

# Волоконный ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью на основе массива волоконных брэгговских решеток

М.И.Скворцов, С.Р.Абдуллина, А.А.Власов, Е.А.Злобина, И.А.Лобач, В.С.Терентьев, С.А.Бабин

*Продemonстрирована возможность создания ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью, реализованной за счет записи массива из 57 волоконных брэгговских решеток со случайным набором фаз и амплитуд в пассивном волокне с сохранением поляризации длиной 13 м. Мощность генерации непрерывного линейно поляризованного излучения на длине волны 1092.3 нм достигает 5.7 Вт. Ширина спектра генерации при максимальной мощности составляет около 80 пм. В припороговом режиме наблюдается одночастотная генерация с шириной линии менее 100 кГц, измеренной методом гетеродинамирования.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, ВКР-лазер, волоконная брэгговская решетка, случайная распределенная обратная связь.

## 1. Введение

В последнее время большой интерес представляют лазеры со случайной распределенной обратной связью (СРОС) на основе неупорядоченных структур. Одним из примеров таких лазеров являются источники излучения, в которых СРОС возникает из-за рэлеевского рассеяния света на флуктуациях показателя преломления среды, а усиление – за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волоконных световодах [1]. Как правило, такие лазеры имеют резонатор длиной от нескольких сотен метров до десятков километров. Показано, что кроме стандартного телекоммуникационного диапазона (~1.5 мкм [1]) обратная связь за счет рэлеевского рассеяния позволяет получать генерацию стоковой волны в спектральных областях с длинами волн не более 1 мкм [2], ~1.1 мкм [3], ~1.2 мкм [4] и ~1.4 мкм [5], а каскадная генерация высших стоковых компонент дает возможность перестройки длины волны ВКР-лазера с рэлеевской СРОС в широком диапазоне: 1.1–2 мкм [6, 7]. При этом использование световодов с сохранением поляризации позволяет получать на выходе линейно поляризованную генерацию с высокой эффективностью преобразования оптической накачки в стоково излучение, слабо зависящей от номера стоковой компоненты (70%–80%) [6]. Без дополнительной спектральной селекции ширина линии излучения СРОС-лазера определяется контуром ВКР-усиления и составляет 1–3 нм [1–7]. Большая длина резонатора и относительно широкий

спектр генерации являются основными недостатками такого лазера.

Для уменьшения ширины лазерной линии, как правило, применяются различные спектральные фильтры. Например, с помощью данного подхода в работе [8] продемонстрирована генерация в волоконном ВКР-лазере со СРОС при ширине линии ~50 пм. При использовании перестраиваемого фильтра можно получать плавную перестройку длины волны излучения внутри широкого спектра ВКР-усиления [9], при этом неселективность рэлеевской обратной связи по частоте позволяет получить равномерную перестроечную характеристику при изменениях мощности ~0.1 дБ. Также в таких лазерах возможно получение многоволновой генерации. В работе [10] продемонстрирована генерация серии узких спектральных линий внутри области ВКР-усиления, полученная за счет применения в качестве спектральных фильтров набора из 22 волоконных брэгговских решеток (ВБР) с разной длиной волны отражения. ВКР-лазеры со СРОС нашли свое применение во многих областях – от создания распределенных датчиков [10, 11] до волоконно-оптической связи [12, 13].

Существует другой тип СРОС, который реализуется за счет последовательности ВБР, записанных через случайные интервалы (массив ВБР) либо со случайными фазовыми сдвигами вдоль ВБР (случайная ВБР). В общем случае в таких лазерах можно получить много- или одночастотный режим генерации в зависимости от длины резонатора и мощности накачки. Данная методика изготовления резонатора СРОС-лазера позволяет значительно уменьшить его длину. Так, в одной из первых работ [14] описаны эрбиевые лазеры на случайных решетках длиной 20 и 30 см с длиной волны генерации 1534 нм. Каждая решетка состояла из сегментов случайной длины со случайными фазовыми сдвигами между ними, что было обусловлено технологией записи. Ширина линии генерации составила 0.5 пм. В работе [15] реализован одночастотный иттербиевый волоконный лазер, генерирующий вблизи длины волны 1030 нм, с распределенной обратной связью на случайной ВБР длиной 4.1 см, состо-

М.И.Скворцов, И.А.Лобач, С.А.Бабин. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: qwertymikhails@gmail.com, babin@iae.nsk.su  
С.Р.Абдуллина, А.А.Власов, Е.А.Злобина, В.С.Терентьев. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1

Поступила в редакцию 2 мая 2017 г., после доработки – 26 июня 2017 г.

ящей из десяти сегментов и имеющей два набора случайных характеристик – фазовых и амплитудных. Измеренная ширина лазерной линии составила менее 100 кГц. В работе [16] предложен и реализован случайный эрбиевый волоконный лазер с длиной волны генерации  $\sim 1535$  нм, в котором обратная связь осуществлялась за счет массива решеток. Количество ВБР в лазере варьировалось от 7 до 31. Длина каждой решетки была равна 5 мм, расстояние между соседними решетками выбиралось случайным образом из диапазона 4.2–5.8 мм, общая длина волокна составила 1.5 м. В спектре генерации присутствовали две продольные моды для лазера с семью решетками и пять-семь конкурирующих мод для лазера с большим числом решеток.

В работе [17] впервые продемонстрирован ВКР-лазер со СРОС на основе случайной ВБР длиной 1 м с полным числом фазовых сдвигов около 1500. Лазер генерировал на длине волны 1576 нм при накачке на длине волны 1480 нм, ширина линии в одночастотном режиме составляла 430 кГц на пороге генерации и достигала 0.3 нм при максимальной выходной мощности 15 мВт и дифференциальной эффективности лазера 0.8%. Для изготовления резонатора СРОС-лазера не требуется высокой точности, в отличие от лазера с регулярной распределенной обратной связью (РОС-лазер), для которого необходима запись длиной ВБР высокого качества. Так, в работе [18] в РОС-лазере была использована ВБР длиной 12.4 см и получена ВКР-генерация как в коммерческом германо-силикатном волокне, так и в волокне с высоким коэффициентом нелинейности при повышенной концентрации германия. Лазер генерировал на длине волны 1584 нм с накачкой на длине волны 1480 нм. В случае коммерческого волокна выходная мощность, ширина линии генерации и пороговая мощность составили 150 мВт, 7.5 МГц и 39 Вт, а в случае высоконелинейного волокна – 350 мВт, 4 МГц и 4.3 Вт соответственно. По сравнению с работой [17] пороговая мощность для РОС-лазера была значительно выше (при использовании стандартного волокна).

Таким образом, в случае ВКР-лазера с распределенной обратной связью на основе случайных ВБР высокие требования к созданию резонатора не предъявляются, в отличие от РОС-лазера на основе регулярной ВБР, при этом его длина может быть на несколько порядков меньше по сравнению со случайными ВКР-лазерами на рэле-вском рассеянии.

В настоящей работе представлен ВКР-лазер со СРОС на основе массива ВБР, записанных в германо-силикатном пассивном волокне с сохранением поляризации. Данная конфигурация имеет преимущества перед схемой со случайной ВБР [17]: для записи массива коротких ВБР можно использовать стандартное оборудование, а за счет увеличения промежутков между отдельными решетками можно снизить порог генерации и увеличить эффективность лазера.

## 2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки для записи и определения характеристик ВБР показана на рис.1. В процессе записи моторизированный линейный транслятор 6 с волоконным световодом 5 и фазовой маской 4, рассчитанной на брэгговскую длину волны 1093 нм, перемещается поперек пучка аргонового УФ лазера 1. Излучение лазера на длине волны 244 нм фокусируется цилиндриче-

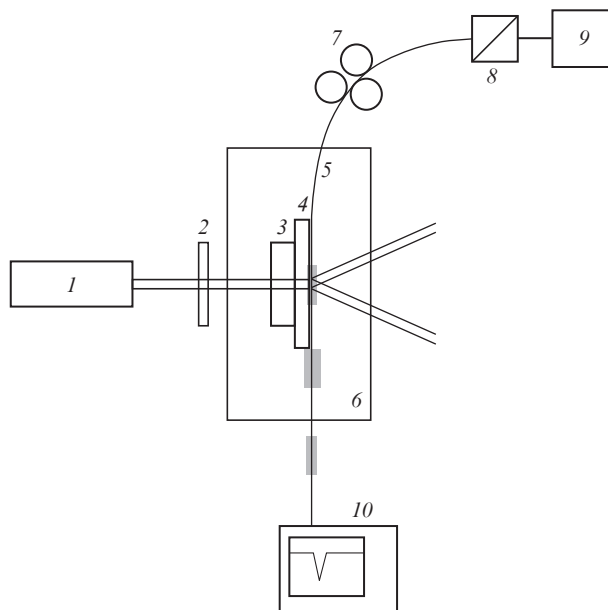


Рис.1. Схема записи ВБР:

1 – УФ лазер; 2 – фокусирующая цилиндрическая линза; 3 – пьезо-керамический элемент; 4 – фазовая маска; 5 – волоконный световод; 6 – линейный транслятор; 7 – контроллер поляризации; 8 – поляризатор; 9 – источник спонтанного излучения; 10 – анализатор оптических спектров; серые прямоугольники – ВБР со случайной амплитудой и фазой.

ской линзой 2 в сердцевину световода. Вследствие интерференции дифрагировавших пучков создаются ВБР с однородным профилем показателя преломления и периодом модуляции, определяемым фазовой маской. Для стабилизации резонансной длины волны ВБР участки волокна, в которых записывались решетки, фиксировались с одинаковым натяжением, что впоследствии приводило к смещению брэгговской длины волны в коротковолновую область, когда ВБР находилась в свободном состоянии. Экспозиция в процессе записи ВБР определялась скоростью транслятора, которая задавалась генератором случайных чисел так, что коэффициент отражения решеток варьировался в диапазоне 10%–15%. При перемещении волокна для записи следующего сегмента между решетками формировался случайный фазовый сдвиг. Точность позиционирования составляла  $\sim 1$  мм. При общем числе решеток 57 и расстоянии между их центрами  $\sim 230$  мм длина одной решетки была равна  $\sim 40$  мм. Таким образом, общая длина резонатора составила около 13 м. Детальной оптимизации набора решеток не проводилось, их число было выбрано из следующих соображений: при в два раза меньшем числе решеток и имеющейся мощности накачки порог генерации не достигался, а увеличение числа отражателей увеличивало нерезонансные потери, которые приводили к уменьшению мощности накачки на выходе и КПД лазера.

На рис.2 приведен спектр пропускания массива ВБР, записанного в германо-силикатном волоконном световоде с сохранением поляризации (Fujikura SM98-PS-U25D, диаметр сердцевины  $6.6 \pm 0.5$  мкм). Спектр был измерен для ортогональных поляризаций, схема измерения показана на рис.1. В качестве широкополосного излучателя использовался источник спонтанного излучения на основе иттербиевого волокна 9. Излучение, прошедшее через поляризатор 8 и контроллер поляризации 7, реги-

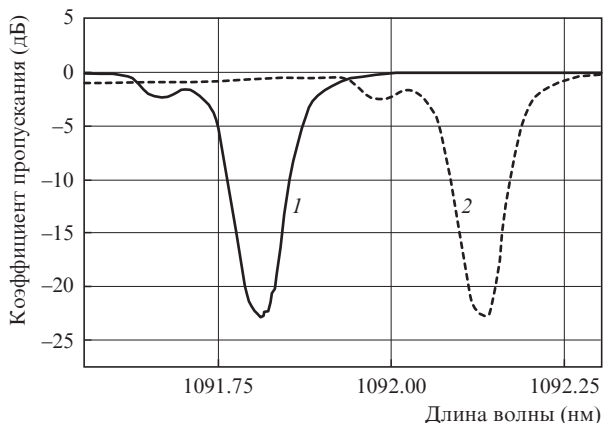


Рис.2. Спектры пропускания излучения, поляризованного вдоль быстрой (1) и медленной (2) осей световода с массивом случайных ВБР.

стрировалось оптическим анализатором спектра Yokogawa AQ6370 10 с разрешением 20 пм. Глубина провала в спектре пропускания была равна -23 дБ, а его ширина на уровне -10 дБ составила менее 0.1 нм. Измеренные нерезонансные общие потери в длинной решетке равнялись ~30%.

На основе записанной ВБР был реализован ВКР-лазер со СРОС, схема которого приведена на рис.3. Излучение источника накачки 1 на длине волны 1045.2 нм через изолятор и спектрально-селективный разветвитель 3 заводится в волокно, в котором записан массив случайных ВБР. Спектрально-селективный разветвитель 6 разделяет стоксово излучение и излучение накачки, прошедшее через массив ВБР 5. В качестве непрерывного источника накачки использовалась лазерная система, состоящая из задающего генератора и усилителя на основе иттербиевого волокна. С помощью перестройки брэгговской длины волны решетки в резонаторе лазер накачки генерирует излучение в диапазоне 1040–1070 нм [19]. В отличие от работы [17], в ВКР-лазере отсутствует запирающая решетка для рециркуляции излучения накачки.

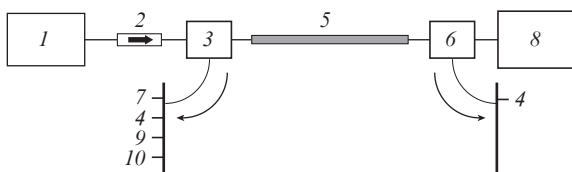


Рис.3. Схема ВКР-лазера со СРОС: 1 – источник накачки на  $\lambda = 1045.2$  нм; 2 – изолятор; 3, 6 – спектрально-селективные разветвители; 4, 8 – измерители мощности; 5 – массив случайных ВБР на  $\lambda = 1092.3$  нм; 7 – анализатор оптических спектров; 9 – осциллограф; 10 – поляриметр.

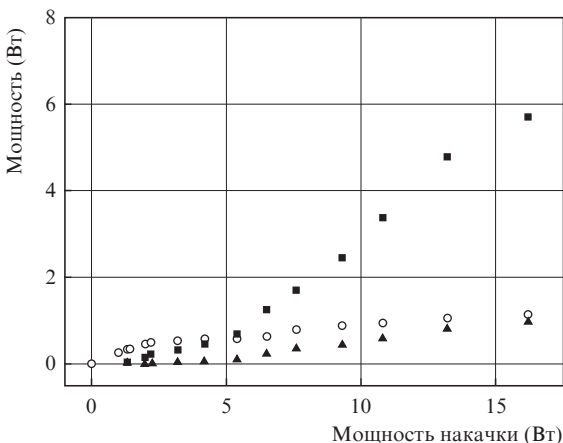


Рис.4. Мощность излучения накачки, прошедшего через массив ВБР (○), а также мощности стоксовой компоненты, распространяющейся вперед (▲) и назад (■), в зависимости от входной мощности накачки.

качки использовалась лазерная система, состоящая из задающего генератора и усилителя на основе иттербиевого волокна. С помощью перестройки брэгговской длины волны решетки в резонаторе лазер накачки генерирует излучение в диапазоне 1040–1070 нм [19]. В отличие от работы [17], в ВКР-лазере отсутствует запирающая решетка для рециркуляции излучения накачки.

На рис.4 представлены мощность излучения накачки, прошедшего через волокно, и мощности генерации стоксовых компонент, распространяющихся в прямом и обратном по отношению к излучению накачки направлениях, полученные с использованием измерителей мощности 4 и 8, в зависимости от входной мощности накачки.

При достижении пороговой мощности ~1.3 Вт лазер начинал генерировать излучение на стоксовой длине волны ВКР. В этом случае режим генерации является непрерывным. Измеренная вблизи пороговой мощности осциллограмма интенсивности стоксова излучения, распространяющегося в обратном направлении, приведена на рис.5. Мощность генерации стоксовых компонент в реализованной схеме достигает 5.7 Вт, что на два порядка превышает значения, полученные в [17]. Это объясняется тем, что в нашем случае длина германосиликатного волокна, в котором происходит усиление стоксовой волны, на порядок больше. Дифференциальная эффективность для излучения, распространяющегося назад, составила 34.8%, а вперед – 5.8%. Такое различие обусловлено тем, что в случае генерации стоксовой волны, распространяющейся назад, волна усиливается в области неистощенной накачки, в то время как усиление прямой волны происходит в области истощенной накачки, аналогично ВКР-лазеру с рэлеевской СРОС [20].

Стоксово излучение было линейно поляризованным, поскольку в эксперименте использовались линейно поляризованное излучение накачки и волокно с сохранением поляризации. Значение коэффициента экстинкции, измеренное с помощью поляриметра ThorlabsTPX 5004, равнялось 19.2 дБ. Используя поляризованное излучение в качестве накачки, мы снизили порог генерации, т. к. для деполаризованного излучения пороговая мощность увеличивается в два раза [21].

На рис.6 показаны спектры генерации стоксовой волны, распространяющейся в обратном направлении, при различных мощностях накачки. Спектры получены с помощью спектроанализатора. В припороговом режиме длина волны генерации составила ~1092.3 нм, а измеренная

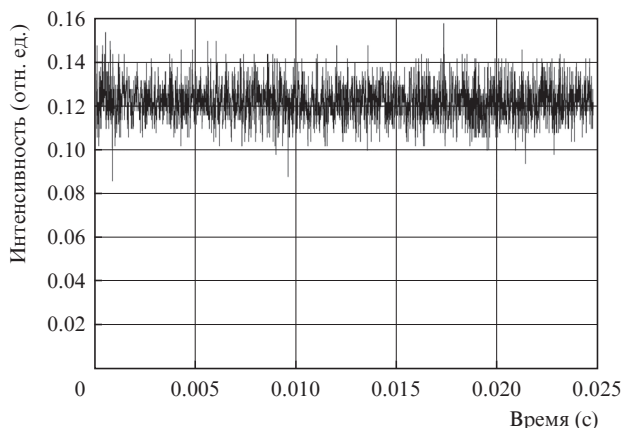


Рис.5. Осциллограмма интенсивности стоксовой компоненты ВКР-лазера со СРОС, распространяющейся назад.

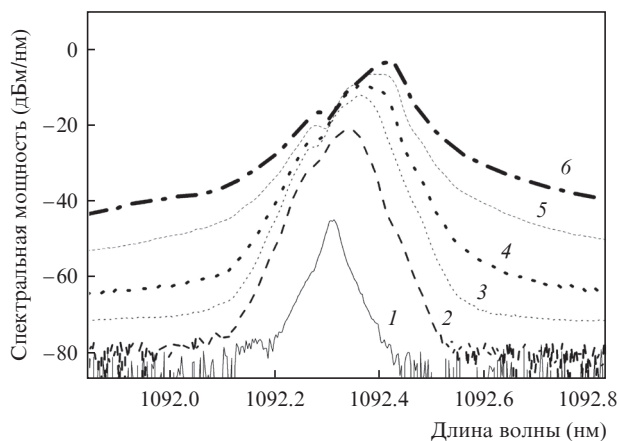


Рис.6. Спектры стоксовой компоненты, распространяющейся в обратном направлении, при мощностях накачки 1.3 (1), 2 (2), 4.2 (3), 6.5 (4), 10.8 (5) и 16.2 Вт (6).

ширина спектра стоксова излучения на уровне  $-3$  дБ соответствовала ширине аппаратной функции спектроанализатора (20 пм). Известно, что коэффициент ВКР-усиления, зависящий от разности частот накачки и генерации  $\Delta\omega$ , достигает максимального значения в германосиликатном световоде при  $\Delta\omega \approx 440 \text{ см}^{-1}$  (см., напр., [22]). В нашем случае  $\Delta\omega = 410 \text{ см}^{-1}$ , однако это не сильно снижает эффективность ввиду относительно пологой формы спектра ВКР-усиления вблизи максимума [22]. При увеличении мощности накачки от 1.3 до 2 Вт спектр генерации значительно уширяется, что говорит о возникновении многомодового режима. При мощности накачки свыше 2 Вт ширина спектра меняется незначительно и составляет 60–80 пм.

Для более точного определения спектральной ширины излучения лазера вблизи порога использовался метод самогетеродинамирования [23]. Излучение стоксовой компоненты проходило через интерферометр Маха–Цендера, длина одного из плеч которого равнялась  $\sim 1.8$  км, что дает разрешающую способность  $\sim 100$  кГц. В короткое плечо интерферометра был помещен акустооптический модулятор с несущей частотой 150 МГц.

На рис.7 представлен спектр биений, полученный с помощью радиочастотного анализатора Agilent Signal

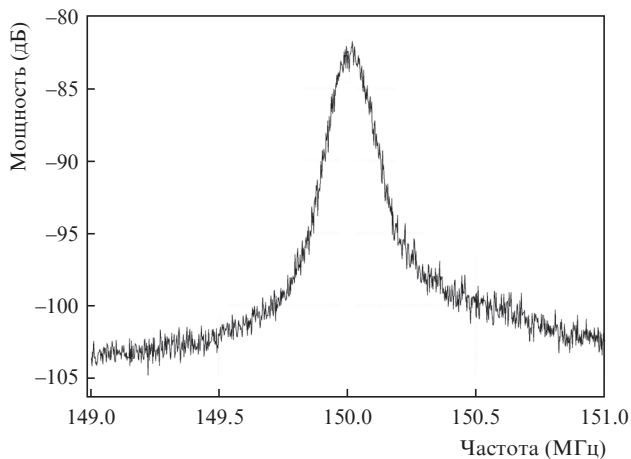


Рис.7. Спектр биений стоксовой компоненты ВКР-лазера со СПОС, распространяющейся в обратном направлении.

Analyzer N9010A, имеющего в данном режиме разрешение 10 кГц. Ширина сигнала биений на полувысоте при мощности накачки 1.3 Вт равна 140 кГц, что соответствует ширине спектральной линии менее 100 кГц. При этих условиях мощность генерации стоксова излучения составила 12.5 мВт. При увеличении мощности накачки на сотни милливатт в спектре биений возникает сигнал на частотах, отличных от несущей, что связано с выходом в режим генерации других продольных мод и выражается в увеличении спектральной ширины линии.

### 3. Заключение

В настоящей работе продемонстрирован ВКР-лазер с распределенной обратной связью на основе массива относительно коротких ВБР со случайными фазами и амплитудами, записанного без применения специальной методики изготовления длинной решетки с фазовыми сдвигами вдоль нее. Полученная мощность генерации стоксовой компоненты на длине волны 1092.4 нм достигала  $\sim 5.7$  Вт при мощности накачки  $\sim 16$  Вт. Пороговая мощность генерации составила 1.3 Вт, при этом спектральная ширина линии генерации не превышала 100 кГц ( $\sim 0.0004$  пм). При максимальной мощности накачки измеренная ширина линии была равна  $\sim 80$  пм. По сравнению с работой [17], вследствие на порядок большей эффективной длины ВКР-лазера нами были получены более низкий порог генерации, более высокая дифференциальная эффективность лазера, а также более узкая спектральная ширина линии. Оптимизированный ВКР-лазер со СПОС может найти различные применения: имея узкую спектральную ширину и достаточно большую мощность, он может использоваться для опроса удаленных ВБР-датчиков, а также в качестве источника излучения в распределенных сенсорных системах. Более того, данная схема может быть реализована для длин волн в диапазоне  $\sim 1.5$  мкм, что позволит применять подобные лазеры в телекоммуникациях. Мощное узкополосное излучение также можно эффективно преобразовать в видимую область спектра за счет удвоения частоты в нелинейном кристалле или в волокне с периодически наведенной квадратичной нелинейностью (см., напр., [24]).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 14-22-0118).

Экспериментальная часть работы выполнялась на оборудовании ЦКП «Спектроскопия и оптика» при ИАиЭ СО РАН (<http://ckp-rf.ru/ckp/3046/>).

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Churkin D.V., Kablukov S.I., Ania-Castañón J.D., Karalekas V., Podivilov E.V. *Nat. Photonics*, **4**, 231 (2010).
2. Babin S.A., Dontsova E.I., Kablukov S.I. *Opt. Lett.*, **38** (17), 3301 (2013).
3. Teng R., Ding Y., Chen L. *Appl. Phys. B*, **111**, 169 (2013).
4. Churkin D.V., Vatnik I.D., Turitsyn S.K. *Laser Phys.*, **21**, 1525 (2011).
5. Rao Y.J., Zhang L.W., Zhu J.M., et al. *Opt. Express*, **20**, 22563 (2012).
6. Babin S.A., Zlobina E.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *Sci. Rep.*, **6**, 22625 (2016).
7. Zhang L., Jiang H., Yang X., Pan W., Cui S., Feng Y. *Sci. Rep.*, **7**, 42611 (2017).
8. Sugavanam S., Tarasov N., Shu X., Churkin D.V. *Opt. Express*, **21**, 16466 (2013).

9. Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P. *Phys. Rev. A*, **84**, 021805 (2011).
10. El-Taher A.E., Harper P., Babin S.A., Churkin D.V., Podivilov E.V., Ania-Castañón J.D., Turitsyn S.K. *Opt. Lett.*, **36**, 130 (2011).
11. Jia X.-H., Rao Y.-J., Yuan C.-X., et al. *Opt. Express*, **21**, 24611 (2013).
12. Martins H., Marques M.B., Frazão O. *Opt. Express*, **19**, 18149 (2011).
13. Jia X.-H., Rao Y.-J., Peng F., et al. *Opt. Express*, **21**, 6572 (2013).
14. Gagné M., Kashyap R. *Opt. Express*, **17**, 19067 (2009).
15. Abdullina S.R., Vlasov A.A., Lobach I.A., Belai O., Shapiro D.A., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 075104 (2016).
16. Lizarraga N., Puente N.P., Chaikina E.I., Leskova T.A., Mendez E.R. *Opt. Express*, **17**, 395 (2009).
17. Gagné M., Kashyap R. *Opt. Lett.*, **39**, 2755 (2014).
18. Westbrook P.S., Abedin K.S., Nicholson J.W., Kremp T., Porque J. *Opt. Lett.*, **36**, 2895 (2011).
19. Zlobina E.A., Kablukov S.I., Babin S.A. *Opt. Express*, **23**, 833 (2015).
20. Vatnik I.D., Churkin D.V., Babin S.A. *Opt. Express*, **20**, 28033 (2012).
21. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996).
22. Stolen R.H., Lee C., Jain R.K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **1**, 652 (1984).
23. Derickson D. *Fiber Optic Test and Measurement* (New Jersey: Prentice Hall, 1998).
24. Донцова Е.И., Каблуклов С.И., Лобач И.А., Достовалов А.В., Бабин С.А., Гладышев А.В., Дианов Е.М., Корбари К., Ибсен М., Казанский П.Г. *Квантовая электроника*, **46** (11), 989 (2016) [*Quantum. Electron.*, **46** (11), 989 (2016)].