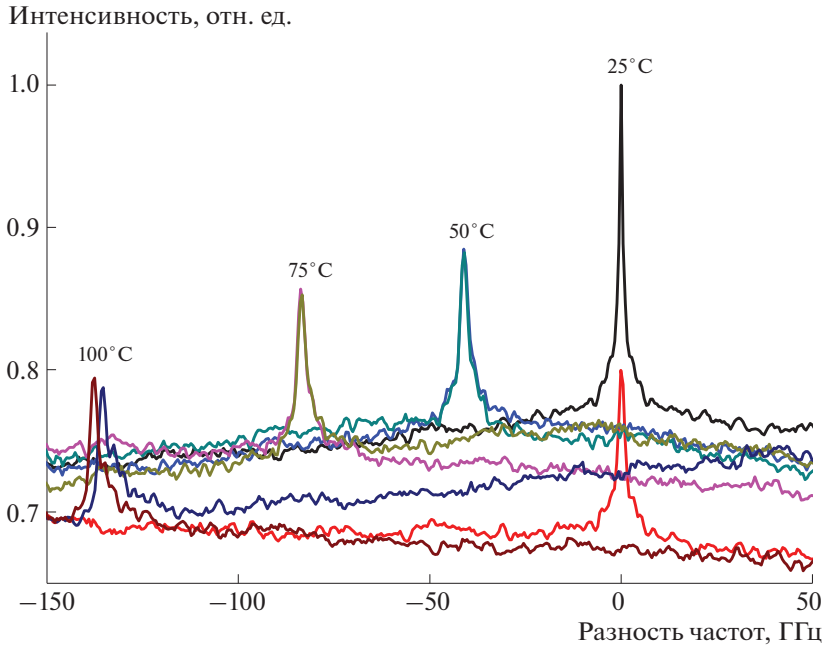

Рис. 7. Функции корреляции между спектрами отражения нерезонансной в.б.р. при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии с учетом компенсации сдвига частоты по дополнительной реперной решетке, расположенной при комнатной температуре.

наклоном 1.83 ГГц/°C (0.73 нм/100°C), что близко к чувствительности стандартной в.б.р. в области 1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для демонстрации сенсорных применений разработанного частотного рефлектометра на основе самосканирующего лазера нами были протестированы различные волоконные брэгговские решетки показателя преломления. Показано, что в качестве чувствительного элемента могут выступать в.б.р., как попадающие, так и не попадающие в область перестройки лазера. В первом случае частотный рефлектометр аналогичен обычному устройству опроса [7].

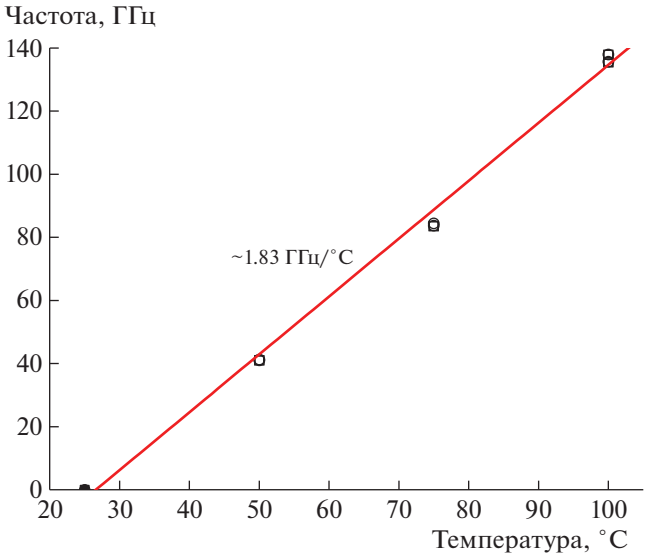

Рис. 8. Зависимость частоты смещения корреляционного пика для нерезонансной решетки (1093 в.б.р. #4) от температуры нагревания.

В случае нерезонансной в.б.р. также возможно измерение смещения спектра отражения в.б.р., что позволяет измерять температуру. Преимуществом такой системы нерезонансных в.б.р. является возможность пространственного разделения откликов даже для в.б.р., имеющих одинаковые длины волн отражения. К недостаткам системы можно отнести нестабильность границ сканирования лазера, которую необходимо учитывать с помощью введения дополнительного частотного репера. Альтернативным способом эту проблему можно решить с помощью введения в резонатор лазера спектрально-селективных элементов, позволяющих уменьшить флуктуации границы области сканирования до единиц пикометров [9, 10].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы госзадания (№ гос. рег. АААА-А19-119112990054-4). В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования “Высокоразрешающая спектроскопия газов и

конденсированных сред" Институт автоматики и электрометрии СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hartog A.H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2018.
2. *Agrawal G.* Nonlinear Fiber Optics. Cambridge: AcademicPress, 2012.
3. *MacDonald R.I.* // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 1840. https://doi.org/10.1364/AO.20.001840
4. *Zhao M., Tu G., Benli Yu B., Lin J.* // Proc. SPIE 10821. Advanced Sensor Systems and Applications VIII. 2018. P. 1082125. https://doi.org/10.1117/12.2502715
5. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И.* // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 12. С. 1121. https://doi.org/10.1070/QEL17165
6. *Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A.* // Laser Phys.Lett. 2014. V. 11 (4). P. 045103. https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/4/045103
7. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А.* // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 37. https://doi.org/10.15593/2411-4367/2016.01.03
8. *Skvortsov M.I., Abdullina S.R., Vlasov A.A., Zlobina E.A., Lobach I.A., Terentyev V.S., Babin S.A.* // Quantum Electronics. 2017. V. 47. № 8. P. 696. https://doi.org/10.1070/QEL16421
9. *Tkachenko A.Yu., Vladimirskaya A.D., Lobach I.A., Kablukov S.I.* // Opt.Lett. 2018. V. 43. Issue 7. P. 1558. https://doi.org/10.1364/OL.43.001558
10. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Подивилов Е.В., Каблуков С.И.* // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 12. С. 1132. https://doi.org/10.1070/QEL16854