

УДК 681.586.5

В.А. Симонов¹, Е.В. Голиков¹, В.С. Терентьев¹, А.В. Достовалов^{1,2}¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Российская Федерация²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Российская Федерация

ВБР В БЕССЕРДЦЕВИННОМ КВАРЦЕВОМ ВОЛОКНЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Впервые продемонстрирована возможность измерения высоких температур вплоть до 1200 °С с помощью ВБР с центральной длиной волны 985 нм, записанной в бессердцевинном чистокварцевом волокне методом фемтосекундной поточечной записи. При этом длина бессердцевинного волокна от ВБР до соединения с многомодовым транспортным волокном была не менее 50 см, а средняя температурная чувствительность составила около 9 пм/°С. Показано, что такая ВБР остается стабильной при температурах вплоть до 1150 °С в течение часа. При 1200 °С наблюдается деградация коэффициента отражения. Использование полностью многомодовой схемы опроса позволило существенно повысить интенсивность отраженного света и снизить влияние модовой интерференции на регистрируемый спектр ВБР, а выбор спектрального диапазона до 1100 нм позволяет использовать сравнительно недорогие спектральные приборы на основе кремниевых фотоприемников.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, ВБР-датчики, бессердцевинное волокно.

V.A. Simonov¹, E.V. Golikov¹, V.S. Terentyev¹, A.V. Dostovalov^{1,2}¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

FBG IN CORELESS SILICA FIBER FOR HIGH TEMPERATURE MEASUREMENTS

The paper demonstrates for the first time the possibility of measuring high temperatures up to 1200 °C using an FBG with central wavelength 985 nm formed in a coreless pure silica fiber using the femtosecond point-by-point FBG-writing technique. In our case, the length of the coreless fiber from the FBG to the connection with the multimode transport fiber was not less than 50 cm, and average temperature sensitivity was about 9 pm/°C. It is shown that such an FBG remains stable at temperatures up to 1150 °C for at least an hour. At 1200 °C, degradation of the reflectivity was observed. The use of a fully multimode interrogation scheme made it possible to significantly increase the intensity of reflected light and reduce the effect of mode interference on the obtained FBG spectrum, and the choice of a spectral range of up to 1100 nm makes it possible to use relatively inexpensive spectral devices based on silicon photodetectors.

Keywords: fiber Bragg gratings, FBG-sensors, coreless fiber.

Введение

Точный контроль высокой температуры необходим в различных областях науки и техники. Например, измерение температуры в камере сгорания турбореактивных двигателей или в котлах и агрегатах котельных необходимо для повышения эффективности сгорания топлива, а также для предотвращения выхода на критические режимы работы. С одной стороны, возрастает экономичность эксплуатации и обслуживания, а с другой – снижается негативное влияние на экологию от выбросов продуктов горения. Самыми распространенными традиционными методами, по-видимому, являются терморезистивный, термоэлектрический и пирометрический [1]. Однако преимущества волоконных датчиков вообще и для измерения высоких температуры в частности состоят в их нечувствительности к электромагнитным помехам, стойкости ко многим агрессивным условиям среды, возможности их мультиплексирования в одной измерительной линии и осуществлении удаленных измерений.

В то же время наиболее распространенные волоконно-оптические датчики на основе ВБР, сформированные традиционным методом УФ-записи, хорошо работают при нормальных и низких температурах, вплоть до криогенных [2], но деградируют при температурах выше 300 °С. Существует техника регенерации таких УФ ВБР, позволяющая получить ВБР с долговременным рабочим диапазоном до 900 °С [3]. При повышении температуры до некоторого значения (около 300–500 °С, в зависимости от примесей в составе волокна) изначально сформированная периодическая структура сначала стирается – коэффициент отражения решетки существенно снижается, – а при дальнейшей выдержке решетка начинает восстанавливаться: коэффициент отражения начинает расти, хотя и остается ниже изначального. Этот эффект связывают с процессом кристаллизации в областях изначальной модификации, возникающей из-за изменения направления внутренних напряжений на границе сердцевин и оболочки [4]. Такие восстановленные ВБР (ВВБР, RFBG – regenerated fiber Bragg gratings) уже могут работать вплоть до температуры отжига. При этом предельные температуры зависят также от состава волокна, например, для ВВБР в волокне с высоколегированной бором (~ 20 мол. %) и германием (~ 33 мол. %) сердцевиной и легированной фосфором (~ 11 мол. %) и фтором (< 4 мол. %)

оболочкой продемонстрирована предельная достижимая рабочая температура в 1295 °С [5]. Хотя при этом ВБР сохранилась, волокно стало крайне хрупким, что критично в предполагаемых условиях работы датчика. К тому же время работы при такой температуре сравнительно невелико. Вариант такого датчика на ВВБР с рабочим диапазоном до 1000 °С был успешно опробован НАСА для измерения температуры выхлопа турбовентиляторного двигателя Pratt & Whitney F117 [6].

В последнее время стремительно развиваются методы импульсной фс лазерной записи структур показателя преломления, в том числе ВБР. Так, в частности, показано, что ВБР, записанные по данной методике, в одномодовых оптических волокнах могут без дополнительных манипуляций работать при гораздо больших температурах, чем записанные УФ излучением, – вплоть до 1000 °С [7].

Процесс деградации таких решеток начинается при температуре >1050 °С [8]. Эти ограничения связаны с эффектом температурного размягчения легированных материалов сердцевины и/или оболочки волокна. Так как оптические волокна содержат примеси в сердцевине и/или оболочке для формирования световедущей сердцевины, то их температура размягчения ниже, чем у чистого кварца.

Самыми высокотемпературными среди волоконных оптических датчиков являются, по-видимому, сформированные в сапфировых световодах на основе кристаллических стержней, которые способны выдерживать температуру до 2000 °С [9]. Однако их стоимость чрезвычайно высока по сравнению с кварцевыми оптическими волокнами, а техника опроса сложнее из-за большого количества направляемых поперечных мод и низкого качества боковой поверхности стержней, что приводит к большим потерям при распространении света, снижает максимальный коэффициент отражения ВБР и увеличивает ее спектральную ширину. Недавно продемонстрирована возможность одновременного формирования в таких стержнях одномодового волновода длиной 4 см и ВБР методом поточечной фс записи [10]. Несмотря на высокий коэффициент отражения таких ВБР в 90 %, на текущий момент потери в таком волноводе составляют около 1,5 дБ/см, что существенно ограничивает удаленность точки измерения от соединения с транспортным кварцевым волокном.

Как уже упоминалось, основным ограничением при использовании ВБР в стандартных волокнах является наличие легатов, снижающих

температуру размягчения составляющих материалов. В данной работе предлагается решение данной проблемы за счет применения ВБР, сформированных в чистокварцевом бессердцевинном волокне из высокочистого плавленого кварца, рабочая температура которого превышает 1100 °С. Например, для синтетических стекол марок Infracil и HOQ производства Heraeus допускается долговременная работа при температурах 1150 °С и кратковременная при 1300 °С, в то время как для марок Suprasil и Spectosil – до 950 °С и 1200 °С соответственно. Такие волокна совместимы со стандартными волокнами и оборудованием для создания систем мониторинга температуры и деформации. Стоимость бессердцевинных кварцевых волокон сравнительно невелика, но из-за отсутствия световедущей сердцевинки, аналогично стержням из кристаллического сапфира, появляется ограничение на длину линии и чистоту поверхности, что снижает диапазон потенциальных применений. Также чистокварцевые волокна имеют высокую радиационную стойкость [11], что может быть востребовано в аэрокосмических и специальных применениях. При этом использование традиционной технологии УФ записи для формирования ВБР в таких типах волокон принципиально невозможно из-за отсутствия эффекта фоточувствительности в нелегированном кварцевом стекле. В то же время модификация показателя материала волокна возможна с помощью фс лазерных импульсов за счет нелинейного поглощения излучения при высокой интенсивности поля в области фокусировки [12].

На сегодняшний день продемонстрирована возможность формирования в бессердцевинном кварцевом волокне квазираспределенной линии из 10 ВБР в области 1440–1620 нм методом поточечной фс лазерной записи в 1 и 4 порядках [13, 14], при этом ВБР имела два слоя нанесенных от оси волокна на ± 20 мкм для увеличения интенсивности отражения. Для опроса использовался многомодовый спектрометр, длина каждой ВБР составляла 5 мм, а вся линия располагалась на расстоянии 10–20 см от соединения с транспортным многомодовым волокном. В работах продемонстрирована долговременная стабильность таких решеток в течение 24 часов при температуре 1100 °С, чувствительность около 15 пм/°С и хорошая циклическая повторяемость в течение 7 циклов нагрева и охлаждения от 500 °С до 1100 °С.

Основной целью данной работы является экспериментальная проверка возможности измерения температуры свыше 1100 °С с помощью

ВБР, сформированных поточечным методом с помощью фс лазерных импульсов в чистокварцевом бессердцевинном волокне. При этом предлагается использовать более коротковолновый спектральный диапазон 900–1000 нм, который представляется экономически более выгодным по сравнению со стандартным для телекоммуникационных и сенсорных применений 1500–1600 нм с точки зрения промышленного применения из-за существенно меньшей стоимости устройств опроса на основе кремниевых фотоприемных модулей. К тому же интенсивность температурного свечения зависит от длины волны как λ^{-5} , то есть влияние фоновой засветки в нашем случае будет меньше.

1. Методы и подходы

Образцы ВБР были созданы в кварцевом бессердцевинном световоде Thorlabs FG125LA с диаметром 125 мкм с помощью поточечного метода записи фемтосекундным лазерным излучением (длина волны 1026 нм, длительность импульсов 230 фс) с протяжкой световода через ферулу, при котором каждый штрих решетки создается одним лазерным импульсом, сфокусированным микрообъективом Mitutoyo 50x с числовой апертурой NA=0,55 в центральную область стержня (рис. 1, а) [12].

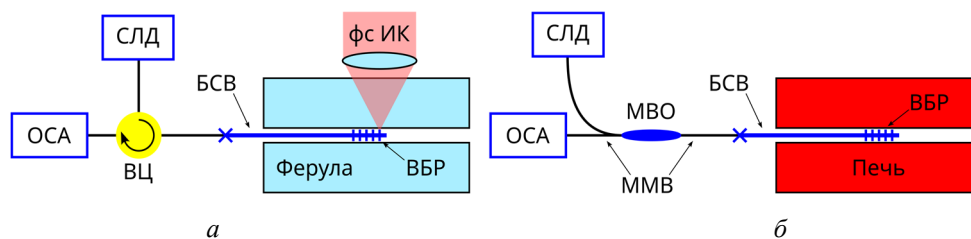


Рис. 1. Схема записи (а): СЛД – суперлюминесцентный диод, БСВ – бессердцевинное оптическое волокно, ОСА – оптический спектроанализатор, ВЦ – волоконный циркулятор; схема эксперимента (б): МВО – многомодовый волоконный ответвитель, ММВ – многомодовое оптическое волокно

При этом сам световод перемещался через точку фокусировки с постоянной скоростью высокоточным линейным позиционером при фиксированной частоте следования лазерных импульсов (1 кГц). Несмотря на возможность формирования ВБР без снятия акрилатной или полиимидной защитной оболочки при записи фс лазерными импульсами [15], в настоящей работе защитное покрытие удалялось, так как, во-первых, при нагреве выше 150 °С она сгорит и может деформировать

и загрязнить продуктами горения волокно, а, во-вторых, данное волокно предназначено для терминирования (подавления отражения и рассеивания излучения), поэтому имеет полимерную оболочку с показателем преломления выше, чем у кварца. Запись ВБР длиной 10 мм осуществлялась при фиксированной энергии импульсов ≈ 1 мкДж, при которой в материале происходит образование микропустот и локальных напряжений, что увеличивает эффективное значение модуляции показателя преломления.

Спектры отражения полученных ВБР (рис. 2) были измерены непосредственно после записи с помощью оптической схемы (см. рис. 1, а): излучение суперлюминесцентного диода (СЛД, Innolume SLD-1000-100-PM-25) с центральной длиной волны 1000 нм, шириной спектра >80 нм и интегральной мощностью до 25 мВт проходило через волоконный циркулятор (ВЦ), проходило через сварное соединение одномодового и бессердцевинного волокон (БСВ), отражалось от ВБР и регистрировалось с помощью оптического анализатора спектров (ОСА, Yokogawa AQ6370). Расстояние от соединения с одномодовым волокном до сформированной ВБР при этом составляло 2–3 см. Стоит отметить, что в таком волноводе, который является многомодовым, поддерживается большое количество направляемых поперечных мод, которое определяется диаметром стержня (типичное значение 125 мкм) и разницей показателей преломления стержня и окружающей среды (0,44 для воздуха). При этом все эти моды взаимодействуют со сформированной ВБР, длина волны отражения уменьшается вместе с волновым числом моды, а коэффициент отражения пропорционален интегралу перекрытия профиля моды с поперечным сечением модификации показателя преломления. А так как размер мод существенно больше таковой для одномодового волокна (Coherent 1060-XP), то для отраженного излучения, зашедшего обратно в одномодовое волокно, характерны значительные потери, а в спектре отражения ВБР присутствует ярко выраженная интерференция мод. При этом, отличия в спектрах ВБР на рис. 2 может объясняться разницей положения штрихов в поперечном сечении для разных образцов из-за сложности фокусировки точно в центр волокна, так как отсутствует ориентир в виде сердцевинки.

Из-за описанных выше особенностей для проведения экспериментов по измерению температуры была использована многомодовая схема (см. рис. 1, б), в которой излучение суперлюминесцентного диода (СЛД)

заходило в многомодовый волоконный ответвитель (МВО, Thorlabs TM105FS1B). В качестве транспортного волокна использовалось многомодовое волокно со ступенчатым профилем преломления и сердцевинной диаметром 105 мкм (ММВ, Thorlabs AFS105/125Y), которое соединялось сваркой с отрезком бессердцевинного волокна (БСВ, Thorlabs FG125LA) длиной 50 см без акрилатной защитной оболочки.

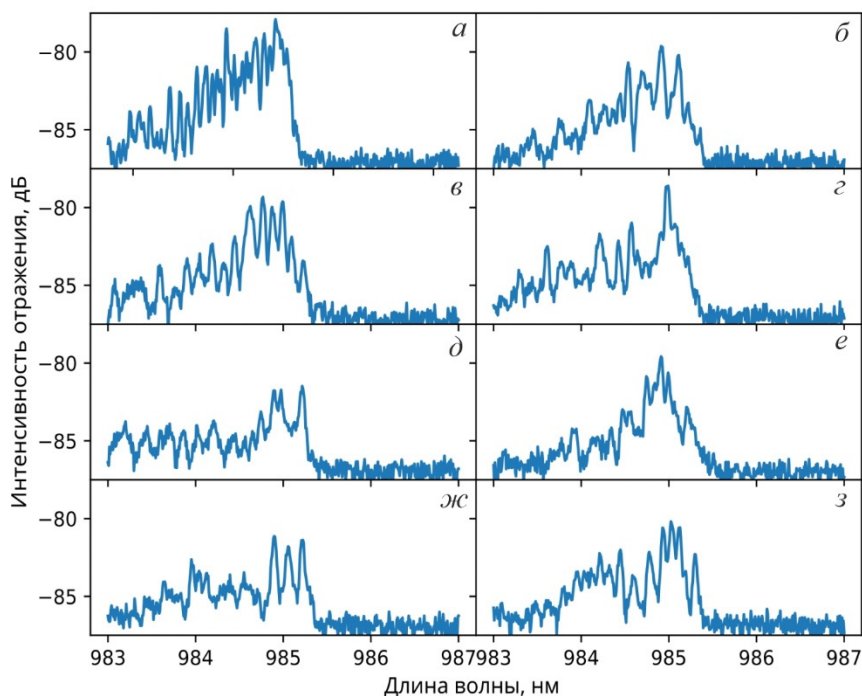


Рис. 2. Спектры отражения записанных ВБР

В эксперименте использовалась ВБР (спектр которой представлен на рис. 2, д), которая находилась на значительно большем расстоянии, чем при измерении в одномодовой схеме – около 45 см от соединения. Волокно размещалось в трубчатой печи (LF-50/500-1200 с максимальной температурой нагрева до 1200 °С) так, что ВБР находилась в центральной области трубы, где измеряется температура встроенной термопарой. Отраженное излучение через второй порт ответвителя направлялось на оптический анализатор спектра (OCA, OceanOptics USB4000-XR1-ES) с диапазоном измерения 200 – 1100 нм и спектральным разрешением <math>< 2</math> нм при размере входной щели 25 мкм. Такая схема измерения позволяет снизить потери на соединении с бессердцевинным

волоконном и уменьшить влияние модовой интерференции за счет многомодового сбора. Минусами данного подхода являются повышенная чувствительность к изменению положения (изгибу) транспортного волокна, увеличение спектральной ширины ВБР и высокий уровень фонового излучения от нагретой печи.

Поскольку в отличие от ВБР, сформированных в одномодовых волокнах, спектр отражения многомодовых ВБР значительно более асимметричен, то для определения центральной длины волны использовалась аппроксимация кубическим полиномом спектра отражения вблизи максимума отражения ВБР, а в качестве длины волны отражения брался корень производной аппроксимационного полинома, который ближе всего к максимуму отражения ВБР. Чтобы другие возникающие в ходе эксперимента возможные максимумы интенсивности, например, вызванные температурным свечением, ложно не идентифицировались как ВБР, в алгоритм добавлено условие на максимальное изменение $\lambda_{ВБР}$ между измерениями на $\pm 2,3$ нм, что примерно соответствует половине ее спектральной ширины.

2. Результаты экспериментов

Для проверки работоспособности такой ВБР печь сначала нагревалась до температуры 1100 °С, при которой производилась выдержка в течение 30 минут, далее – до 1150 °С с выдержкой в течение 15 минут и, наконец, до 1200 °С с выдержкой 10 минут, весь эксперимент занимал около 3 часов. В течение всего времени работы печи производилась автоматизированная запись спектров отражения ВБР в описанной выше схеме с интервалом около 30 секунд. На рис. 3, *а* представлены зависимости температуры T , длины волны отражения ВБР $\lambda_{ВБР}$ и нормированной амплитуды отражения R от времени. Из графика для длины волны отражения ВБР $\lambda_{ВБР}$ видно, что она с хорошей точностью повторяет изменения температуры. При этом коэффициент отражения R сначала растет до температуры ~ 600 °С, а затем снижается, но при температурах выдержки 1100 и 1150 °С его флуктуация незначительна. Во время выдержки при 1200 °С амплитуда отражения уже падает монотонно со временем, а длина волны начинает флуктуировать (дополнительно спектры отражения при 1200 °С представлены на рис. 5, *б*). В момент отключения печи (175 минут) произошел скачок значений длины волны ВБР и отражения, что, по-видимому, соответствует слою волокна. Вероятно,

произошло размягчение стекла и прилипание к стенкам корундовой трубки, что при остывании привело к отрыву материала из-за разности КЛТР. Зависимость длины волны ВБР от температуры достаточно близка к линейной со средней чувствительностью около $9 \text{ пм}/^\circ\text{C}$ (см. рис. 3, б), но более описывается уже полиномом четвертой степени

$$P(T) \approx 3 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 7,3 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2,24 \cdot 10^{-3} \cdot T + 983,6,$$

для которого среднеквадратическое отклонение (СКО) восстановленной температуры от установленной составляет $33,2 \text{ }^\circ\text{C}$ на всем интервале. При постоянных температурах 1100, 1150 и 1200 $^\circ\text{C}$ СКО значений $\lambda_{\text{ВБР}}$ составляет 314, 124 и 167 пм соответственно, что соответствует точности восстановления температуры 37,4, 8,4 и 5,4 $^\circ\text{C}$. Большой разброс значения $\lambda_{\text{ВБР}}$ при температуре 1100 $^\circ\text{C}$, вероятно, связан с процессом отжига структуры модификации показателя преломления, что приводит к изменениям параметров ВБР.

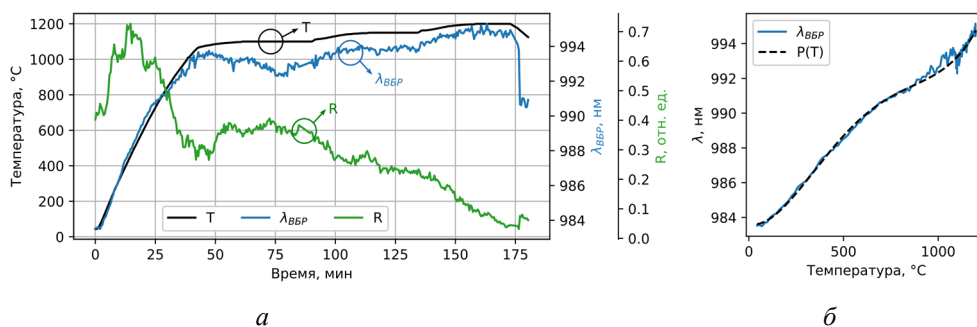


Рис. 3. Зависимости температуры T , длины волны отражения ВБР $\lambda_{\text{ВБР}}$ и нормированной амплитуды отражения R от времени (а); зависимость длины волны от температуры и аппроксимационный полином четвертой степени $P(T)$ (б)

Значение СКО на всем интервале достаточно велико, что практически означает сравнительно небольшую точность определения температуры около $\pm 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (5 % от интервала измерений). Это определяется стохастическими выбросами по длинам волн, связанным с несоответствием температуры в малой окрестности ВБР и термопары, также возможен вклад в ошибку алгоритмов определения центральной длины волны ВБР. Приемлемый уровень точности для практического применения определяется, конечно, конкретной задачей, но зачастую он должен быть не более $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (менее 1 % от диапазона измерений). Непрерывное измерение центральной длины волны от температуры,

показанное на рис. 3, *а*, не является правильным с точки зрения процедуры калибровки, а является, в соответствии с целями данной работы, лишь демонстрацией возможности определения температуры. Корректная процедура калибровки волоконно-оптических датчиков температуры предполагает сбор статистики показаний при нескольких значениях температуры, что одновременно дает информацию о чувствительности и точности измерений. Кроме этого не проводилась процедура предварительного отжига ВБР перед калибровкой.

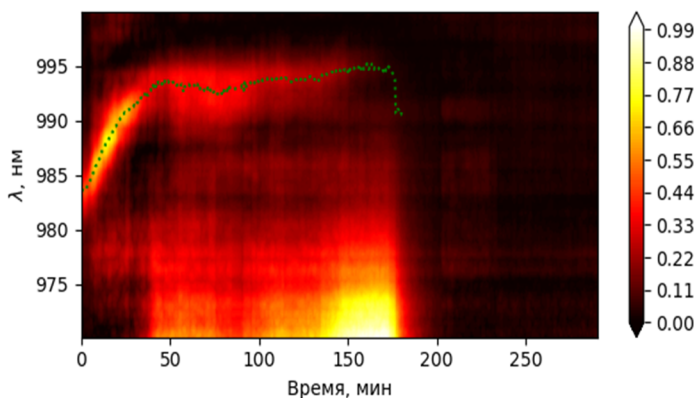


Рис. 3. Спектрограмма эксперимента и зависимость длины волны ВБР от времени

На рис. 4 представлена полная спектрограмма эксперимента, а пунктиром – длина волны ВБР $\lambda_{ВБР}$. Излучение в коротковолновой области, интенсивность которого растет с увеличением температуры, соответствует тепловому излучению нагретой печи и волокна.

На рис. 4, *а* приведены спектры отражения при различных температурах, а на рис. 4, *б* – динамика спектров отражения при 1200 °С.

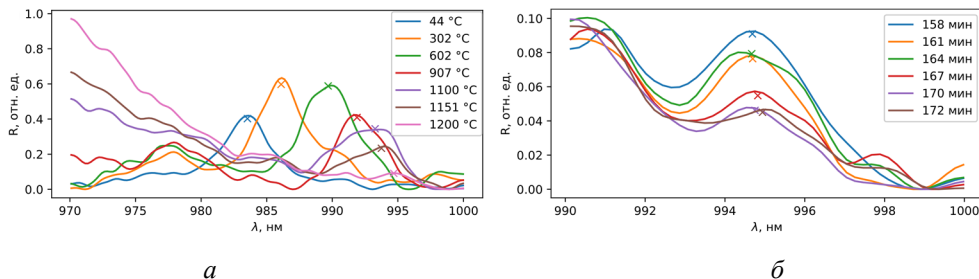


Рис. 4. Спектры отражения ВБР при различных температурах (*а*); спектры отражения ВБР при 1200 °С (*б*)

Крестики соответствуют найденной по описанному методу центральной длине волны отражения ВБР $\lambda_{\text{ВБР}}$. Ширина спектра ВБР при комнатной температуре составила около 4,3 нм. Видно, что от температуры ширина спектра отражения изменяется, а сам спектр ВБР имеет некоторую внутреннюю структуру.

Заключение

В работе впервые экспериментально продемонстрирована возможность измерения высоких температур вплоть до 1200 °С с помощью ВБР с длиной волны отражения 985 нм и шириной на полувысоте 4,3 нм, записанной в бессердцевинном чистокварцевом волокне методом фемтосекундной поточечной записи. При этом сама ВБР находилась на расстоянии 50 см от соединения с транспортным волокном, что, как минимум, в два раза больше, чем в других работах. Средняя температурная чувствительность исследуемого образца составила около 9 пм/°С, что близко к таковой для ВБР в стандартных одномодовых волокнах типа SMF-28. Как следует из результатов эксперимента, метод может применяться для измерения температуры до 1150 °С, минимум, в течение часа, так как такая ВБР остается стабильной в воздушной атмосфере. При 1200 °С наблюдается деградация коэффициента отражения со временем, вызванная разрушением (расплавлением) структуры ВБР и стержня.

Использование полностью многомодовой схемы опроса позволило существенно повысить интенсивность отраженного света, а также снизить влияние модовой интерференции на регистрируемый спектр ВБР. Потенциально можно использовать и одномодовую схему для измерения со специальной математической обработкой спектра (гауссовское усреднение или скользящее среднее), однако у такого варианта будет значительно меньше соотношение сигнала к шуму.

Для улучшения отношения сигнала к шуму коэффициент отражения ВБР может быть повышен за счет оптимизации метода записи ВБР, увеличения ее поперечного сечения и длины. Влияние мощной температурной фоновой засветки, которая присутствует при высоких температурах, может быть существенно уменьшена, если предварительно провести температурную калибровку (компенсацию) фонового свечения, измерив зависимость спектра от температуры, а затем методом аппроксимации вычитать фон из сигнального спектра. Также необходимо минимизировать отражение излучения источника от торца за счет

угловой полировки. В дальнейшем необходимо выполнить более подробное исследование долговременной стабильности таких ВБР при температурах свыше 1000 °С, а также исследовать влияние отжига на стабильность параметров ВБР.

Список литературы

1. Куницина, Н.Г. Обзор различных способов измерения температуры в металлургических процессах / Н.Г. Куницина, Н.К. Николи // Наука и производство Урала. – 2020. – Т. 16. – С. 35–37.
2. Modeling analysis and experimental study on epoxy packaged FBG sensor for cryogenic temperature measurement / Y. Ren [et al.] // Opt. Fiber Technol. – 2024. – Vol. 84. – P. 103710.
3. Fiber Bragg grating regeneration at 450 °C for improved high temperature sensing / K. Chah [et al.] // Opt. Lett. – 2019. – Vol. 44. – P. 4036–4039.
4. Regenerated fibre Bragg gratings: a critical assessment of more than 20 years of investigations / L. Polz [et al.] // Opt. Laser Technol. – 2021. – Vol. 134. – P. 106650.
5. Extreme silica optical fibre gratings / J. Canning [et al.] // Sensors. – 2008. – Vol. 8, № 10. – P. 6448–6452.
6. Development and performance verification of fiber optic temperature sensors in high temperature engine environments / G. Adamovsky [et al.] // Proceedings of 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – 2014. – P. 1–12.
7. Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation / D. Grobncic [et al.] // Meas. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 17, № 5. – P. 1009–1013.
8. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser / A. Martinez, I.Y. Khrushchev, I. Bennion // Electron. Lett. – 2005. – Vol. 41, № 4. – P. 176–178.
9. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments / S.J. Mihailov // Sensors. – 2012. – Vol. 12. – P. 1898–1918.
10. Single-mode sapphire fiber temperature sensor / M. Wang [et al.] // J. Light. Technol. – 2024. – Vol. 42, № 18. – P. 6409–6416.
11. Исследование воздействия β -излучения на волоконные брэгговские решетки, записанные фемтосекундным лазерным излучением / А.В. Достовалов, В.А. Симонов, К.А. Окотруб [и др.] // Прикладная фотоника. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 5–18.
12. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule / A.V. Dostovalov [et al.] // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24, № 14. – P. 16232–16237.

13. Large-scale cascading of first-order FBG array in a highly multimode coreless fiber using femtosecond laser for distributed thermal sensing / F. Mumtaz [et al.] // *Opt. Express.* – 2023. – Vol. 31, № 18. – P. 29639.
14. Ultra-fast annealing improves SNR and long-term stability of a highly multiplexed line-by-line FBG array inscribed by femtosecond laser in a coreless fiber for extreme-temperature applications / F. Mumtaz [et al.] // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2024. – Vol. 73. – P. 9505210.
15. Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation / S.J. Mihailov [et al.] // *Opt. Commun.* – 2008. – Vol. 281, № 21. – P. 5344–5348.

References

1. Kunitsina N.G., Nikoli N.K. Obzor razlichnykh sposobov izmereniia temperatury v metallurgicheskikh protsessakh [Review of various methods of temperature measurement in metallurgical processes]. *Nauka i proizvodstvo Urala*, 2020, vol. 16, pp. 35-37.
2. Ren Y. et al. Modeling analysis and experimental study on epoxy packaged FBG sensor for cryogenic temperature measurement. *Opt. Fiber Technol.*, 2024, vol. 84, p. 103710.
3. Chah K. et al. Fiber Bragg grating regeneration at 450 °C for improved high temperature sensing. *Opt. Lett.*, 2019, vol. 44, pp. 4036-4039.
4. Polz L. et al. Regenerated fibre Bragg gratings: a critical assessment of more than 20 years of investigations. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 134, p. 106650.
5. Canning J. et al. Extreme silica optical fibre gratings. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 10, pp. 6448-6452.
6. Adamovsky G. et al. Development and performance verification of fiber optic temperature sensors in high temperature engine environments. *Proceedings of 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014, pp. 1-12.
7. Grobnc D. et al. Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 5, pp. 1009-1013.
8. Martinez A., Khrushchev I.Y., Bennion I. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser. *Electron. Lett.*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 176-178.
9. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 1898-1918.
10. Wang M. et al. Single-mode sapphire fiber temperature sensor. *J. Light. Technol.*, 2024, vol. 42, no. 18, pp. 6409-6416.
11. Dostovalov A.V., Simonov V.A., Okotrub K.A. et al. Issledovanie vozdeistviia β -izlucheniia na volokonnye breggovskie reshetki, zapisannye femtosekundnym lazernym izlucheniem [Investigation of B-radiation influence on fiber Gragg

gratings inscribed by femtosecond laser radiation]. *Applied Photonics*, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 5-18.

12. Dostovalov A.V. et al. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule. *Opt. Express*, 2016, vol. 24, no. 14, pp. 16232-16237.

13. Mumtaz F. et al. Large-scale cascading of first-order FBG array in a highly multimode coreless fiber using femtosecond laser for distributed thermal sensing. *Opt. Express*, 2023, vol. 31, no. 18, p. 29639.

14. Mumtaz F. et al. Ultra-fast annealing improves SNR and long-term stability of a highly multiplexed line-by-line FBG array inscribed by femtosecond laser in a coreless fiber for extreme-temperature applications. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2024, vol. 73, p. 9505210.

15. Mihailov S.J. et al. Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation. *Opt. Commun.*, 2008, vol. 281, no. 21, pp. 5344-5348.

Сведения об авторе

СИМОНОВ В.А.

e-mail: simonovva@iae.nsk.su

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск.

ГОЛИКОВ Е.В.

e-mail: golikov.inc@mail.ru

Инженер-программист Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск.

ТЕРЕНТЬЕВ В.С.

e-mail: terentyev@iae.nsk.su

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск.

About the author

V.A. SIMONOV

e-mail: simonovva@iae.nsk.su

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

E.V. GOLIKOV

e-mail: golikov.inc@mail.ru

Engineer-programmer, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

V.S. TERYTYEV

e-mail: terentyev@iae.nsk.su

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

ДОСТОВАЛОВ А.В.

e-mail: *Dostovalov@iae.nsk.su*

A.V. DOSTOVALOV

e-mail: *Dostovalov@iae.nsk.su*

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, старший преподаватель, физический факультет, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск.

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Leading Research Fellow, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Senior lecturer, Physics department, Novosibirsk State University, Novosibirsk.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы госзадания Института автоматизации и электрометрии СО РАН «Разработка элементов и исследование характеристик лазерных и сенсорных систем на основе структурированных волоконных световодов, микрорезонаторов и гибридных схем» (FWNG-2024-0015).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценный.

Получена: 14.10.2024

Одобрена: 18.10.2024

Принята к публикации: 20.10.2024

Financing. The study was carried out with the support of the state budget research project “Automatic geodetic monitoring of the natural environment and engineering structures using low-budget high-precision vertical displacement sensors in the conditions of the Far North” (FEFS-2023-0003).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 14/10/2024

Approved: 18/10/2024

Accepted for publication: 20/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: ВБР в бессердцевинном кварцевом волокне для измерения высоких температур / В.А. Симонов, Е.В. Голиков, В.С. Терентьев, А.В. Достовалов // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 35–49.

Please cite this article in English as: Simonov V.A., Golikov E.V., Terentyev V.S., Dostovalov A.V. FBG in coreless silica fiber for high temperature measurements. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 35–49.