

Фемтосекундная запись структур показателя преломления в многомодовых и многосердцевинных волоконных световодах

А.А.Вольф, А.В.Достовалов, С.Вабниц, С.А.Бабин

Рассмотрена возможность записи волоконных брэгговских решеток (ВБР) в волоконных световодах со сложной пространственной структурой с помощью фемтосекундных ИК лазерных импульсов. В частности, демонстрируется селективная запись однородных ВБР в отдельных сердцевинах семисердцевинного волоконного световода, а также запись последовательного и параллельного массивов ВБР в сердцевине многомодового волоконного световода с градиентным профилем показателя преломления.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, фемтосекундная модификация показателя преломления.

1. Введение

Применение многомодовых и многосердцевинных волоконных световодов (ВС) является темой исследований в таких областях, как оптические линии связи с высокой пропускной способностью [1], радиофотоника [2], мощные волоконные лазеры с улучшенными выходными характеристиками [3], датчики физических величин с расширенными функциональными характеристиками [4], а также в области изучения механизмов нелинейного распространения лазерного излучения по таким волноводам [5, 6]. Модификация показателя преломления (ПП) внутри многомодовых и многосердцевинных ВС позволяет создать ряд важных элементов волоконной оптики – волоконные брэгговские решетки (ВБР), волноводные ответвители, интерферометры. В настоящее время для записи структур ПП широко применяется технология экспозиции фоточувствительной сердцевины УФ лазерным излучением [7]. При этом область модификации ПП строго ограничена областью фоточувствительного материала, а ее локализация в объеме (поперечном сечении ВС) не реализуется. Данное ограничение может быть преодолено за счет модификации прозрачных материалов мощными (с энергией ~ 0.1 – 1 мкДж) фемтосекундными лазерными импульсами видимой или ИК области [8]. Отличительная особенность этого метода состоит в том, что поглощение фемтосекундных импульсов в прозрачном материале носит нелинейный характер и происходит при достижении определенной пороговой интенсивности излучения (~ 10 ТВт/см² для кварцевого стекла). Таким образом, при фокусировке фемтосекундного излучения в объемный материал поглощение будет происходить исключительно вблизи фокальной об-

ласти пучка, а объем индуцированной модификации ПП может достигать ~ 1 мкм³. Точное позиционирование области модификации в продольном и поперечном сечении волокна позволяет создавать структуры ПП в волоконных световодах со сложной геометрией.

В настоящей работе представлены результаты фемтосекундной поточечной записи ВБР в ВС со сложной пространственной структурой: семисердцевинном Fibercore SM-7C1500(6.1/125) и многомодовом Corning 62.5/125, имеющем градиентный профиль ПП сердцевины.

2. Эксперимент

При записи ВБР в качестве источника фемтосекундных импульсов использовался лазер Light Conversion Pharos 6W ($\lambda = 1030$ нм, $\tau_p = 232$ фс). Лазерные импульсы с частотой $f = 1$ кГц фокусировались с помощью микробиъектива Mitutoyo 100 \times Plan Apo NIR HR (NA = 0.7) в заданную область ВС. Специальная стеклянная феррула со шлифованными боковыми гранями позволяла зафиксировать положение ВС относительно области фокусировки, как это показано на рис.1 [9]. Для двухкоординатного контроля

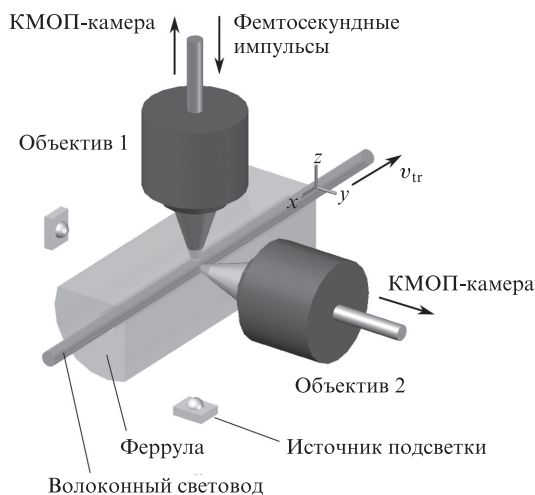


Рис.1. Поточечная запись ВБР методом протяжки волокна через прозрачную феррулу.

А.А.Вольф, А.В.Достовалов, С.А.Бабин. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1; Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: alexey.a.wolf@gmail.com

S.Wabnitz. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1; University of Brescia, Italy, 25121 Brescia, Piazza del Mercato, 15

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

положения области модификации в поперечном срезе ВС использовались две КМОП-камеры и дополнительный объектив, установленный перпендикулярно основному. Продольная периодическая модуляция ПП достигалась за счет перемещения ВС с выбранной постоянной скоростью $v_{tr} \approx 0.5$ мм/с с помощью высокоточного линейного транслятора Aerotech ABL1000. Период ВБР определялся соотношением $\Lambda = v_{tr}/f$, а резонансная длина волны в первом порядке $\lambda = 2n_{eff}v_{tr}/f$. Волокно фиксировалось на линейном трансляторе при помощи зажима, который в случае записи ВБР в семисердцевинном ВС имел угловую степень свободы, что позволяло поворачивать ВС вокруг своей оси.

Для создания образца датчика изгибных деформаций ВБР записывались в отдельных сердцевинах семисердцевинного ВС Fibercore SM-7C1500(6.1/125), имеющего диаметр оболочки 125 мкм, расстояние между сердцевинами 35 мкм и диаметр модового пятна для каждой из сердцевин 5.7–6.5 мкм на длине волны 1550 нм. ВБР длиной 2.5 мм создавались в центральной и трех периферийных сердцевинах ВС, расположенных в углах равностороннего треугольника. Запись ВБР производилась последовательно, при этом начальные положения решеток были совмещены по продольной координате. При записи каждой отдельной ВБР изменялся ее период и резонансная длина волны. На рис.2 представлена микрофотография скола семисердцевинного ВС в области записи массива ВБР, полученная с помощью оптического микроскопа с функцией дифференциального интерференционного контраста. Видно, что модификация ПП происходила строго в области выбранной сердцевины ВС.

Для измерения спектров отражения созданных ВБР использовался анализатор Yokogawa AQ6370 и суперлюминесцентный диод. Излучение последнего поступало на вход волоконного циркулятора и далее поочередно направлялось в каждую отдельную сердцевину ВС при помощи специализированного разветвителя Fibercore FAN-7C. Результаты измерений приведены на рис.3.а. Поскольку изгиб участка многосердцевинного ВС, в котором записаны ВБР, приводит к растяжению и сжатию материала

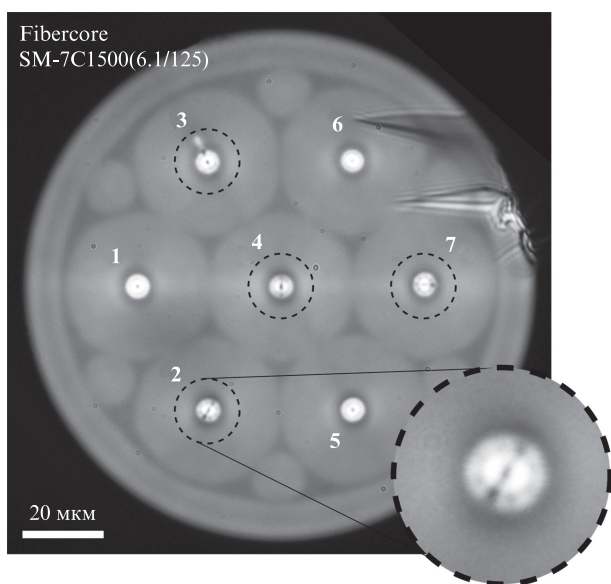


Рис.2. Микрофотография скола семисердцевинного ВС в области записи массива ВБР. Отмечены сердцевин 4, 2, 3 и 7, в которых производилась запись.

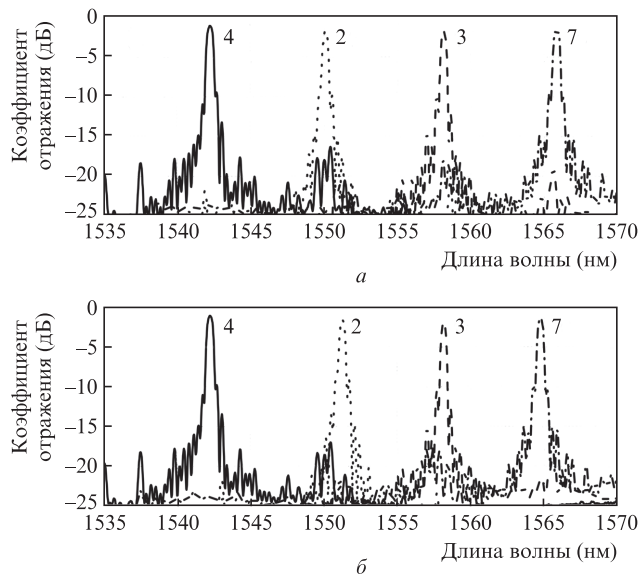


Рис.3. Спектры отражения ВБР, измеренные для сердцевин 4, 2, 3 и 7 семисердцевинного ВС в случаях, когда участок ВС, содержащий ВБР, выпрямлен (а) и когда он закреплен на цилиндрической поверхности диаметром 65 мм (б).

оболочки, для полученного образца были измерены спектры отражения при наклеивании участка ВС, содержащего ВБР, на цилиндрическую поверхность диаметром 65 мм (рис.3.б). Как видно из рис.3.б, резонансные длины волн для сердцевин 2 и 7 сместились на $\Delta\lambda_2 = -1.15$ нм и $\Delta\lambda_7 = 1.09$ нм соответственно. При этом резонансные длины волн, соответствующие центральной сердцевине 4 и периферийной сердцевине 3, не показали заметного сдвига. Такая ситуация соответствует ориентации волоконного световода, когда сердцевина 7 находится ближе к поверхности цилиндра, чем сердцевина 2, при этом сердцевин 3 и 4 расположены на линии, параллельной поверхности цилиндра.

Величины смещений резонансных длин волн ВБР для разных сердцевин могут быть использованы при вычислении радиуса и направления изгиба, что позволяет создавать векторные изгибные датчики для применения в робототехнике и диагностике конструкций. Возможность выбора параметров для каждой отдельной ВБР создает перспективы создания многопараметрических датчиков, а также позволяет опрашивать такие датчики через один порт, т.к. сигналы от разделенных по длинам волн ВБР могут быть сложены через волоконный объединитель. Кроме того, технология модификации отдельных сердцевин с помощью фемтосекундных лазерных импульсов позволяет создавать ВБР, играющие роль зеркала в лазерах на основе многосердцевинных ВС [10].

Другим ВС, с которым проводились эксперименты по записи ВБР, был телекоммуникационный многомодовый световод Corning 62.5/125, имеющий градиентный профиль ПП сердцевины, диаметр сердцевины $d_0 = 62.5$ мкм и числовую апертуру $NA = 0.275$. Для такого ВС распределение электрического поля моды LP_{mp} имеет следующий вид:

$$E_{mp}(\rho, \varphi) \sim \rho^{m/|\rho_0^{m|+1}} L_{p-1}^{m|}(\rho^2/\rho_0^2) \exp(-\rho^2/2\rho_0^2) \exp(im\varphi), \quad (1)$$

где p , m – радиальное и азимутальное числа соответственно, а $L_p^m(x)$ – полином Лагерра–Гаусса.

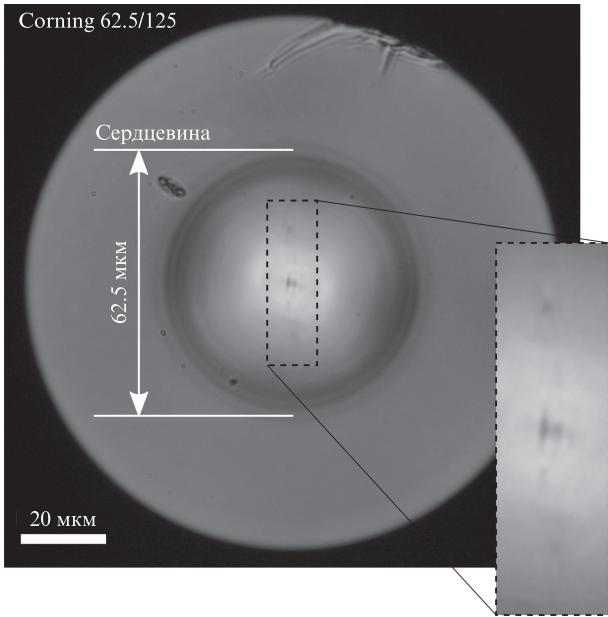


Рис.4. Микрофотография скота многомодового ВС в области записи ВБР.

В первом порядке взаимодействие поперечных мод со структурой ВБР с периодом Λ , записанной в сердцевине ВС, реализуется при выполнении условия фазового синхронизма: $\beta_\mu - \beta_\nu = 2\pi/\Lambda$, где $\beta_i = 2\pi n_{\text{eff}}^i/\lambda$ – постоянная распространения i -й моды, n_{eff}^i – эффективный ПП i -й моды. Коэффициент связи ВБР для поперечных мод μ, ν может быть записан как [11]:

$$k_{\mu\nu} \approx \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \Delta\epsilon(\rho, \varphi) E_\mu(\rho, \varphi) E_\nu^*(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi, \quad (2)$$

где $\Delta\epsilon(\rho, \varphi)$ – поперечная составляющая изменения диэлектрической проницаемости, обусловленная наличием ВБР. Отсюда видно, что возможность позиционирования ВБР в поперечном сечении ВС позволяет изменять коэффициент связи решетки и тем самым спектрально селективно выбирать необходимую группу поперечных мод.

На рис.4 приведена микрофотография скота многомодового ВС в области записи ВБР. Фемтосекундные импульсы с энергией 300 нДж фокусировались в центральную часть сердцевины. Размер области модификации в продольном направлении составил ~ 30 мкм, что обеспечивало ее перекрытие сразу с несколькими группами поперечных мод.

Исследуемый образец ВБР 1-го порядка имел длину 5.26 мм и период 0.526 мкм. Для измерения спектральных характеристик образца использовалась схема, приведенная на рис.5,а. Широкополосным источником оптического сигнала служил суперлюминесцентный диод (СЛД) Thorlabs SLD1550S-A2, излучение от которого поступало на одномодовый циркулятор. Пройдя через циркулятор, сигнал попадал в многомодовый ВС, содержащий ВБР. При сварке одномодового и многомодового ВС центры сердцевины совмещались. Отраженный и прошедший сигналы регистрировались с помощью оптического спектроанализатора. Из спектра отражения (рис.5,б) видно, что в нем присутствуют 4 группы мод, при этом с ростом номера группы амплитуда резонансного пика заметно уменьшается. Это обусловлено тем, что на стыке одномодового и многомодового ВС наибольшая доля мощности опти-

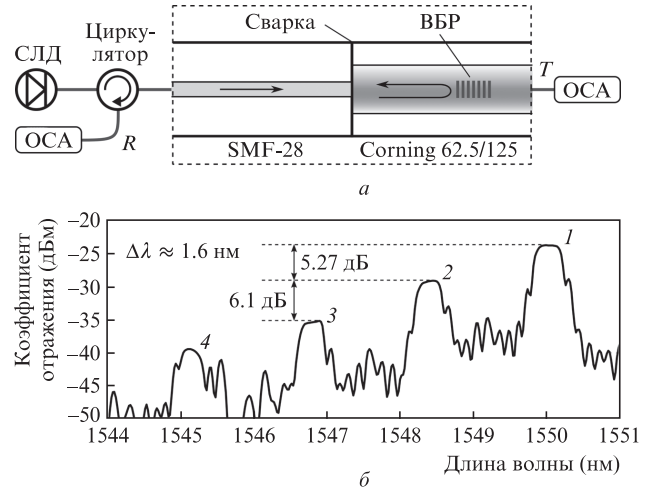


Рис.5. Схема измерения (а) и спектр отражения (б) ВБР, записанной в многомодовом ВС с градиентным профилем ПП; 1–4 – группы мод.

ческого сигнала перешла в фундаментальную моду LP_{01} , а оставшаяся распределилась по группам мод с более высокими номерами.

Измерение спектра пропускания записанного образца ВБР (рис.6) показывает, что для всех девяти (1–9) видимых групп мод (длины волн 1537–1551 нм) резонансные провалы имеют амплитуду 10.5–17 дБ, что свидетельствует об эффективном перекрытии поля этих групп мод со структурой ВБР. Также можно заметить, что по мере роста номера группы происходит усиление межмодового взаимодействия, о чем свидетельствует рост промежуточных резонансов. Резонансы, расположенные в коротковолновой области (менее 1537 нм), обусловлены возникновением связи между модами сердцевины и оболочки ВС. Так, при измерении спектра пропускания для решетки, погруженной в иммерсионную жидкость, резонансы исчезают (рис.6,б), поскольку для оболочечных мод нарушается условие полного внутреннего отражения, и оптический сигнал выходит из оболочки в окружающую среду.

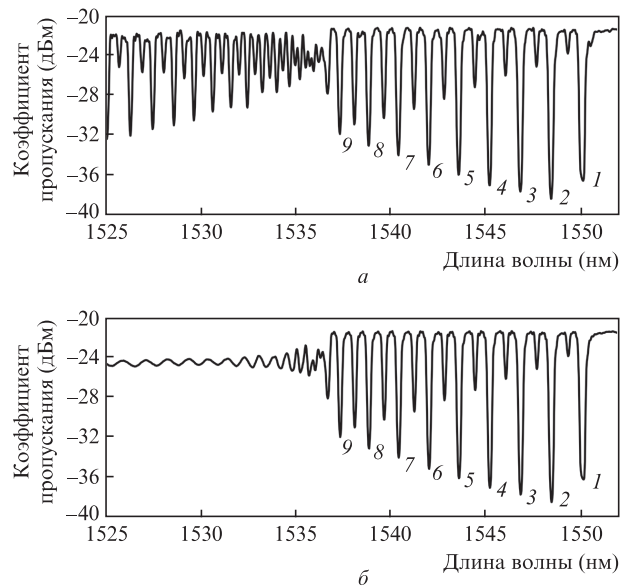


Рис.6. Измеренные в воздушной окружающей среде (а) и в иммерсионной жидкости (б) спектры пропускания ВБР, записанной в многомодовом ВС с градиентным профилем ПП.

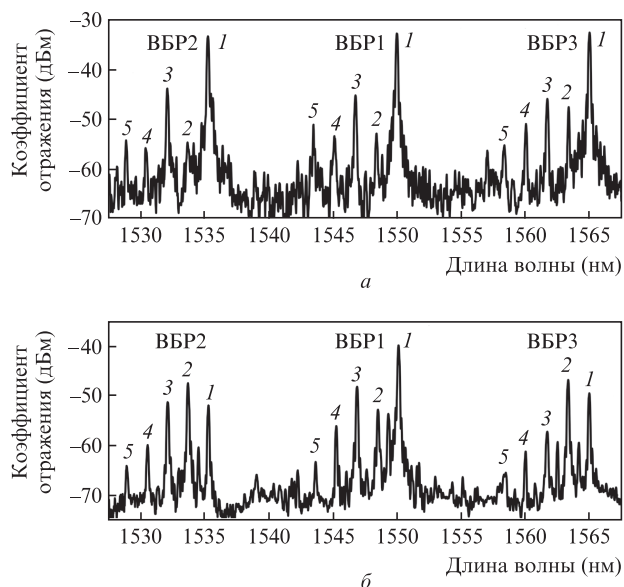


Рис.7. Спектры отражения массива ВБР, записанного в многомодовом ВС с градиентным профилем ПП в случаях, когда запись производилась в центральной части сердцевины последовательно (а) и когда все решетки записаны параллельно (б), при этом ВБР1 записана в центральной части сердцевины, а ВБР2 и 3 записаны с отступом ~ 10 мкм.

В следующем эксперименте были записаны два массива ВБР в многомодовом ВС. Первый состоял из трех однородных решеток длиной 5.26 мм, записанных последовательно друг за другом в центральной части ВС. Энергия фемтосекундных импульсов была снижена до 180 нДж для уменьшения размера модифицируемой области. Все три решетки имели разный период и резонансную длину волны, что позволяло спектрально разделить резонансы в спектре отражения (рис.7,а). Видно, что для всех решеток амплитуда моды LP_{11} (группа 2) была значительно меньше амплитуды резонанса моды LP_{01} (группа 1). Разность амплитуд варьировалась от 15.3 до 21.6 дБ, что значительно превышает аналогичную разность для ВБР, созданной при более высокой энергии записывающих импульсов (рис.5).

Второй массив ВБР состоял из трех однородных решеток, записанных параллельно друг другу. Сначала производилась запись ВБР1 в центральной части сердцевины при энергии импульсов 180 нДж, затем запись ВБР2 и ВБР3 в периферийной части сердцевины при энергии импульсов 270 нДж. Все ВБР были совмещены по продольной координате, а поперечный отступ вдоль поперечной оси x составил ~ 10 мкм. На рис.8 приведена микрофотография скола многомодового ВС в области записи данного массива ВБР. Как видно из спектра отражения (рис.7,б), для резонансов, отвечающих периферийным ВБР2 и 3, наибольшую амплитуду имеет пик, связанный с модой LP_{11} (группа 2), хотя доля мощности оптического сигнала в данной моде значительно меньше, чем для моды LP_{01} (группа 1). Это свидетельствует о возможности эффективной спектральной селекции групп мод, имеющих распределение поля вне центральной части сердцевины многомодового ВС.

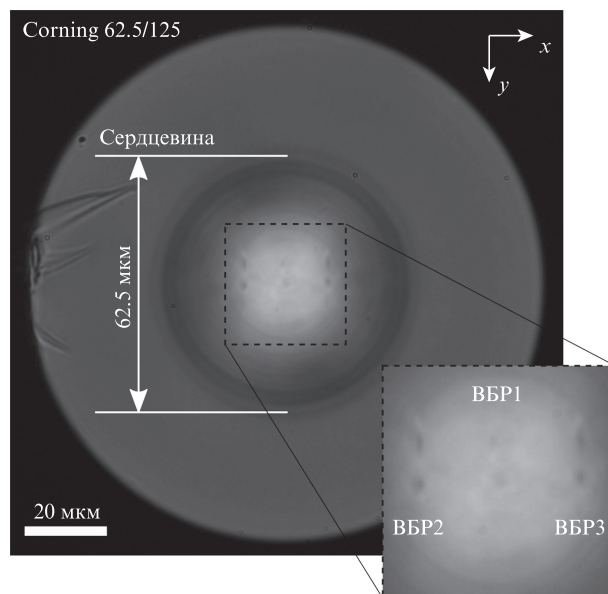


Рис.8. Микрофотография скола многомодового ВС в области записи массива ВБР.

Таким образом, в работе продемонстрированы возможности технологии фемтосекундной записи для создания ВБР в ВС со сложной пространственной структурой. Создан образец массива ВБР в семисердцевинном ВС, в котором однородные решетки с разными периодами были записаны в выбранных сердцевинах световода. На примере многомодового ВС с градиентным профилем ПП было показано, что точное позиционирование модификации ПП в поперечном направлении позволяет спектрально селективно выбирать разные группы мод. Полученные результаты могут быть использованы для создания датчиков физических величин и многомодовых волоконных лазеров с контролируемым модовым составом.

Работа выполнена при поддержке гранта 14.Y26.31.0017 Министерства науки и высшего образования (работа А.А.В. и С.В.) и гранта Российского научного фонда 14-22-00118 (работа А.В.Д. и С.А.Б.).

- Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. *Nat. Photon.*, **7**, 354 (2013).
- Gasulla I., Barrera D., Hervás J., Sales S. *Sci. Rep.*, **7**, 41727 (2017).
- Zlobina E.A., Kablukov S.I., Wolf A.A., Dostovalov A.V., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **42**, 9 (2017).
- Weng Y., Ip E., Pan Z., Wang T. *Sensors (Switzerland)*, **16**, 1387 (2016).
- Krupa K., Tonello A., Shalaby B.M., Fabert M., Barthélémy A., Millot G., Wabnitz S., Couderc V. *Nat. Photon.*, **11**, 237 (2017).
- Chekhovskoy I.S., Rubenchik A.M., Shtyrina O.V., Sorokina M.A., Wabnitz S., Fedoruk M.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 2169 (2018).
- Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 1085 (2005)].
- Gattass R.R., Mazur E. *Nat. Photon.*, **2**, 219 (2008).
- Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
- Скворцов М.И., Абдуллина С.Р., Вольф А.А., Лобач И.А., Достовалов А.В., Бабин С.А. *Квантовая электроника*, **48**, 1089 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 1089 (2018)].
- Thomas J., Jovanovic N., Becker R.G., Marshall G.D., Withford M.J., Tünnermann A., Nolte S., Steel M.J. *Opt. Express*, **19**, 325 (2011).