

УДК 681.7.068

Д.В. Пржиялковский, О.В. БутовИнститут радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия**ВЫСОКОТОЧНАЯ ЗАПИСЬ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ
РЕШЁТОК ПОТОЧЕЧНЫМ МЕТОДОМ**

Представлен новый многопроходный метод высокоточной поточечной записи волоконных брэгговских решеток излучением фемтосекундного лазера. Продемонстрирована динамика формирования решеток в сравнении с классическим методом записи УФ-излучением. Показано, что благодаря возможности управления динамикой записи можно осуществлять изготовление брэгговских решеток с высокой точностью и высокой степенью воспроизводимости. В работе наглядно демонстрируется существенное уменьшение дисперсии параметров при записи ВБР по сравнению с обычным однопроходным режимом записи. Показано, что предложенная методика является удобным инструментом для изучения процессов, происходящих в стекле при многофотонном поглощении лазерного излучения.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, поточечная запись, волоконная брэгговская решётка, многоитерационный метод записи.

D.V. Przhialkovskii, O.V. ButovKotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS,
Moscow, Russian Federation**HIGH-PRECISION INSCRIPTION OF FIBER BRAGG GRATINGS
BY THE POINT-BY-POINT METHOD**

The article is devoted to a multi-pass method for high-precision point-by-point inscription of fiber Bragg gratings by means of femtosecond laser radiation. The comparison of grating formation dynamics between the reported method and the classical UV-radiation inscription method is presented. It is shown that the multi-pass method's exceptional control over the inscription dynamics facilitates fabrication of Bragg gratings with premier accuracy and a high degree of reproducibility. A significant decrease in the dispersion of parameters during FBG inscription compared to the conventional single-pass inscription technique is explicitly demonstrated. The report proves the proposed technique to be a convenient tool for conducting research of the processes occurring in glass during multiphoton absorption of laser radiation.

Keyword: femtosecond inscription, point-by-point, Fiber Bragg Grating, multi-pass inscription method.

Введение

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) в общем случае представляет собой периодическую структуру в виде модуляции показателя преломления, записанную в сердцевине волоконного световода. Волоконные брэгговские решётки хорошо известны с момента открытия фоточувствительности волоконных световодов в 1978 г. [1].

С бурным развитием телекоммуникационных, лазерных и сенсорных технологий брэгговские волоконные решётки только набирают популярность и становятся всё более востребованными не только как инструмент научных изысканий, но и как важный элемент приборной базы для применений во многих отраслях науки и техники [1–7].

Благодаря своим уникальным свойствам, таким как химическая инертность, нечувствительность к электромагнитному излучению, пожаробезопасность, возможность объединения в массивы, волоконные брэгговские решётки находят широкое применение в современной сенсорике, в том числе и в сложных условиях эксплуатации [8, 9].

Запись волоконных брэгговских решёток принципиально разделяется на две группы методов. Первый из них – метод, в основе которого лежит эффект фоточувствительности, т.е. перманентное изменение показателя преломления под действием внешнего излучения, как правило, ультрафиолетового диапазона [1]. С помощью специального интерферометра, в свете луча лазера, в сердцевине волокна создаётся интерференционная картина, что приводит к изменению показателя преломления в максимумах интерференционной картины, формируя таким образом брэгговскую решетку. К группе данных методов относятся методы записи при помощи фазовой маски [10], а также методы с использованием пространственных интерферометров (голографические методы) [11–13]. Недостатком таких методов является необходимость использования специальных волоконных световодов с повышенной фоточувствительностью, что не всегда удобно. В ряде случаев для повышения фоточувствительности используют метод насыщения волокон перед записью решетки молекулярным водородом [14]. Однако такой метод имеет целый ряд недостатков, среди которых, в частности, низкая термическая стойкость записанных таким образом брэгговских решеток [15]. Существуют проблемы и при записи решеток в активных волоконных световодах с целью формирования резонаторов одночастотных волоконных лазеров [7]. Так, например, УФ-облучение, особенно в волокнах, насыщенных молекулярным водородом, пагубно влияет на усилительные свойства таких световодов, что, в свою очередь, отрицательно отражается на характеристиках лазеров на их основе [16, 17]. Кроме того, радиационно-стойкие волоконные световоды, сердцевина которых, как правило, состоит из нелегированного кварцевого стекла, вообще не обладают достаточной для записи решеток фоточувствительностью, даже при насыщении их водородом.

Проблема записи решеток в световодах с низкой фоточувствительностью может быть решена использованием лазеров с субпикосекундной (фемтосекундной) длительностью импульсов. Основным преимуществом использования излучения фемтосекундного лазера является возможность записи решеток в нефоточувствительных волоконных световодах благодаря нелинейным многофотонным процессам, происходящим при облучении кварцевого стекла интенсивным излучением. Такая запись также возможна с использованием фазовых масок, однако данный метод требует достаточно высоких значений энергии в импульсе [18, 19].

Вторая группа методов – это методы так называемой поточечной записи, осуществляемой, как правило, излучением фемтосекундных лазеров ИК или видимого диапазона. Суть данной группы методов сводится к записи решетки путем последовательного нанесения дефектов в виде точек (Point-By-Point [20–25]) или целых штрихов (Line-By-Line [23, 26, 27], plane-by-plane [19, 28]) с помощью сфокусированного лазерного излучения. Сфокусированное излучение из-за сверхвысокой плотности энергии в импульсе инициирует многофотонные процессы в сетке стекла, приводящие к ее трансформации, что и обуславливает формирование брэгговской структуры.

Использование фемтосекундного лазерного излучения для записи ВБР имеет ряд преимуществ. Одним из них является возможность записи ВБР без удаления защитного полимерного покрытия [21]. Как уже упоминалось выше, в случае использования сверхкороткоимпульсных лазеров запись происходит за счёт многофотонных процессов, что обуславливает возможность воздействия на материал световода излучением видимого или даже ближнего инфракрасного диапазона. Линейное поглощение такого излучения отсутствует, что обеспечивает возможность записи структуры в месте фокусировки излучения без воздействия на материалы оболочки защитного покрытия световода. Отсутствие необходимости удалять защитный слой световода позволяет избежать существенного снижения механической прочности участка волокна с записанной решёткой. Еще одним важным преимуществом поточечной записи является возможность создания брэгговских структур с произвольным периодом, не ограничиваемым использованием фазовых масок или возможностями интерферометров [29]. Кроме того, поточечный метод записи позволяет создавать сложные брэгговские структуры, такие как чирпированные и аподизированные решетки [30, 31] или решетки с

фазовым сдвигом [25, 32]. Помимо этого воздействие на фундаментальную структуру кварцевого стекла обеспечивает записываемым решеткам повышенную термическую устойчивость, что важно для создания высокотемпературных сенсоров физических величин [33, 34].

Для записи решеток поточечным методом, как правило, используется методика равномерного движения световода вдоль своей оси относительно луча лазера. Период записываемой решетки определяется скоростью такого движения и частотой следования лазерных импульсов. Таким образом, результирующая решетка формируется за один проход. Одним из критических недостатков записи брэгговских решеток таким методом является низкий уровень воспроизводимости их параметров [29]. Очевидно, что за счет многофотонных процессов даже минимальные, неизбежные флуктуации энергии импульса приводят к существенным отклонениям в параметрах индуцированных дефектов. В отличие от решеток, записываемых с помощью УФ-излучения, где облучение световода производится равномерным пучком, а контраст решетки определяется временем экспозиции и может хорошо контролироваться в процессе записи методом поточечной записи, решетка может получаться неравномерной по длине, а результирующий уровень ее отражения трудно поддается контролю. Особенно актуальным вопрос встает при производстве систем, где требуется одинаковый, хорошо контролируемый уровень отражения каждой из решеток [35, 36]. Кроме того, прецизионный контроль записи решеток важен при создании резонаторов волоконных лазеров, а также массивов брэгговских решеток, используемых в сенсорике.

В настоящей работе представлен инновационный многопроходный метод поточечной записи, обеспечивающий высокую степень воспроизводимости и контроля параметров брэгговских решеток, формируемых с помощью излучения фемтосекундного лазера [37].

Методика записи

В своей работе мы использовали общепринятую схему поточечной записи брэгговской решетки [22–24]. Лимитирующим фактором поточечных методов записи является дифракционный предел, обусловленный используемой длиной волны излучения, который ограничивает минимальный размер элементов создаваемой структуры. В случае записи брэгговских решеток типичное значение периода структуры составляет 300–600 нм для брэгговских длин волн в

наиболее востребованном диапазоне 0,9–1,6 мкм. Таким образом, одной из основных технологических задач является минимизация экспонируемой области за счет выбора меньшей длины волны излучения. С другой стороны, генерация гармоник высших порядков может приводить к высоким потерям в энергии импульса. В нашей работе был использован иттербиевый волоконный фемтосекундный лазер с длиной волны генерации 1064 нм и максимальной энергией в импульсе 2 мкДж при его длительности порядка 400 фс. Излучение лазера было преобразовано во вторую гармонику (532 нм), что позволило уменьшить эффективную область фокусировки, минимизировав в достаточной степени область эффективной экспозиции материала световода, и при этом сохранить уровень необходимой энергии в импульсе. Длительность преобразованного импульса на данной длине волны составляла 320 фс. Эффективная запись решетки при данной длине волны и длительности импульса лазерного излучения наблюдается при энергиях в импульсе примерно от 40 до 200 нДж. Этот диапазон энергий соответствует данным, полученным другими исследователями [22, 40]. Исходя из параметров лазерного луча и оптической схемы, плотность мощности лазерного излучения в центре фокального пятна можно оценить на уровне 10^{13} Вт / см².

Для записи решетки поточечным методом с заданными характеристиками, такими как брэгговская длина волны, контраст (коэффициент отражения), ширина спектра отражения, необходимо с высокой точностью контролировать уровень наводимых изменений в местах облучения, а следовательно, и мощность записывающего лазерного излучения. Кроме того, контролю подлежит и позиционирование фокальной области в плоскости сечения световода. Ситуация резко усложняется, если есть необходимость записи несколько одинаковых решёток в едином отрезке волокна. В этом случае незначительная ошибка позиционирования или случайные флуктуации мощности могут привести к выходу параметров решётки за пределы расчётных и необходимости переписывать весь массив.

В качестве решения данной проблемы в нашей работе мы предлагаем новый подход высокоточного поточечного изготовления ВБР, а именно технологию с использованием многопроходной режима записи. Идея многопроходной записи ранее была реализована для длиннопериодных решеток для увеличения их контраста [38]. Основной проблемой, ограничивающей применение такого метода для

формирования брэгговских структур, является сложность синхронизации положения начала записи брэгговской решетки, из-за чего повторная запись ВБР происходит со случайным сдвигом, приводя к ухудшению, а в ряде случаев к стиранию ранее записанной решетки. Синхронизация положения позиционера с волокном и импульсов лазера сама по себе не является проблемой. Однако в большинстве фемтосекундных лазеров последовательность импульсов формируется независимо от синхроимпульса, из-за чего и происходит сдвиг фазы при записи решетки. Для записи ВБР мы используем частоты в диапазоне 100 Гц – 2 кГц. Так как в большинстве лазеров внешняя синхронизация разрешает работу лазера через открытие внешнего затвора (с разными вариантами реализации) и пришедший на лазер внешний синхроимпульс никак не связан с внутренними режимами работы элементов лазера, то схема, работающая в указанном диапазоне частот, будет иметь неопределенность во времени прихода первого импульса после разрешения открытия затвора в 0,5–10 мс. Иными словами, неопределенность в позиционировании стартового штриха может достигать величины периода самой записываемой брэгговской структуры. По этой причине при повторном проходе новая структура может быть записана со случайным сдвигом (случайной фазой в диапазоне 2π) относительно записанной ранее решетки, что может привести к некорректному формированию структуры и потере характеристик брэгговской решетки.

Возможным решением могла бы стать синхронизация позиционера с волокном по синхроимпульсу от лазера. Но запись при постоянной скорости движения волоконного световода требует время на ее стабилизацию, из-за чего крайне затруднительно обеспечить такой тип синхронизации.

Мы модифицировали схему работы лазера и микроподвижек, осуществив синхронизацию на аппаратном уровне таким образом, что приходящий на лазер управляющий синхроимпульс оказывается связан с внутренними частотными генераторами самого лазера. Это нам позволило добиться того формирования первого импульса в фиксированный период времени с точностью, заданной временным периодом между базовыми лазерными импульсами, частота следования которых в нашем случае составляла 1 МГц, т.е. с точностью в 1 мкс, что на 3–4 порядка лучше, чем с простой синхронизацией по затвору. Таким образом может быть обеспечена высокая степень

воспроизводимости положения штрихов брэгговской решетки при многочисленных проходах.

При таком подходе для обеспечения высокой воспроизводимости параметров брэгговской решетки ее запись происходит с изначально меньшей мощностью излучения, но в несколько проходов, имитируя таким образом контроль дозы при записи решеток с помощью ультрафиолетового излучения. По результатам каждого прохода можно изменять среднюю энергию лазерного импульса для достижения требуемого результата с наперед заданной точностью. При этом вероятность ошибки, возникающей из-за неверного позиционирования или из-за каких-либо ещё случайных факторов, в случае нескольких проходов может быть минимизирована или вовсе исключена.

Результаты и их анализ

На рис. 1 представлены спектры пропускания брэгговской решетки в зависимости от количества проходов при ее записи. Запись решеток производилась в стандартном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28e без удаления защитного полимера. Измерение спектров проводилось с помощью анализатора оптического спектра Agilent 86140B с разрешением по длине волны 0,06 нм. Средняя энергия импульса лазера при каждом проходе составляла 47 нДж. Длина решетки составляла 5 мм.

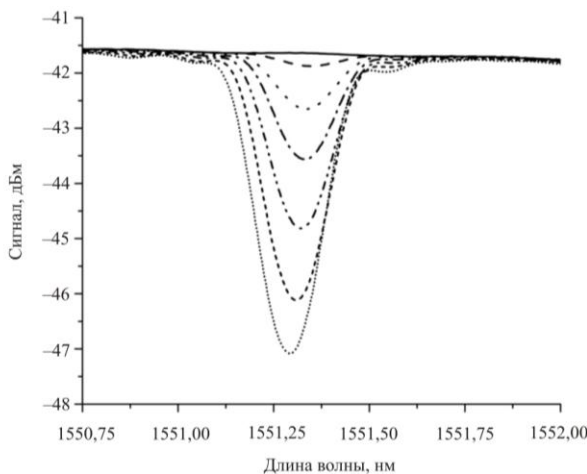


Рис. 1. Изменение спектра пропускания брэгговской решетки в зависимости от количества итераций записи: — — спектр до записи; - - - - 1-й проход; ····· - 2-й проход; - · - · - 3-й проход; - · - · - · - 4-й проход; ······ - 5-й проход; ········ - 6-й проход

Как видно из рисунка, наблюдается монотонный рост контраста (отражения) брэгговской решетки, при этом полная ширина ее спектра $\delta\lambda$ составляла величину порядка 0,4 нм, что является близким к теоретическому значению спектра идеальной брэгговской структуры с данной длиной $L = 5$ мм [4], что свидетельствует о высокой точности позиционирования записываемой структуры при многопроходной записи:

$$\delta\lambda = \frac{2\lambda_B}{N_B} \sqrt{1 + \left(\frac{k_B L}{\pi}\right)^2}, \quad (1)$$

где N_B – количество штрихов решетки, $N_B = L/\Lambda$, Λ – ее период, а k_B – постоянная связи, иначе называемая силой решетки и определяемая, соответственно, соотношением (2) [4]:

$$k_B = \frac{\pi\Delta n_{\text{mod}}\eta}{\lambda_B}, \quad (2)$$

где Δn_{mod} – усредненная, индуцированная излучением лазера, величина модуляции показателя преломления. При этом η обычно обозначается как интеграл перекрытия, зависящий от свойств световода и определяющий долю энергии, распространяющейся по сердцевине волоконного световода. В нашем случае данная величина обозначает долю энергии, проходящей через сечение фотоиндуцированного дефекта. В дальнейшем для удобства мы будем использовать обобщенную величину $\eta\Delta n_{\text{mod}}$, характеризующую контраст брэгговской решетки. Расчет данной величины из уровня отражения брэгговской решетки можно осуществить с помощью формулы:

$$\eta\Delta n_{\text{mod}} = \frac{\lambda_B \text{tgh}^{-1} \sqrt{R}}{\pi L}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения решетки.

Благодаря многоитерационной записи можно наблюдать изменение параметров решетки, которые отражают процессы, происходящие в сетке кварцевого стекла в при воздействии на него фемтосекундного излучения. Так, например, при классической записи решеток в том же типе волоконного световода, но с помощью ультрафиолетового излучения, в облучаемых участках показатель преломления увеличивается с ростом экспонированной дозы (времени облучения) (рис. 2, а) [41]. В случае поточечной фемтосекундной записи видно, что брэгговская длина волны решетки λ_B смещается в

сторону коротких длин волн (рис. 2, б), что очевидно свидетельствует об уменьшении среднего эффективного показателя преломления (n_{eff}) решетки, исходя из формулы (4), за счет уменьшения показателя преломления облучаемых участков световода, поскольку период брэгговской структуры Λ очевидно остается неизменным:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda. \quad (4)$$

Этот результат согласуется с наблюдаемым ранее явлением отрицательного изменения показателя преломления фосфатных стекол под действием фемтосекундного излучения [40].

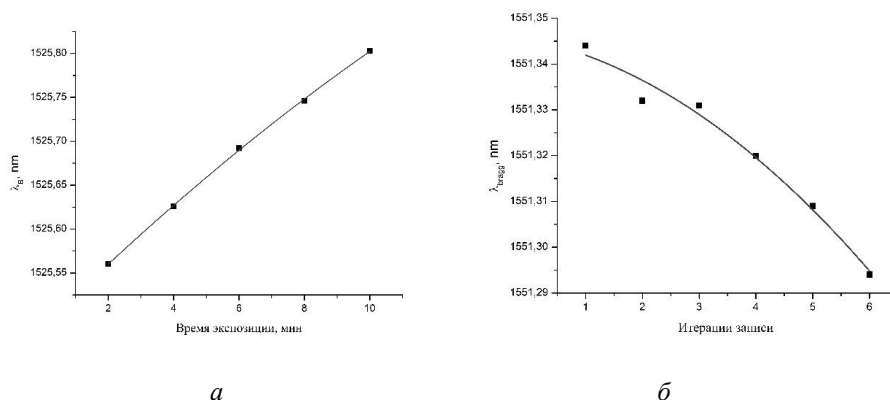


Рис. 2. Изменение брэгговской длины волны при записи излучением эксимерного УФ-лазера (а) и с помощью фемтосекундного излучения (б)

Зависимость брэгговской длины волны от времени облучения или, в случае фемтосекундного воздействия, от количества итераций носит нелинейный характер. Тем не менее нелинейность в случае УФ воздействия слабо выражена и связана с эффектом насыщения, что приводит к меньшим изменениям показателя преломления с ростом времени экспозиции. В случае же записи решеток с помощью фемтосекундного излучения нелинейная зависимость более выражена, причем с ростом количества итераций наблюдается рост величины сдвига брэгговской длины волны. По всей видимости, данный эффект связан с двумя взаимодополняющими эффектами, а именно с изменением показателя преломления в местах облучения и ростом среднего сечения фотоиндуцированного дефекта, отражающегося на показателе η в формуле (3).

Однако фотоиндуцированные изменения показателя преломления не всегда приводят к пропорциональному увеличению модуляции показателя преломления в структуре решетки. Как известно, брэгговская длина волны отражает среднее изменение показателя преломления согласно формуле (4), тогда как уровень отражения решетки указывает на величину модуляции показателя преломления или в нашем случае на величину $\eta\Delta n_{\text{mod}}$. На рис. 3 показана динамика изменения данной величины в процессе многоитеррационной поточечной записи. Так же, как и в случае длины волны, изменения носят нелинейный характер, но с каждой итерацией величина этих изменений уменьшается, тогда как изменения в брэгговской длине волны, напротив, увеличиваются. Увеличение размеров фотоиндуцированного дефекта может приводить к «размытию», уменьшению контраста брэгговской структуры что, очевидно, будет отражаться и на динамике изменения параметра $\eta\Delta n_{\text{mod}}$.

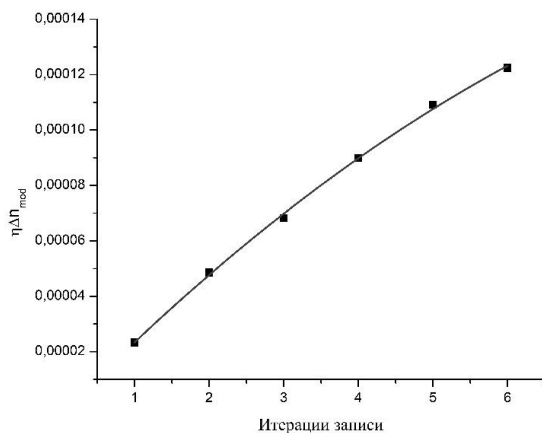


Рис. 3. Изменение контраста брэгговской структуры $\eta\Delta n_{\text{mod}}$ от количества итераций записи

Как было отмечено во введении, для ряда задач имеется необходимость записывать решетки со строго одинаковым и хорошо контролируемым уровнем отражением. К таким задачам относятся, например, запись решеток для квазираспределенных акустических или сейсмических сенсорных систем, принцип работы которых основан на анализе интерференционной картины между двумя соседними сла-

быми брэгговскими решетками с помощью когерентного рефлектометра [35, 36]. Контраст интерференционной картины, а соответственно, и чувствительность датчика напрямую зависят от степени совпадения решеток по длине волны и уровня отражения. При этом волоконная линия может содержать до нескольких десятков и даже сотен решеток.

Другой задачей является создание структур резонаторов волоконных, в особенности одночастотных, лазеров, собранных как по классической схеме с двумя зеркалами [7, 43, 44], так и DFB-лазеров, представляющих собой длинную решетку, имеющую в своей структуре фазовый сдвиг [7, 45, 46].

Для таких задач точный контроль параметров записываемых решеток является критически важным. В случае поточечной записи такой контроль возможно осуществить с помощью предложенного многопроходного метода записи. После каждой итерации можно корректировать мощность излучения, постепенно приближаясь к желаемому результату по уровню отражения формируемой брэгговской структуры. На рис. 4, *а* показан результат такой записи в виде спектра отражения трех одинаковых решеток. Особенным требованием к решеткам, работающим во всепогодных сенсорных линиях, является максимально возможная ширина спектра решетки, определяемая либо чирпированным периодом, либо согласно формуле (1) малой длиной решетки L . Широкий спектр решеток необходим для их эффективного согласования с лазерным источником излучения сенсорной системы при различных температурах, а также при наличии возможных деформаций решеток, появившихся при изготовлении сенсорного кабеля. Решетки, спектр которых приведен на рис. 4, *а*, были записаны без чирпа и имели длину $L = 0,1$ мм. Запланированный уровень отражения каждой из них составлял 0,1 % (-37 dBm), а ширина спектра на полувысоте $\text{FWHM} = 7$ нм. Как видно из графика, во всех трех образцах удалось воспроизвести запланированные параметры с точностью по отражению не хуже $\pm 0,3$ dB. Каждая из решеток была записана с помощью 4–10 итераций. На рис. 4, *б* для сравнения приведены спектры аналогичных решеток, записанные за 1 проход по классической схеме поточечной записи. Видно, что разброс параметров решеток довольно значительный, несмотря на то, что записывались они при идентичных условиях.

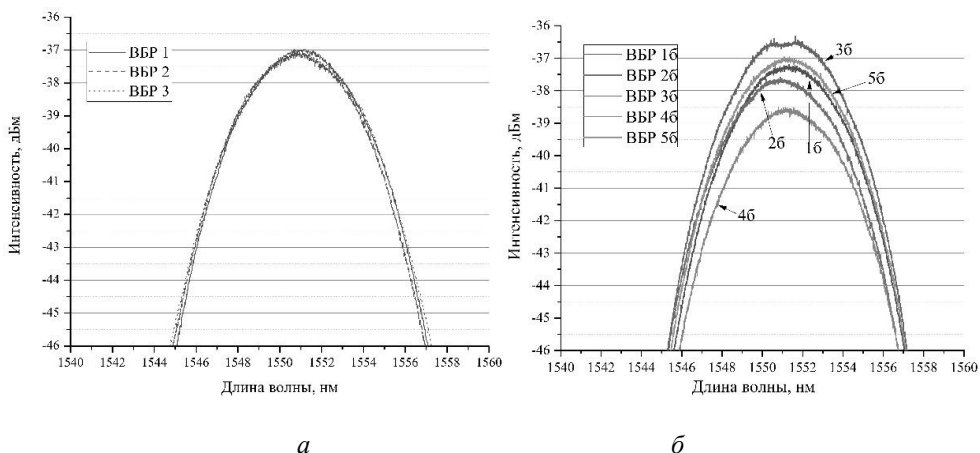


Рис. 4. Спектры отражения трех слабых решеток, записанные с помощью многопроходного поточечного метода (*а*) в сравнении со спектрами пяти решёток, записанными в однопроходном режиме (*б*)

Таким образом, многопроходный метод формирования ВБР с помощью технологии поточечной записи фемтосекундным излучением лазера предоставляет как удобный инструмент для высокоточной записи брэгговских структур, так и метод изучения особенностей многофотонного взаимодействия лазерного излучения с сеткой стекла.

Заключение

В работе представлен новый многопроходный метод поточечной записи волоконных брэгговских решеток излучением фемтосекундного лазера. Метод был реализован благодаря модификации схемы синхронизации работы фемтосекундного лазера с движением позиционеров с волоконным световодом. Показано, что благодаря возможности контроля параметров решеток в процессе их формирования возможна высокоточная запись ВБР с заданными параметрами и с высокой степенью воспроизводимости, что особенно актуально для создания массивов идентичных брэгговских структур для сенсорных применений, а также для формирования резонаторов волоконных лазеров. Метод может быть полезен для наблюдения за динамикой изменения параметров решетки в процессе записи, что позволяет значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих при многофотонном взаимодействии оптического излучения с материалом световода.

Список литературы

1. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication / K.O. Hill [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 1978. – Vol. 32. – No. 10. – P. 647–649.
2. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* – Academic Press, 2009. – 613 p.
3. Othonos A. *Fiber bragg gratings* // *Review of scientific instruments.* – 1997. – Vol. 68. – No. 12. – P. 4309–4341.
4. *Fibre gratings and their applications* / S.A. Vasil'ev [et al.] // *Quantum Electronics.* – 2005. – Vol. 35. – No. 12. – P. 1085.
5. Krohn D.A., MacDougall T., Mendez A. *Fiber optic sensors: fundamentals and applications.* – Spie Press Bellingham, 2014. – 70 p.
6. Cusano A., Cutolo A., Albert J. *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation.* – Bentham Science Publishers, 2011. – 321 p.
7. Thermal Switching of Lasing Regimes in Heavily Doped Er³⁺ Fiber Lasers / A.M. Smirnov [et al.] // *ACS Photonics.* – 2018. – Vol. 5. – No. 12. – P. 5038–5046.
8. Fibers and sensors for monitoring nuclear power plants operation / O.V. Butov [et al.] // *Proc. SPIE, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors/ Santander; Spain (June 2014).* – Vol. 9157. – Article 91570X. – Code 105788.
9. Optical Fiber Sensor for Deformation Monitoring of Fuel Channels in Industrial Nuclear Reactors / O.V. Butov [et al.] // *OSA Technical Digest 26rd International Conference on Optical Fibre Sensors/ Lausanne, Switzerland, (September 2018).* – P. TuE103.
10. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask / K.O. Hill [et al.] // *Applied Physics Letters.* – 1993. – Vol. 62. – No. 10. – P. 1035–1037.
11. Interferometer design for writing Bragg gratings in optical fibers / P.J. de Groot [et al.] // *Proc. SPIE In Interferometry XI: Techniques and Analysis (June 2002).* – Vol. 4777. – P. 31–38.
12. Meltz, G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Optics letters.* – 1989. – Vol. 14. – No. 15. – P. 823–825.
13. Pissadakis S., Reekie L. An elliptical Talbot interferometer for fiber Bragg grating fabrication // *Rev. Sci. Instrum.* – 2005. – Vol. 76. – No. 6. – P. 0066101.

14. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres / P.J. Lemaire [et al.] // *Electronics Letters*. – 1993. – Vol. 29. – No. 13. – P. 1191–1193.

15. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber / H. Patrick [et al.] // *Journal of applied physics*. – 1995. – Vol. 78. – No. 5. – P. 2940–2945.

16. Bazakutsa A.P., Rybaltovsky A.A, Butov O.V. Effect of hydrogen loading and UV irradiation on the gain of Er³⁺-doped fibers // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2019. – Vol. 36. – No. 9. – P. 2579–2586.

17. Photobleaching of UV-induced defects in Er/Al-doped glasses for fiber lasers / A.P. Bazakutsa [et al.] // *Opt. Mater. Express*. – 2020. – Vol. 10. – No. 10. – P. 2669–2678.

18. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation / S.J. Mihailov [et al.] // *Optics letters*. – 2003. – Vol. 28. – No. 12. – P. 995–997.

19. Ultrafast Laser Processing of Optical Fibers for Sensing Applications / S.J. Mihailov [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – No. 4. – P. 1447.

20. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser / A. Martinez [et al.] // *Electron. Lett.* – 2004. – Vol. 40. – No. 19. – P. 1170–1172.

21. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Babin S.A. Femtosecond point-by-point inscription of fiber Bragg gratings through the polyimide coating// *IEEE, 2014 International Conference Laser Optics*; St. Petersburg, Russia (June – July 2014). – C. 1–1.

22. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule / A.V. Dostovalov [et al.] // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24. – No. 15. – P. 16232.

23. Fuerbach A. Grating Inscription Into Fluoride Fibers: A Review // *Photonics Journal*. – 2019. – Vol. 11. – No. 5. – P. 7103811.

24. Slit Beam Shaping for Femtosecond Laser Point-by-Point Inscription of High-Quality Fiber Bragg Gratings / X. Xu [et al.] // *Journal Of Lightwave Technology*. – 2021. – Vol. 39. – No. 15. – P. 5142–5148.

25. Optical Fiber Sensors by Direct Laser Processing: A Review / D. Pallarés-Aldeiturriaga [et al.] // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – No. 23. – P. 6971.

26. Zhou K. et al. Line-by-line fiber bragg grating made by femto-second laser // *Photonics Technol. Lett.* – 2010. – Vol. 22. – No. 16. – P. 1190–1192.

27. Huang B., Shu X. Line-by-Line inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with femtosecond laser // *OSA Technical Digest Asia Commun. Photonics Conf. 2015; Hong Kong Hong Kong (November 2015)*. – P. ASu2A.60.

28. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers / P. Lu [et al.] // *J. Lightwave Technol.* – 2017. – Vol. 36. – No. 4. – P. 926–931.

29. Extreme Environment Sensing Using Femtosecond Laser-Inscribed Fiber Bragg Gratings / S.J. Mihailov [et al.] // *Sensors.* – 2017. – Vol. 17. – No. 12. – P. 2909.

30. Femtosecond laser inscribed chirped fiber Bragg gratings / X.-P. Pan [et al.] // *Optics Letters.* – 2021. – Vol. 46. – No. 9. – P. 2059.

31. Ulyanov I., Przhiialkovskii D.V., Butov O.V. Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers // *Results in Physics.* – 2022. – Vol. 32. – P. 105101.

32. Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure / A. Wolf [et al.] // *Optics and Laser Technology.* – 2018. – Vol. 101. – P. 202–207.

33. Zhang C., Femtosecond-laser-inscribed sampled fiber Bragg grating with ultrahigh thermal stability // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24. – No. 4. – P. 3981–3988.

34. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments// *Sensors.* – 2012. – Vol. 12. – No. 2. – P. 1898–1918.

35. The Sensitivity Improvement Characterization of Distributed Strain Sensors Due to Weak Fiber Bragg Gratings / K.V. Stepanov [et al.] // *Sensors.* – 2020. – Vol. 20. – No. 22. – P. 6431.

36. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber bragg gratings / C. Wang [et al.] // *Opt. Express.* – 2015. – Vol. 23. – No. 22. – P. 29038–29046.

37. Przhiialkovskii D.V., Butov O.V. High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription // *Results in Physics.* – 2021. – Vol. 30. – P. 104902.

38. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Babin S.A. Long-period fibre grating writing with a slit-apertured femtosecond laser beam ($\lambda = 1026$ nm) // *Quantum Electronics*. – 2015. – Vol. 45. – No. 3. – P. 235–239.

39. All-Fiber Highly Sensitive Bragg Grating Bend Sensor / O.V. Butov [et al.] // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – No. 19. – P. 4228.

40. Writing of 3D optical integrated circuits with ultrashort laser pulses in the presence of strong spherical aberration / M.A. Bukharin [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series II Conference on Plasma & Laser Research and Technologies; Moscow, Russia (January 2016)*. – Vol. 747. – P. 012054.

41. Butov O.V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 15. – P. 102542.

42. Bukharin M., Khudakov D., Vartapetov S. Investigation of refractive index profile induced with femtosecond pulses into neodymium doped phosphate glass for the purposes of hybrid waveguiding structures formation // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 71. – P. 272–276.

43. Continuous-wave operation of an erbium-doped short-cavity composite fiber laser / A.A. Rybaltovsky [et al.] // *Results in Physics*. – 2020. – Vol. 16. – P. 102832.

44. Smirnov A.M., Butov O.V. Pump and thermal impact on heavily erbium-doped fiber laser generation // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46. – No. 1. – P. 86–89.

45. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique / M.I. Skvortsov [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2018. – Vol. 15. – No. 3. – P. 035103.

46. 1030 nm Yb^{3+} distributed feedback short cavity silica-based fiber laser / O.V. Butov [et al.] // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2017. – Vol. 34. – No. 3. – P. A43–A48.

References

1. Hill K.O. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, vol. 32, no. 10, pp. 647-649.

2. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 2009, 613 p.

3. Othonos A. Fiber bragg gratings. *Review of scientific instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309-4341.

4. Vasil'ev S.A. et al. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, 1085 p.

5. Krohn D.A. MacDougall T., Mendez A. Fiber optic sensors: fundamentals and applications. Spie Press Bellingham, 2014, 70 p.

6. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation. Bentham Science Publishers, 2011, 321 p.

7. Smirnov A.M. et al. Thermal Switching of Lasing Regimes in Heavily Doped Er³⁺ Fiber Lasers. *ACS Photonics*, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 5038-5046.

8. Butov O.V. et al. Fibers and sensors for monitoring nuclear power plants operation. *Proc. SPIE, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*. Santander, Spain (June 2014), vol. 9157 Article 91570X. Code 105788.

9. Butov O.V. et al. Optical Fiber Sensor for Deformation Monitoring of Fuel Channels in Industrial Nuclear Reactors. *OSA Technical Digest 26rd International Conference on Optical Fibre Sensors*. Lausanne, Switzerland, (September 2018), TuE103 p.

10. Hill K.O. et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. *Applied Physics Letters*, 1993, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037.

11. Groot de P.J. et al. Interferometer design for writing Bragg gratings in optical fibers. *Proc. SPIE In Interferometry XI: Techniques and Analysis* (June 2002), vol. 4777, pp. 31-38.

12. Meltz, G., Morey W.W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics letters*, 1989, vol. 14, no. 15, pp. 823-825.

13. Pissadakis S., Reekie L. An elliptical Talbot interferometer for fiber Bragg grating fabrication. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, vol. 76, no. 6, 0066101 p.

14. Lemaire P.J. et al. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 13. pp. 1191-1193

15. Patrick H. et al. Annealing of Bragg gratings in hydrogen loaded optical fiber. *Journal of applied physics*, 1995, vol. 78, no. 5, pp. 2940-2945

16. Bazakutsa A.P., Rybaltovsky A.A, Butov O.V. Effect of hydrogen loading and UV irradiation on the gain of Er³⁺-doped fibers // *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, vol. 36, no. 9, pp. 2579-2586.
17. Bazakutsa A.P. et al. Photobleaching of UV-induced defects in Er/Al-doped glasses for fiber lasers. *Opt. Mater. Express*, 2020, vol. 10, no. 10, pp. 2669-2678.
18. Mihailov S.J. et al. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation. *Optics letters*, 2003, vol. 28, no. 12, pp. 995-997.
19. Mihailov S.J. et al. Ultrafast Laser Processing of Optical Fibers for Sensing Applications. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 4, 1447 p.
20. Martinez A. et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser. *Electron. Lett.*, 2004, vol. 40, no. 19, pp. 1170-1172.
21. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Babin S.A. Femtosecond point-by-point inscription of fiber Bragg gratings through the polyimide coating. *IEEE, 2014 International Conference Laser Optics*; St. Petersburg, Russia (June - July 2014). pp. 1-1.
22. Dostovalov A.V. et al. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule. *Optics express*, 2016, vol. 24, no. 15, 16232 p.
23. Fuerbach A. Grating Inscription Into Fluoride Fibers: A Review. *Photonics Journal*, 2019, vol. 11, no. 5, 7103811 p.
24. Xu X. et al. Slit Beam Shaping for Femtosecond Laser Point-by-Point Inscription of High-Quality Fiber Bragg Gratings. *Journal of lightwave technology*, 2021, vol. 39, no. 15, pp. 5142-5148.
25. Pallarés-Aldeiturriaga D. et al. Optical Fiber Sensors by Direct Laser Processing: A Review. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 23, 6971 p.
26. Zhou K. et al. Line-by-line fiber bragg grating made by femtosecond laser. *Photonics Technol. Lett.*, 2010, vol. 22, no. 16, pp. 1190-1192.
27. Huang B., Shu X. Line-by-Line inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with femtosecond laser. *OSA Technical Digest Asia Commun. Photonics Conf. 2015*; Hong Kong Hong Kong (November 2015), ASu2A.60 p.
28. Lu P. et al. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2017, vol. 36, no. 4. pp. 926-931.

29. Mihailov S.J. et al. Extreme Environment Sensing Using Femto-second Laser-Inscribed Fiber Bragg Gratings. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 12, 2909 p.
30. Pan X.-P. et al. Femtosecond laser inscribed chirped fiber Bragg gratings. *Optics Letters*, 2021, vol. 46, no. 9, 2059 p.
31. Ulyanov I., Przhiialkovskii D.V., Butov O.V. Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers. *Results in Physics*, 2022, vol. 32, 105101 p.
32. Wolf A. et al. Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure. *Optics and Laser Technology*, 2018, vol. 101, pp. 202-207.
33. Zhang C. Femtosecond-laser-inscribed sampled fiber Bragg grating with ultrahigh thermal stability. *Opt. Express*, 2016, vol. 24, no. 4, pp. 3981-3988.
34. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 1898-1918.
35. Stepanov K.V. et al. The Sensitivity Improvement Characterization of Distributed Strain Sensors Due to Weak Fiber Bragg Gratings. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 22, 6431 p.
36. Wang C. et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber bragg gratings. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 22, pp. 29038-29046.
37. Przhiialkovskii D.V., Butov O.V. High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription. *Results in Physics*, 2021, vol. 30, 104902 p.
38. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Babin S.A. Long-period fibre grating writing with a slit-apertured femtosecond laser beam ($\lambda = 1026$ nm). *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 3, pp. 235-239.
39. Butov O.V. et al. All-Fiber Highly Sensitive Bragg Grating Bend Sensor. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 19, 4228 p.
40. Bukharin M.A. et al. Writing of 3D optical integrated circuits with ultrashort laser pulses in the presence of strong spherical aberration. *Journal of Physics: Conference Series II Conference on Plasma & Laser Research and Technologies*; Moscow, Russia (January 2016), vol. 747, 012054 p.
41. Butov O.V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers. *Results in Physics*, 2019, vol. 15, 102542 p.

42. Bukharin M., Khudakov D., Vartapetov S. Investigation of refractive index profile induced with femtosecond pulses into neodymium doped phosphate glass for the purposes of hybrid waveguiding structures formation. *Physics Procedia*, 2015, vol. 71, pp. 272-276.

43. Rybaltovsky A.A. et al. Continuous-wave operation of an erbium-doped short-cavity composite fiber laser. *Results in Physics*, 2020, vol. 16, 102832 p.

44. Smirnov A.M., Butov O.V. Pump and thermal impact on heavily erbium-doped fiber laser generation. *Optics Letters*, 2021, vol. 46, no. 1, pp. 86-89.

45. Skvortsov M.I. et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique. *Laser Physics Letters*, 2018, vol. 15, no. 3, 035103 p.

46. Butov O.V. et al. 1030 nm Yb³⁺ distributed feedback short cavity silica-based fiber laser. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, vol. 34, no. 3, pp. A43-A48.