

# Одночастотный эрбиевый лазер со случайной распределенной обратной связью на основе неупорядоченных структур, созданных фемтосекундным лазерным излучением

М.И.Скворцов, С.Р.Абдуллина, А.А.Вольф, А.В.Достовалов, А.Е.Чурин, О.Н.Егорова, С.Л.Семёнов, К.В.Проскурина, С.А.Бабин

*Технология записи структур фемтосекундным лазерным излучением позволяет изготавливать неупорядоченные структуры, способные усиливать интенсивность обратного рэлеевского рассеяния внутри волоконного световода при относительно низких наведенных потерях, что делает актуальным их применение в качестве отражателей в волоконных лазерах. Нами представлен узкополосный эрбиевый лазер со случайной распределенной обратной связью, созданный с применением методики фемтосекундной записи, в конфигурациях с полукрытым и кольцевым резонаторами. Для схемы с полукрытым резонатором одночастотный режим генерации наблюдался до уровня выходной мощности 2.8 мВт, при этом ширина линии составила около 10 кГц. Для конфигурации, включающей кольцевой резонатор, одночастотный режим наблюдался во всем диапазоне мощности генерации. При максимальной выходной мощности 7 мВт ширина линии не превышала 0.7 кГц.*

**Ключевые слова:** одночастотный волоконный лазер, случайная распределенная обратная связь, фемтосекундная модификация показателя преломления.

## 1. Введение

В последнее время большой интерес представляют лазеры со случайной распределенной обратной связью (СРОС) на основе неупорядоченных структур. Ввиду простоты реализации данных источников мощного и узкополосного излучения их применение актуально во многих областях: от опроса датчиков [1] и удаленного зондирования [2] до нелинейного удвоения частоты [3]. Одним из примеров «случайных» лазеров являются источники излучения, в которых СРОС возникает из-за рэлеевского рассеяния света на естественных флуктуациях показателя преломления среды, а усиление – за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волоконных световодах [4]. Как правило, лазеры этого класса (СРОС-лазеры) имеют длину резонатора от сотен метров до сотен километров. Без дополнительной спектральной селекции характерная ширина линии генерации волоконного СРОС-лазера определяется контуром ВКР-усиления с учетом сужения линии до предела Шавлова–Таунса с ростом мощности и составляет 1–2 нм [4].

В лазерах на основе активных световодов также применяется рэлеевская СРОС, реализуемая за счет длинных

( $L \approx 1–10$  км) отрезков пассивного световода. Так, в работе [5] в кольцевой схеме эрбиевого лазера в качестве одного из отражателей использовался участок световода длиной 5 км, который обеспечивал обратную связь. При использовании волоконных брэгговских решеток (ВБР), изготовленных на разные резонансные длины волн, была продемонстрирована двухволновая генерация. Для каждой из длин волн наблюдался одночастотный режим с шириной линии  $\sim 1$  кГц.

Поскольку стандартные волоконные световоды имеют низкий уровень рэлеевского рассеяния, усиление распределенной обратной связи возможно за счет наведения в световоде точечных или непрерывных случайных отражателей, что позволяет значительно уменьшить длину резонатора СРОС-лазера. В коротких ВКР-лазерах ( $L \approx 0.5–10$  м) СРОС реализуется за счет введения случайных фазовых сдвигов вдоль ВБР, записанной на всей длине световода [6], либо при использовании массива ВБР, записанных через случайные интервалы [7]. В общем случае в таких лазерах может достигаться одночастотный режим ВКР-генерации в определенном диапазоне мощностей, но из-за конкуренции мод и тепловых эффектов данные излучатели, как правило, имеют плохую стабильность. В недавней работе [8] для обеспечения СРОС в кольцевой схеме эрбиевого лазера также использовался высокоотражающий ( $R = 93.5\%$ ) массив из восьми 0.75-мм ВБР со случайным расстоянием между соседними решетками в диапазоне от 2 до 8 см. Ширина линии в припороговом режиме составила 0.4 пм. Низкий порог генерации и наличие дискретных мод в спектре генерации при перестройке лазера авторы объясняют эффектом андерсоновской локализации.

Использование технологии фемтосекундной (фс) лазерной модификации показателя преломления для формирования искусственных неупорядоченных структур внутри волокна существенно снижает требования к точности их записи, по сравнению с записью периодических

М.И.Скворцов, С.Р.Абдуллина, А.А.Вольф, А.В.Достовалов, А.Е.Чурин, К.В.Проскурина. Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: qwertymikhails@gmail.com

О.Н.Егорова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

С.Л.Семёнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

С.А.Бабин. Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 26 октября 2021 г.

структур (ВБР), и позволяет на несколько порядков уменьшить длину резонатора со СРОС по сравнению с лазерами на основе рэлеевского рассеяния на естественных неоднородностях. Так, в работе [9] представлен лазер с кольцевым резонатором, где в качестве выходного случайного отражателя использовалась структура, сформированная в волокне с применением фс методики. Данная структура представляла собой набор точечных отражателей с произвольным расстоянием между соседними в интервале 10–30 мкм. Образец состоял из восьми сегментов (каждый длиной 1 см), которые, в свою очередь, содержали примерно по 500 отражателей. Для увеличения области модификации показателя преломления осуществлялось сканирование пучком фс лазера в направлении, перпендикулярном оси световода. Таким образом, вид спектра случайного отражателя был сложный из-за образования интерферометров Фабри–Перо (в результате связи мод сердцевины) и Маха–Цендера (в результате связи мод сердцевины и оболочки). В итоге многочисленные слабоотражающие спектральные фильтры обеспечивали одночастотный режим генерации. Ширина линии лазера составляла 2.1 кГц при выходной мощности 2.9 мВт.

В настоящей работе представлен узкополосный  $\text{Er}^{3+}$ -лазер со СРОС на основе неупорядоченных структур, изготовленных с применением фемтосекундной лазерной методики записи, в двух конфигурациях. Для схемы с полукрытым резонатором в качестве случайного отражателя использовался образец длиной 10 см с коэффициентом отражения  $\sim 0.004\%$ . В схему с кольцевым резонатором был включен образец с коэффициентом отражения  $\sim 0.17\%$ , содержащий восемь отражателей (длиной по 12 см), расстояние между соседними сегментами составляло около 40 см. В обеих конфигурациях достигался одночастотный режим генерации. Для конфигурации с полукрытым резонатором одночастотный режим наблюдался при выходной мощности до 2.8 мВт с шириной линии генерации 18 кГц. Для схемы с кольцевым резонатором одночастотный режим генерации наблюдался во всем диапазоне мощности излучения, а ширина линии генерации составила 0.7 кГц.

## 2. Эксперимент

Для изготовления компактных образцов с высоким уровнем рэлеевского рассеяния применялась технология фемтосекундной лазерной модификации показателя преломления [10]. С точки зрения структурных изменений в материале значительное усиление рэлеевского рассеяния в области экспозиции фс лазерного излучения обусловлено возникновением нанорешеток с типичной шириной области модификации  $\sim 10$  нм и периодом  $\sim 100$  нм [11]. Формирование нанорешеток объясняется различными механизмами: от интерференции поля фс лазерного импульса и поля электронной плазмы, образованной в результате поглощения излучения [12], до наноплазменной модели [13].

В настоящей работе мы использовали  $\text{Yb}:\text{KGW}$ -лазер (Light Conversion Pharos, 6 Вт), который генерировал импульсы излучения длительностью 232 фс с длиной волны 1026 нм и энергией  $\sim 0.3$  мкДж на входе в объектив. Частота следования импульсов составила 40 кГц. Фемтосекундное излучение фокусировалось в область сердцевины волоконного световода (Fibercore SM1500SC(9/125)P) с помощью микрообъектива (Mitutoyo 50X Plan Apo NIR

HR, NA = 0.65). В процессе записи СРОС для схемы с кольцевым резонатором волоконный световод перемещался с помощью линейного позиционера (Aerotech ABL1000) с постоянной скоростью 0.2 мм/с.

При таких условиях записи плотность импульсов составляла 200 имп./мкм, что приводило к модификации показателя преломления и образованию дефектов, усиливающих рэлеевское рассеяние. Контроль уровня рэлеевского рассеяния осуществлялся с помощью высокоразрешающего рефлектометра обратного рассеяния LUNA OBR4600. Общая длина записанного образца из восьми отражателей (длина каждого 12 см) составила около 4 м. Расстояние между соседними участками варьировалось в диапазоне от 40 до 50 см, а мощность наведенного обратного рассеяния составляла  $\sim 50$  дБ/мм относительно мощности естественного рассеяния волокна Fibercore SM1500SC(9/125)P для различных отражателей (рис.1,а). Суммарный коэффициент отражения структуры составил 0.17% (рис.1,б), что соответствует естественному отражению волокна SM1500SC(9/125)P длиной 20 км.

Важной особенностью изготовленного образца является низкий уровень наведенных потерь, который не превышал 15% для каждого из отражателей, что было достигнуто путем оптимизации скорости движения образца, а также частоты и энергии фс лазерных импульсов. Для схемы с полукрытым резонатором был изготовлен отражатель, аналогичный одному из отражателей в описанной выше цепочке, но в волокне SMF-28 длиной 10 см; мощность наведенного обратного рассеяния составила около 40 дБ/мм, коэффициент отражения – примерно 0.004%, потери также не превышали 15%.

В качестве активной среды использовалось волокно, изготовленное в Научном центре волоконной оптики (НЦВО РАН). Световод был изготовлен путем спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла и последующей вытяжки. Диаметр сердцевины и оболочки составил приблизительно 4.5 и 125 мкм соответственно. Более подробно процесс изготовления световода пред-

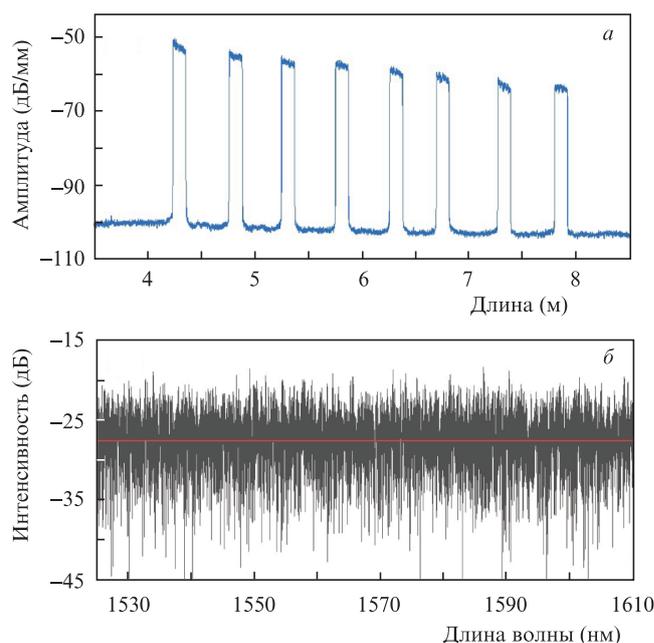


Рис.1. Рефлектограмма (а) и спектр отражения в диапазоне 1520–1610 нм (б) образца со СРОС, измеренные с помощью рефлектометра LUNA OBR4600.

ставлен в работе [14]. Для изготовления сердцевинки использовалось стекло, состав которого приведен в работах [15, 16]. Кроме 65 мол. % оксида фосфора, стекло содержало 7 мол. %  $Al_2O_3$ , 12 мол. %  $V_2O_5$ , 9 мол. %  $Li_2O$  и 7 мол. %  $RE_2O_3$  [17]. Концентрация ионов эрбия была равна  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (1.1 вес. % или 0.39 мол. % оксида эрбия). Данное стекло содержало также гадолиний, суммарная концентрация редкоземельных ионов при этом составляла около 7 мол. %. Стоит отметить, что добавление оксида алюминия снижает вероятность кластеризации, что приводит к непрерывному режиму генерации даже при высокой концентрации ионов эрбия. Коэффициент поглощения на длинах волн 980 и 1535 нм составляет 0.4 и 1.4 дБ/см соответственно. Потери на длине волны 1300 нм равны 1 дБ/м и определяются по большей части степенью загрязнения фосфатного стекла при варке. Коэффициент усиления для слабого сигнала на длине волны 1535 нм составляет 0.4 дБ/см.

Были исследованы две конфигурации резонатора. Схема 1 представляла собой полуоткрытый резонатор, который был сформирован с использованием высокоотражающей ВБР с резонансной длиной волны 1535 нм, коэффициентом отражения 90% и шириной спектра отражения ~65 пм. В качестве выходного зеркала применялась

СРОС-структура длиной 10 см. Для минимизации потерь выходной конец волокна накачки (длина волны 980 нм, выходная мощность ~400 мВт) приваривался напрямую к резонатору. Длина активного волокна для обеих схем составила 40 см (рис.2). В схеме 2, где длинная СРОС-структура (рис.1,а) была включена в схему с кольцевым резонатором через циркулятор (как показано на рис.2), кроме волоконного усилителя также был применен полупроводниковый оптический усилитель, обеспечивающий широкополосное усиление. Отраженный от СРОС сигнал усиливался полупроводниковым оптическим усилителем с коэффициентом ~16 дБ на длине волны 1535 нм. ВБР с резонансной длиной волны 1536.5 нм, коэффициентом отражения 90% и спектральной шириной 80 пм обеспечивала спектральную фильтрацию. Для предотвращения нежелательной обратной связи на выходы экспериментальных схем были помещены изоляторы.

Выходное излучение с помощью делителя разветвлялось на два канала. Спектральные характеристики и выходная мощность измерялись анализатором оптических спектров (АОС) Yokogawa AQ6370 со спектральным разрешением 20 пм. Анализ модового состава выходного излучения проводился с помощью фотодиода Thorlabs DET08CFC (5 ГГц) и радиочастотного (РЧ) анализатора

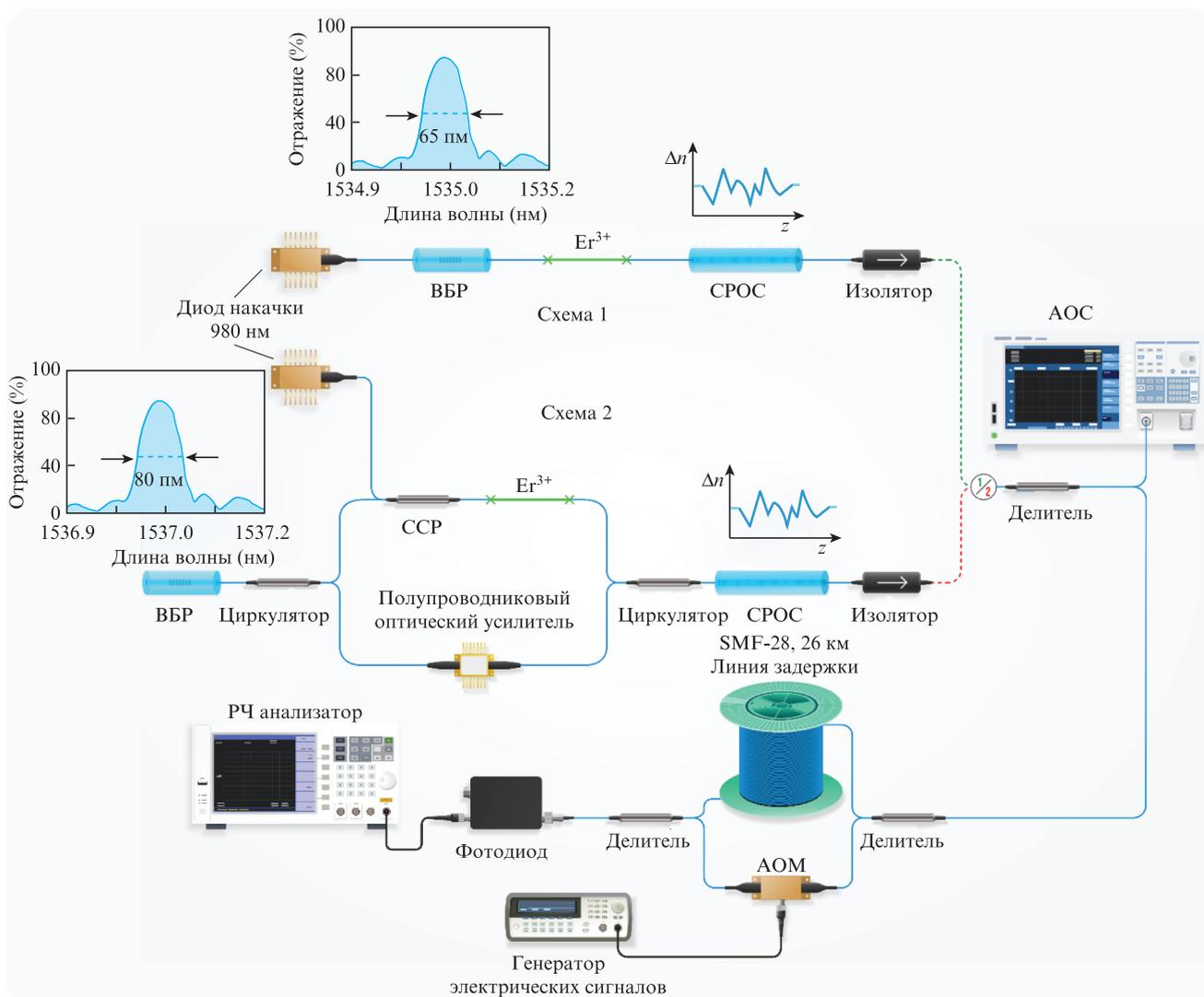


Рис.2. Схемы резонатора, используемые в эксперименте: схема 1 – конфигурация СРОС-лазера с полуоткрытым резонатором; схема 2 – конфигурация СРОС-лазера с кольцевым резонатором и сопутствующим измерительным оборудованием.

Agilent N9010A. Для измерения ширины линии генерации с высокой точностью применялся метод самогеродирования [18]. Одно плечо интерферометра Маха–Цендера включало в себя линию задержки длиной 25 км, второе – акустооптический модулятор (АОМ), управляемый генератором сигналов Agilent 33250A. Спектр сигнала биений при измерении ширины линии также был получен с помощью радиочастотного анализатора спектров.

На рис.3,*а* представлены зависимости мощности выходного излучения от мощности излучения накачки. Порог генерации достигался при мощности накачки 125

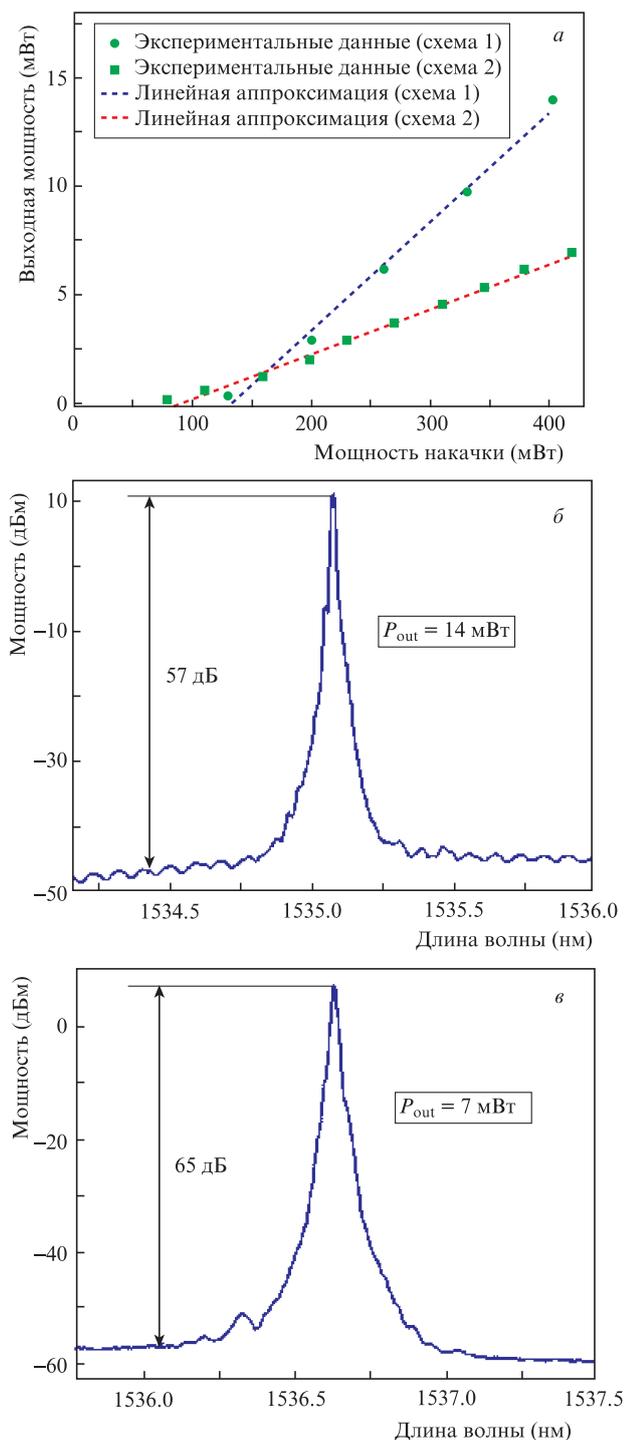


Рис.3. Зависимости выходной мощности от мощности накачки (*а*), оптические спектры генерации при максимальных выходных мощностях для схем 1 (*б*) и 2 (*в*).

и 80 мВт для схем 1 и 2 соответственно. Различие в пороговых значениях мощности накачки обусловлено различными добротностями резонаторов. При максимальной мощности накачки ~400 мВт выходная мощность для схемы 1 составила 14 мВт, а для схемы 2 – 7 мВт. На рис.3,*б* и *в* показаны оптические спектры генерации при максимальных выходных мощностях: отношение сигнала к шуму составило 65 дБ для конфигурации с кольцевым резонатором и 57 дБ для полукрытого резонатора. Ширины спектров генерации в обоих случаях соответствовали аппаратной функции АОС и не превышали 20 пм.

Для различных значений выходных мощностей был измерен частотный состав излучения. Для схемы 1 (рис.4,*а*) до уровня мощности 2.8 мВт наблюдается одночастотный режим, а при достижении выходной мощности 3 мВт появляется межмодовое биение на частоте 240 МГц, что соответствует спектральной ширине ~1.8 пм. Для схемы 2 во всем диапазоне генерации в радиочастотном спектре отсутствовали биения продольных мод (рис.4,*б*), что соответствует одночастотному режиму.

Относительный шум интенсивности для конфигурации с полукрытым резонатором составил 88 дБ/Гц на частоте 0.76 МГц, а для схемы с кольцевым резонатором – 105 дБ/Гц на частоте 0.4 МГц (рис.5,*а, б*). На вставках к рис.5 представлены радиочастотные спектры биений: ширина линии на уровне -20 дБ составила 360 кГц, что соответствует 18 кГц на полувысоте, для схемы 1, и 14 кГц –

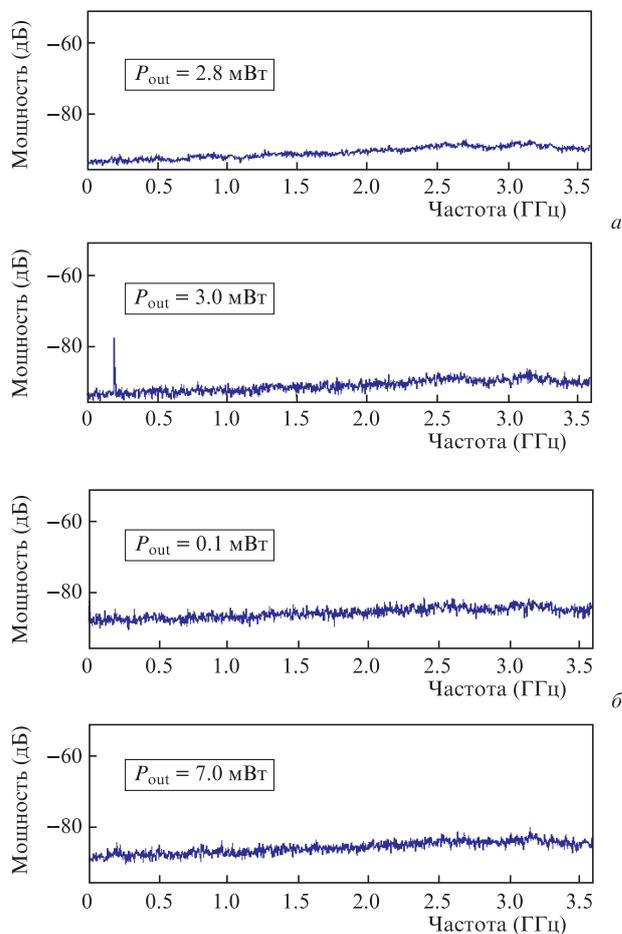


Рис.4. Радиочастотные спектры генерации для схемы 1 при выходных мощностях 2.8 и 3 мВт (*а*) и для схемы 2 при пороге генерации и максимальной выходной мощности (*б*).

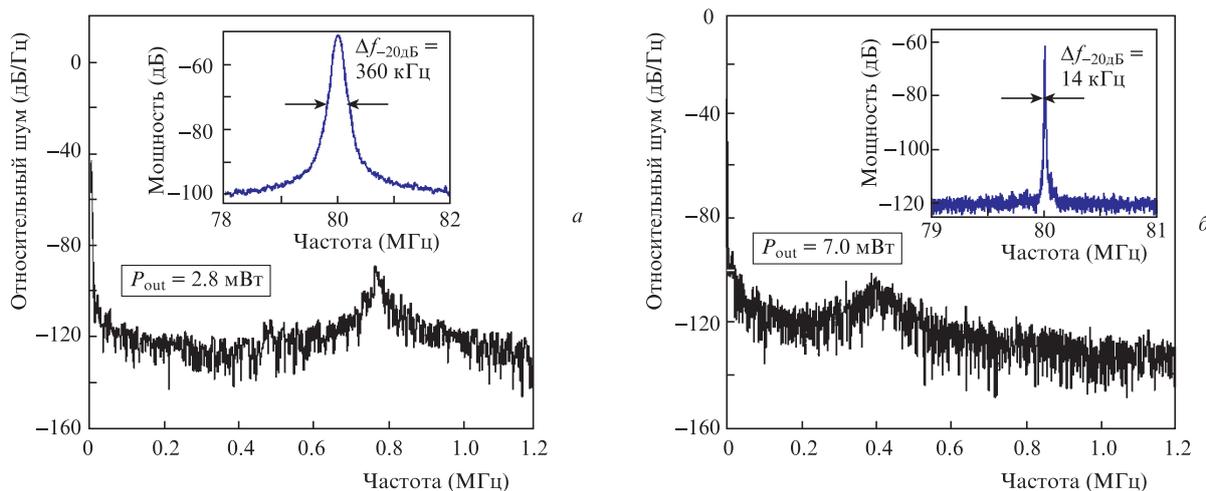


Рис.5. Относительные шумы интенсивности для схем 1 (а) и 2 (б). На вставках – радиочастотные спектры биений.

для схемы 2 (ширина линии генерации на полувысоте примерно равна 0.7 кГц). Из полученных данных для схемы 2 следует, что спектральные характеристики СРОС-лазера в этой конфигурации не уступают характеристикам волоконных лазеров с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) на основе ВБР с фазовым сдвигом [19, 20]. При этом по мощностным характеристикам представленный лазер превосходит эрбиевые РОС-лазеры на порядок, т.к. характерные мощности для них составляют  $\sim 100$  мкВт.

### 3. Заключение

Применение методики фс лазерной модификации показателя преломления позволяет формировать внутри волоконного световода искусственные неупорядоченные структуры, обладающие высоким уровнем наведенного обратного рассеяния. Требования к формированию подобных отражателей заметно упрощаются по сравнению с записью ВБР, а длина структуры на несколько порядков меньше длины отражателей на основе естественного рэлеевского рассеяния. Применение такого типа СРОС в схеме эрбиевого лазера позволило реализовать одночастотный режим генерации в двух конфигурациях. Для схемы с полукрытым резонатором одночастотный режим генерации наблюдался при выходной мощности до 2.8 мВт. При этом относительный шум интенсивности составлял  $-88$  дБ/Гц на частоте 0.76 МГц, а ширина линии генерации – 18 кГц. Для конфигурации лазера с кольцевым резонатором во всем диапазоне мощности излучения наблюдался одночастотный режим генерации. Выходная мощность составила примерно 7 мВт при максимальной мощности излучения накачки  $\sim 400$  мВт, отношение сигнал/шум – около 65 дБ. Ширина линии генерации составила 0.7 кГц, относительный шум интенсивности на частоте 400 кГц равен  $-105$  дБ/Гц. Таким образом, спектральные характеристики реализованных СРОС-лазеров сопоставимы с характеристиками эрбиевых РОС-лазеров [19, 20], а мощностные характеристики превосходят на порядок. При этом схема эксперимента значительно упрощается.

Авторы выражают благодарность Е.Голикову и Ж.Мункуевой (ИАиЭ СО РАН) за техническую поддержку при изготовлении распределенных отражателей.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» ИАиЭ СО РАН (Новосибирск) и при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-72-30024).

1. Wang Z.N., Rao Y.J., Wu H., Li P.Y., Jiang Y., Jia X.H., Zhang W.L. *Opt. Express*, **20**, 17695 (2012).
2. Wiersma D.S., Cavalieri S. *Nature*, **414**, 708 (2001).
3. Dontsova E.I., Kablukov S.I., Vatnik I.D., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **41**, 1439 (2016).
4. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E., et al. *Nat. Photonics*, **4**, 231 (2010).
5. Xu Y., Zhang L., Chen L., Bao X. *Opt. Express*, **25**, 15828 (2017).
6. Gagné M., Kashyap R. *Opt. Lett.*, **39**, 2755 (2014).
7. Abdullina S.R., Skvortsov M.I., Vlasov A.A., Podivilov E.V., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **16**, 105001 (2019).
8. Deng J., Han M., Xu Z., Du Y., Shu X. *Opt. Express*, **27**, 12987 (2019).
9. Li Y., Lu P., Baset F., Ou Z., Song J., Alshehri A., Bhardwaj V.R., Bao X. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 101105 (2014).
10. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
11. Yan A., Huang S., Li S., Chen R., Ohodnicki P., Buric M., Lee S., Li M.-J., Chen K.P. *Sci. Rep.*, **7**, 9360 (2017).
12. Shimotsuma Y., Kazansky P.G., Qiu J., Hirao K. *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 247405 (2003).
13. Taylor R., Hnatovsky C., Simova E. *Laser Photon. Rev.*, **2**, 26 (2008).
14. Rybaltovskiy A.A., Egorova O.N., Zhuravlev S.G., Galagan B., Sverchkov S.E., Denker B.I., Semjonov S.L. *Opt. Lett.*, **44**, 3518 (2019).
15. Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Y.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. *Opt. Express*, **22**, 7632 (2014).
16. Egorova O.N., Semjonov S.L., Medvedkov O.I., Astapovich M.S., Okhrimchuk A.G., Galagan B.I., Denker B.I., Sverchkov S.E., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 3762 (2015).
17. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **75**, 41 (2002).
18. Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A. *Electron. Lett.*, **16**, 630 (1980).
19. Skvortsov M.I., Wolf A.A., Vlasov A.A., Proskurina K.V., Dostovalov A.V., Egorova O.N., Galagan B.I., Sverchkov S.E., Denker B.I., Semjonov S.L., Babin S.A. *Sci. Rep.*, **10**, 14487 (2020).
20. Skvortsov M.I., Wolf A.A., Dostovalov A.V., Vlasov A.A., Akulov V.A., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **15**, 35103 (2018).