

Скворцов Михаил Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА  
ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНОЙ И СЛУЧАЙНОЙ  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА  
СТРУКТУРАХ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ  
ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ПОТОЧЕЧНОЙ ЗАПИСИ**

Специальность 1.3.6 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2024

*Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.*

Научный руководитель:

**Бабин Сергей Алексеевич**, доктор физико-математических наук, член корреспондент РАН, директор ИАиЭ СО РАН

Официальные оппоненты:

**Наний Олег Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**Трикшев Антон Игоревич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится « » \_\_\_\_\_ 202\_ г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Институте автоматизации и электрометрии СО РАН, расположенном по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

*Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
Д.ф.-м.н., проф.*

*Ильичев Л. В.*

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Улучшенные выходные характеристики, такие как высокая дифференциальная эффективность, точный выбор длины волны излучения, узкая линия генерации, низкий уровень фазовых шумов, делают одночастотные волоконные лазеры привлекательными для широкого спектра приложений: когерентная оптическая связь, высокоточное оптическое зондирование, оптическая метрология, спектроскопия и интерферометрия [1–5]. Кроме того, данные излучатели также могут быть использованы для реализации высокоомощных лазеров посредством каскадного усиления [6] или многоканального когерентного объединения пучков, усиленное излучение может использоваться для генерации второй гармоники [7]. Также существует интерес к сужению линии генерации и подавлению фазового шума одночастотных волоконных лазеров, обусловленный применением данного излучателя в метрологических приложениях и когерентной рефлектометрии [8]. Пожалуй, наиболее часто применяемой конфигурацией волоконного одночастотного лазера является схема с распределенной обратной связью (РОС-лазер), в англоязычной литературе distributed-feedback laser (DFB laser). Его резонатор формирует волоконная брэгговская решетка (ВБР) с фазовым сдвигом, изготовленная в активном одномодовом световоде, в котором распространяется одна поперечная мода. Фазовый сдвиг на полпериода ВБР обеспечивает селекцию единственной продольной моды, т. е. реализуется одночастотная генерация. Традиционная методика по реализации фазового сдвига заключается в дополнительной засветке УФ-излучением в центральной области ВБР. Можно сказать, что при точечном повышении показателя преломления образуются две решетки, не совпадающие по фазе друг с другом, и фактически образуется интерферометр Фабри-Перо с малой базой, в том числе геометрически определяемой областью засветки. Ввиду особенностей вытяжки волокна и самой методики изготовления резонатора в спектре генерации могут присутствовать две поляризационные моды, что продемонстрировано в работах [9,10]. При этом длина самой структуры составляет несколько сантиметров, что затрудняет использование такого резонатора в сенсорных приложениях.

Развитие методики фемтосекундой (фс) поточечной записи [11,12] позволяет создавать ВБР с уникальными характеристиками: изготовление возможно даже в нефоточувствительном волокне и в широком диапазоне длин волн без дополнительных компонент в виде фазовых масок; возможна реализация различных функций аподизации (изменение среднего значения наведенного показателя преломления в зависимости от координаты), чирпирования (изменение величины периода в зависимости от координаты), количества и параметров фазовых сдвигов внутри структуры. При данном методе записи

наведенная величина двулучепреломления на порядок превышает значение остаточного двулучепреломления в волокне [13]. Возможности записи ВБР методом фемтосекундной поточечной записи, в т.ч. с фазовым сдвигом, представлены в диссертации А.А. Вольфа [14], однако исследование характеристик РОС-лазеров с такими решетками и их сравнение с традиционными не проводилось.

**Целью** работы является исследование возможности улучшения характеристик эрбиевого РОС-лазера за счет применения поточечной фс методики записи для формирования регулярных структур показателя преломления типа ВБР с фазовым сдвигом, а также случайных структур показателя преломления для формирования случайной РОС (СРОС). В частности, большой интерес представляет получение генерации единственной поляризационной моды на основе регулярной ВБР с фазовым сдвигом, записанной фс импульсами, минимизация геометрических размеров такого резонатора, применение случайных структур, изготовленных с использованием поточечной фс методики записи, для уменьшения ширины линии и получения одночастотной генерации, перестраиваемой по спектру, как альтернатива РОС-лазеру. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Расчет параметров резонатора РОС-лазера с селекцией одной поляризационной моды (без физического воздействия на резонатор) для генерации одночастотного излучения на основе коммерчески доступного эрбиевого волоконного световода.
2. Реализация эрбиевого РОС-лазера на основе ВБР с фазовым сдвигом, изготовленной с применением фс методики записи, исследование его мощностных и спектральных характеристик: дифференциальной эффективности, отношения сигнал/шум, относительного шума интенсивности, ширины линии генерации.
3. Поиск подходящего эрбиевого волоконного световода и реализация РОС-лазера на основе ВБР с фазовым сдвигом, изготовленной с применением поточечной фс методики записи в данном световоде, имеющей минимальную длину резонатора. Исследование его мощностных и спектральных характеристик: дифференциальной эффективности, отношения сигнал/шум, относительного шум интенсивности, ширины линии генерации.
4. Оценка возможности сужения ширины линии генерации РОС-лазера в конфигурации с дополнительной случайной РОС (СРОС) за счет рэлеевского рассеяния в многокилометровой катушке одномодового волоконного световода. Экспериментальное исследование эффекта сужения линии и сравнение значений мгновенной ширины для конфигураций РОС-лазера и гибридной схемы, включающей СРОС. Сравнение СРОС от

катушки одномодового волокна и от искусственной случайной структуры, записанной поточечной фс методикой в отрезке волокна.

5. Реализация одночастотного лазера в схеме с кольцевым и линейным резонатором со СРОС на случайных структурах, изготовленных с помощью поточечной фс методики записи, исследование его мощностных и спектральных характеристик: дифференциальной эффективности, отношения сигнал/шум, относительного шума интенсивности, ширины линии генерации, а также возможностей перестройки частоты генерации.

### **Научная новизна**

Впервые реализован и исследован волоконный РОС-лазер на основе ВБР с фазовым сдвигом в качестве резонатора, изготовленной с применением фс поточечной методики, генерирующий единственную поляризационную моду без физического воздействия на него (скручивания). Длина структуры составила 32 мм, выходная мощность одночастотного излучения на длине волны генерации 1550 нм соответствовала 700 мкВт при мощности накачки 525 мВт на длине волны 980 нм. Ширина линии генерации, измеренная на временах  $\sim 100$  мксек, равнялась 17 кГц.

Реализован волоконный РОС-лазер с рекордно короткой длиной резонатора (5,3 мм), изготовленного с применением фс поточечной методики в высоколегированном композитном эрбиевом световоде. Спектральные и мощностные характеристики соответствовали аналогичным параметрам для РОС-лазера с типичной длиной резонатора в несколько сантиметров.

Предложен и экспериментально реализован метод сужения мгновенной ширины линии генерации РОС-лазера до субгерцовых значений с применением дополнительной СРОС за счет рэлеевского рассеяния в многокилометровой катушке одномодового волоконного световода. Продемонстрирована возможность сужения линии с использованием СРОС за счет искусственной случайной структуры, записанной поточечной фс методикой.

Реализован узкополосный эрбиевый лазер с полуоткрытым резонатором, где в качестве слабоотражающего распределенного зеркала впервые использовалась СРОС на основе 10-см искусственной случайной рэлеевской структуры, изготовленной с помощью поточечной фс методики формирования искусственных неупорядоченных структур внутри волоконного световода и имеющей высокий уровень наведенного обратного рассеяния: порядка +40 дБ/мм относительно естественного уровня рэлеевского рассеяния волокна SMF-28. В данной конфигурации реализован одночастотный режим генерации с шириной линии  $\sim 10$  кГц и выходной мощностью до  $\sim 3$  мВт. При более высоких мощностях (до 100

мВт) продемонстрирована маломодовая генерация с узкой линией ( $\leq 3.3$  пм). В совокупности с механическим растяжением ВБР для данной схемы получена перестройка длины волны узкополосной генерации в диапазоне 1533,4–1545 нм.

Реализован одночастотный эрбиевый лазер в кольцевой конфигурации, где в резонатор была включена СРОС на основе искусственной случайной рэлеевской структуры, которая состояла из 8 отражателей длиной 12 см каждый. Для данного лазера был получен одночастотный режим во всем диапазоне генерации при максимальной выходной мощности 7,8 мВт на длине волны излучения 1535 нм, ширина линии, измеренная на временах  $\sim 100$  мксек, не превышала 750 Гц.

### **Практическая значимость**

Результаты работы могут быть использованы для создания одночастотного лазера на основе распределенной обратной связи с селекцией поляризационных мод, что имеет особое значение для генерации второй гармоники. Субгерцовый источник излучения на основе гибридной схемы, состоящей из РОС-лазера и СРОС, перспективен для применения в когерентной рефлектометрии. Одночастотные лазеры на основе случайной распределенной обратной связи, имеющие характеристики, аналогичные характеристикам РОС-лазера, также могут быть применены в таких областях как телекоммуникация, генерация второй гармоники, спектроскопия, сенсорные применения и др. При этом использование фс методики записи регулярных и случайных структур показателя преломления позволяет создать одночастотные лазеры с улучшенными характеристиками в компактном исполнении [15].

### **Защищаемые положения:**

1. Резонатор волоконного лазера с распределенной обратной связью на основе ВБР с фазовым сдвигом, изготовленной с применением поточечной фс методики записи в активном световоде, не сохраняющем поляризацию, позволяет генерировать единственную поляризационную моду.
2. Эрбиевый РОС-лазер с ультракоротким резонатором, изготовленным с применением поточечной фс методики записи в высоколегированном композитном световоде, демонстрирует мощностные и спектральные характеристики, сопоставимые с аналогичными характеристиками РОС-лазера, имеющего физическую длину на порядок больше.
3. Сужение мгновенной ширины линии генерации гибридного РОС-лазера с дополнительной случайной РОС за счет рэлеевского рассеяния в катушке одномодового

световода пропорционально квадрату отношения ее длины к эффективной длине резонатора РОС-лазера. Сужение линии можно также получить с использованием СРОС на искусственной случайной структуре, записанной поточечной фс методикой в относительно коротком отрезке волокна.

4. Использование СРОС на случайной структуре, реализованной с помощью поточечной фс методики записи, совместно с узкополосной ВБР в конфигурации с полуоткрытым резонатором позволяет достичь спектральных характеристик, сопоставимых со спектральными характеристиками РОС-лазеров, а мощностные значения в данной конфигурации значительно превосходят аналогичные параметры РОС-лазеров. При этом физическое воздействие на ВБР (сжатие/растяжение) позволяет производить перестройку узкой линии генерации в широком спектральном диапазоне.

5. Применение СРОС на случайной структуре и узкополосной ВБР в кольцевой (многопроходной) схеме обеспечивает одночастотный режим генерации во всём диапазоне мощности накачки. Спектральные характеристики соответствуют аналогичным параметрам РОС-лазера, а мощностные – на порядок больше.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались автором лично на Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, 2018, 2020 и 2022 гг.), Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь, 2021 и 2023 гг.), Международной конференции International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2018 и 2022 гг.), Международной конференции OSA Advanced Photonics Congress (Вашингтон, США, онлайн, 2020 г.), 29-ом Международном семинаре по лазерной физике LPHYS 2021 (онлайн, 2021 г.).

**Личный вклад.** Основные экспериментальные результаты, представленные в работе, были получены автором лично или при непосредственном участии. Автор был вовлечен на всех этапах: от постановки задачи до сборки экспериментальных схем, обработки и анализа данных и их дальнейшей подготовки для научных публикаций.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных работах, 8 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 4 в первом квартале (Q1) и 2 во втором (Q2) базы WoS, 9 – в сборниках трудов конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, благодарностей, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 139 страниц, включая 65 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 163 наименования.

## Содержание работы

**Во введении** описывается область исследований, обосновывается актуальность работы, определяются цель и задачи, представлена научная новизна исследований и их практическая значимость. Приводится основное содержание по главам, данные о публикациях по теме диссертационной работы, формулируются защищаемые положения.

**В первой главе** (методической) рассматриваются теоретические и экспериментальные основы РОС-лазера с резонатором на основе волоконной брэгговской решётки с фазовым сдвигом. Приводятся упрощенные выражения для характеристик структуры: спектральная ширина, коэффициенты отражения/пропускания. Также кратко описана методика, основанная на теории связанных мод, для моделирования оптического спектра резонатора. Обсуждаются физические основы процессов, протекающих при поглощении фс импульсов в объеме прозрачного материала. Представлена методика по изготовлению резонаторов с применением фс поточечной записи, в сравнении с голографической методикой с использованием ультрафиолетового источника. Представлена обобщенная схема РОС-лазера на основе ВБР с фазовым сдвигом. Приведено описание методик измерения спектральных и мощностных параметров излучателя.

**Вторая глава** посвящена исследованию характеристик эрбиевых РОС-лазеров на основе резонатора изготовленного с применением фс поточечной методики записи (схематично представлен на рис.1.(а)). В качестве активного эрбиевого волокна использовался коммерчески доступный световод марки CoreActive модель EDF-L1500, в котором была записана структура (ВБР с  $\pi$ -сдвигом) с физической длиной 32 мм. На рис. 1(б) показаны спектры пропускания ВБР, измеренные для ортогональных поляризаций. Непрерывными линиями обозначены экспериментальные значения, а пунктирными линиями представлены результаты численного моделирования. Для расчета использовалась методика [16], реализующая решение уравнений связанных мод. Наведенное двулучепреломление для структуры ВБР, изготовленной с помощью фс методики, связано с эллиптической формой области модификации показателя преломления [17]. Таким образом, наведенный показатель преломления для каждой поляризационной составляющей разный, соответственно, и плотности резонаторов будут разными, как показано на рис.1 (б).

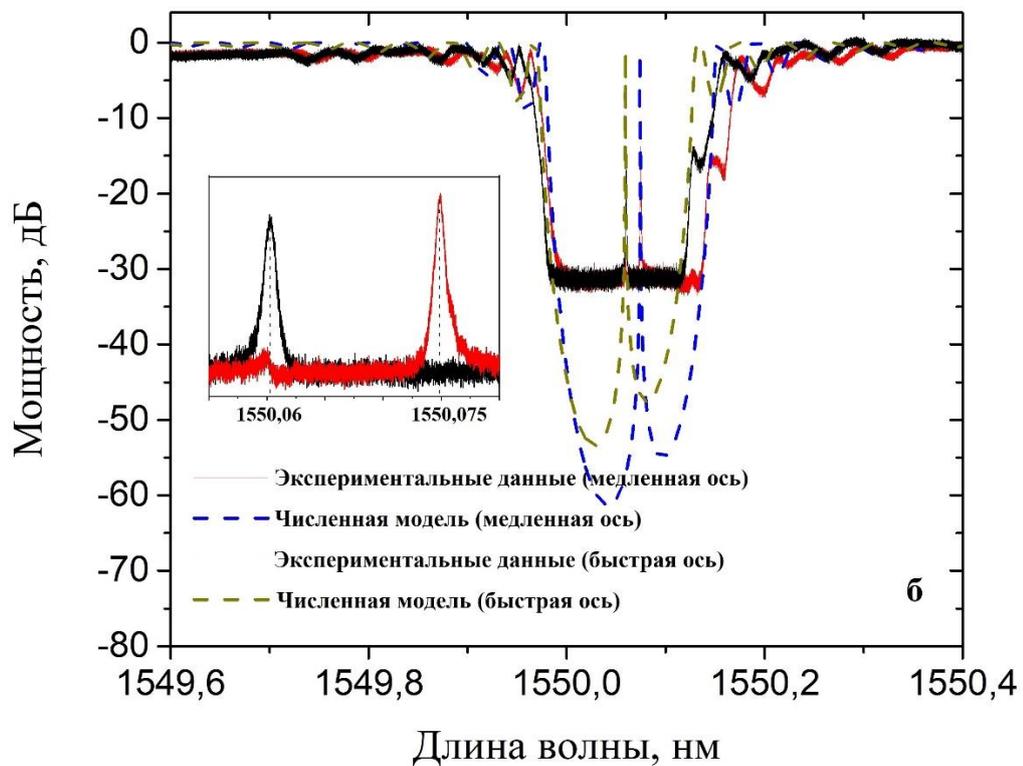
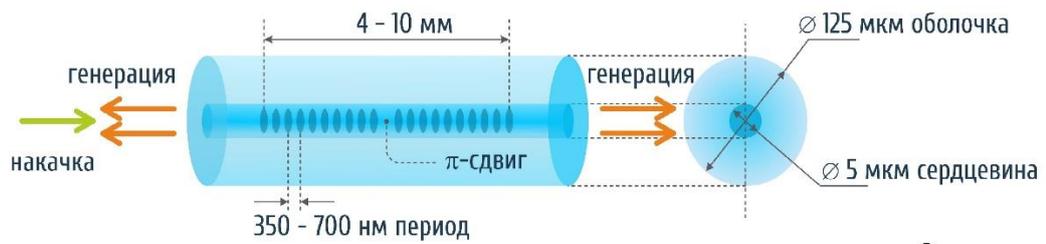


Рис.1. (а) Схема резонатора волоконного лазера с распределенной обратной связью (б) Спектр пропускания  $\pi$ -ВБР в ортогональных поляризациях (с увеличением в области  $\pi$ -сдвига). Непрерывными линиями обозначены экспериментальные значения, пунктирными линиями представлено численное моделирование.

На пороге генерации должно выполняться условие, в котором усиление эквивалентно потерям в резонаторе [10]:

$$g \approx 4\kappa_{\text{быстр.,медл.}} \exp(-\kappa_{\text{быстр.,медл.}} L) + \alpha, \quad (1)$$

где  $g$  – коэффициент усиления малого сигнала в пределах большой мощности накачки,  $\kappa_{\text{быстр.,медл.}}$  – коэффициент связи мод для разных поляризационных составляющих структуры резонатора,  $L$  – физическая длина резонатора. Первый член в правой части равенства отвечает за плотность потерь на структуре (на единицу длины), второй – связан с рассеянием Ми на ней же и фоновыми потерями в самом световоде из-за примесей. С учетом параметров изготовления резонатора и особенностей световода, принимая во внимание формулу (1), минимальная длина резонатора, при которой возможна генерация излучения, соответствующая медленной и быстрой поляризационной оси, составляет 29,1 мм и 32,8 мм. Таким образом, условие генерации для быстрой поляризационной

компоненты не достижимо и во всем диапазоне мощности накачки должна генерироваться одна (медленная) поляризационная мода. Для проверки одночастотной генерации была собрана экспериментальная схема РОС-лазера на основе данного резонатора, а также стенд для характеристики излучения (Рис.2). На рис. 3(а) представлен радиочастотный спектр (РЧ) излучения при максимальной выходной мощности генерации. Разница центральных длин волн для резонатора в ортогональных поляризациях составляет  $\Delta\lambda \approx 14,9$  пм (рис. 1), что соответствует разностной частоте биения  $\Delta\nu \approx 1,86$  ГГц для заданной длины волны генерации. Отсутствие пика биения на данной частоте свидетельствует об одночастотном режиме генерации.

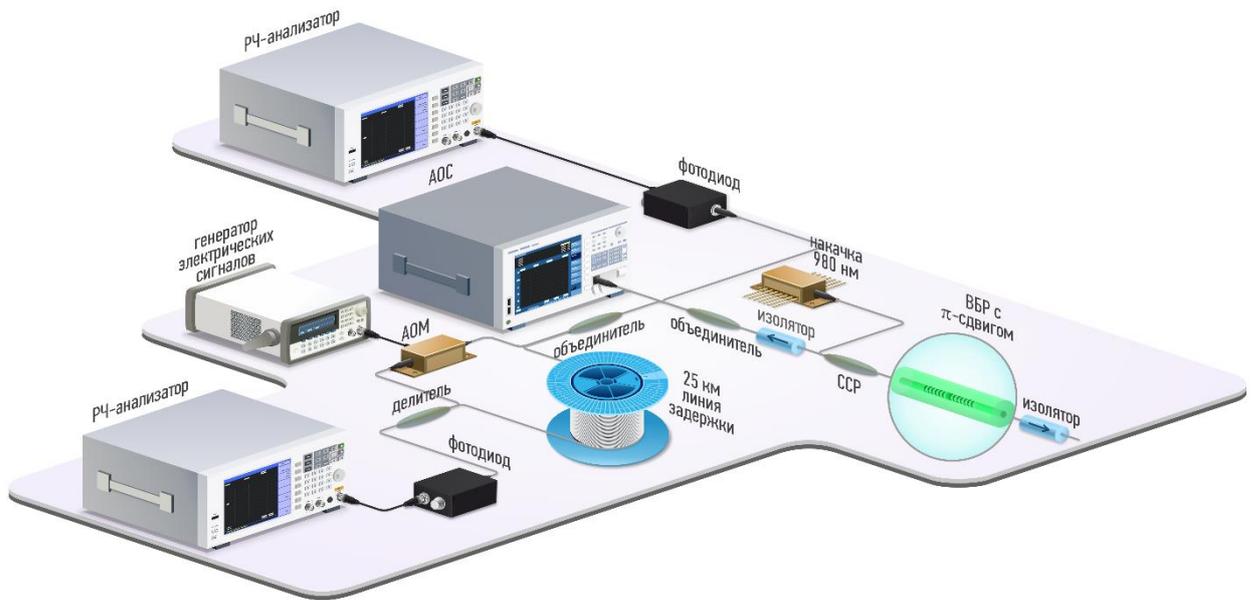


Рис.2. Схема РОС-лазера и сопутствующего измерительного оборудования.

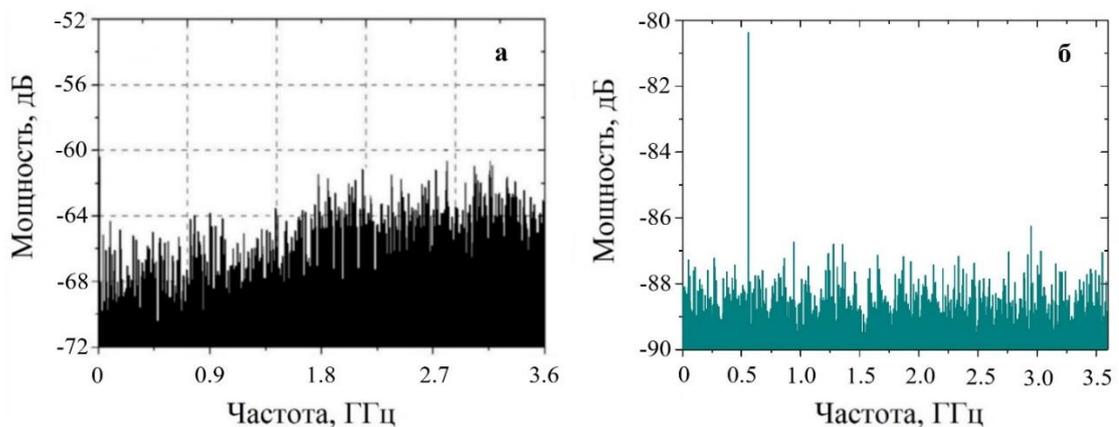


Рис.3.(а) Радиочастотный спектр РОС-лазера на основе резонатора, изготовленного с применением поточечной фс методики, при максимальной выходной мощности. (б) Радиочастотный спектр РОС-лазера на основе резонатора, изготовленного с применением голографической методики и непрерывного ультрафиолетового излучения, при максимальной выходной мощности.

Данный РОС-лазер с резонатором, изготовленным с помощью фс методики, обладает идентичными мощностными и спектральными характеристиками, что и РОС-лазер с резонатором, изготовленным с применением УФ-методики [18], кроме поляризационной моды. Для сравнения на рис.3(б) представлен частотный состав излучения РОС-лазера, резонатор которого имел физическую длину 32 мм и был изготовлен с применением голографической методики записи и УФ-излучения с длиной волны 244 нм. В качестве активного волокна использовался также световод марки CoreActive EDF-L1500. На РЧ спектре излучения, рис.3(б), наблюдался пик биения поляризационных мод на частоте 560 МГц. Таким образом, значение двулучепреломления структуры резонатора ограничено собственной величиной двулучепреломления световода и составляет  $7,5 \cdot 10^{-6}$ . Поточечная фс методика позволяет нивелировать данный эффект, где большая площадь области модификации показателя преломления, имеющая эллиптическую форму, находится внутри сердцевины световода, что сказывается на различии в добротности резонатора для разных поляризационных компонент.

Во втором разделе продемонстрирован РОС-лазер с рекордно коротким резонатором с физической длиной 5,3 мм (рис.4(а)), записанным фс поточечным методом в высоколегированном композитном световоде производства Научного центра волоконной оптики (НЦВО) РАН. Также с помощью поточечной фс методики записи был реализован первый  $\text{No}^{3+}$  РОС-лазер с длиной волны 2,07 мкм, длина резонатора составила 42 мм.

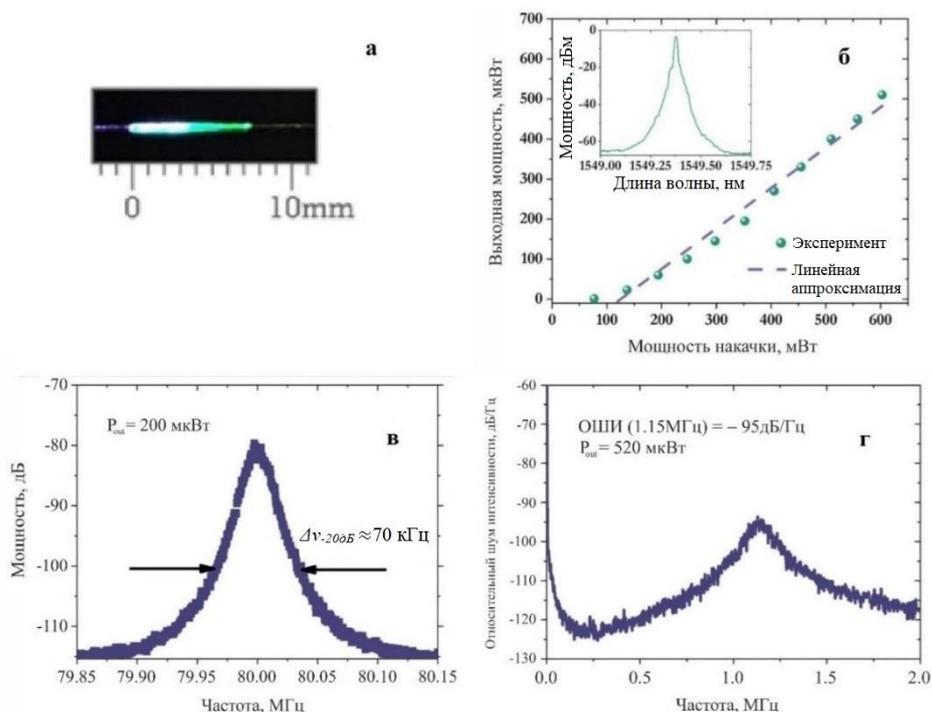


Рис.4. (а) Фотография резонатора РОС-лазера в процессе накачки. (б) Зависимость выходной мощности излучения от мощности накачки, вставка: спектр генерации при максимальной мощности излучения.

(в) Радиочастотный спектр сигнала биений, полученный с применением методики самогетеродинирования. (г) Относительный шум интенсивности при максимальной выходной мощности.

В ходе характеристики ультракороткого эрбиевого лазера отмечено, что полученные параметры (рис.4) не уступают аналогичным для РОС-лазеров с длиной резонатора на порядок больше: дифференциальная эффективность составила  $\approx 0,1\%$ , ширина линии генерации не превышала 3,5 кГц на временах  $\sim 100$  мксек, отношение сигнал/шум соответствовало 60 дБ, пик относительного шума интенсивности находился на уровне -95 дБ/Гц при частоте в 1,15 МГц.

**В третьей главе** дана теоретическая оценка мгновенной ширины линии (на временах порядка единиц микросекунд) для генерации в гибридной конфигурации, где к свободному концу резонатора РОС-лазера была приварена катушка (25 км) одномодового волокна SMF-28, в которой возникает СРОС за счет рэлеевского рассеяния (рис.5, 6).

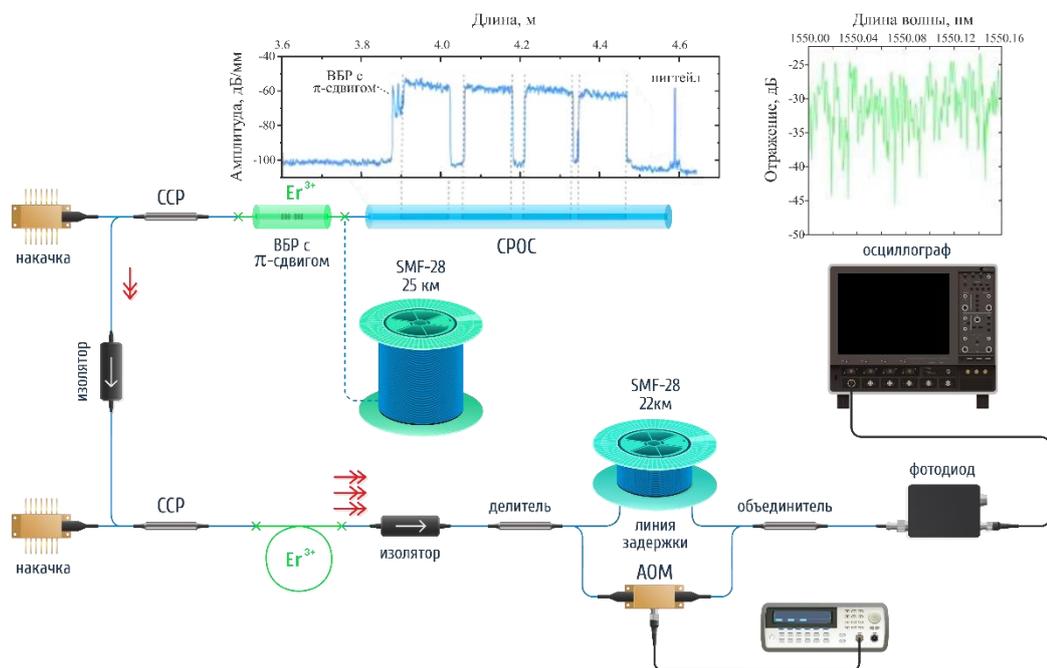


Рис. 5. Экспериментальная схема эрбиевого лазера с составным резонатором и измерительным стендом.

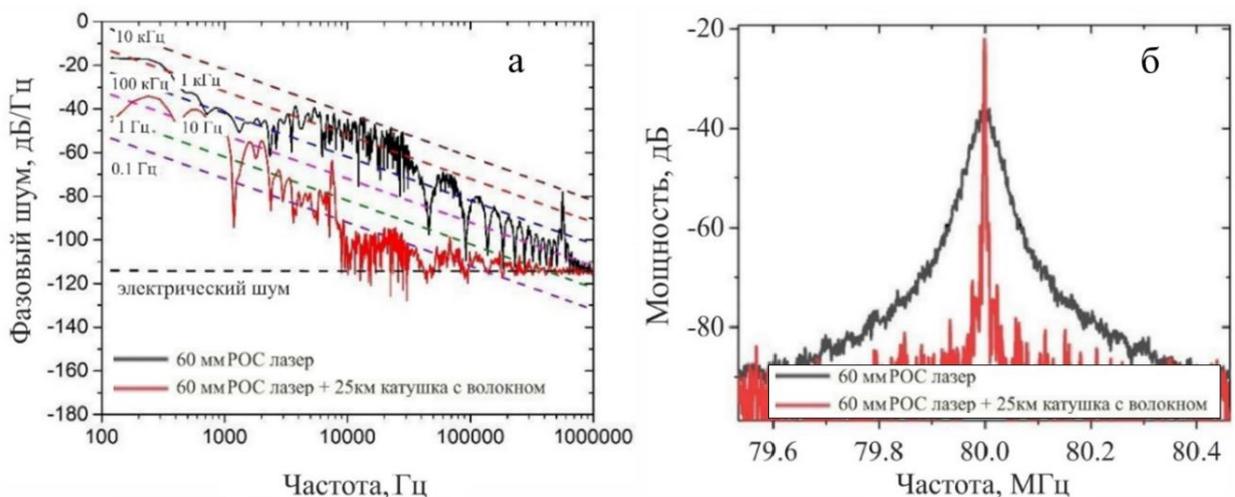


Рис. 6. (а) Спектр фазового шума для 60-мм РОС-лазера (черный цвет) и РОС-лазера с составным резонатором (красный цвет). (б) Радиочастотные спектры биений РОС-лазера (черный цвет) и РОС-лазера с составным резонатором (красный цвет), полученные с применением методики самогетеродинамирования.

Согласно оценке, величина, на которую возможно сузить мгновенную ширину линии РОС-лазера в гибридной конфигурации составила несколько порядков, что также было подтверждено экспериментом с измерением фазовых шумов: разница значений мгновенных ширин в  $\sim 4$  порядка достигается на частотах  $\sim 10$  кГц (рис. 6(a)), а величина ширины линии на частотах более 100 кГц ограничена электрическими шумами фотоприёмника. Также эффект сужения наглядно подтвержден с применением методики самогетеродинамирования с линией задержки длиной  $\approx 30$  км. Ширины линий на уровне -20 дБ составили 120 кГц и 3,2 кГц для РОС-лазера и лазера с составным резонатором, соответственно. Полученные значения являются величиной интегральной, так как измерение проводилось на временах  $\sim 100$  мксек, соответствующих линии задержки.

В качестве альтернативы длинной катушке предложена СРОС на искусственной случайной структуре (рис.5, верхняя часть), изготовленной с применением фс методики. Интегральное отражение от четырех образцов с физической длиной 10 см каждый соответствовало отражению от 10-км катушки SMF-28. Данная структура была также приварена к свободному концу резонатора РОС-лазера, и с применением методики самогетеродинамирования (линия задержки 22 км) было установлено, что ширина линии РОС-лазера в гибридной конфигурации сузилась в 7,5 раз на временах  $\sim 100$  мксек.

Далее структуру СРОС, изготовленную с применением фс поточечной методики, применяли в схемах с полуоткрытым и кольцевым резонатором (Рис.7), а в качестве активной среды использовались различные эрбиевые световоды. В обеих конфигурациях был продемонстрирован режим одночастотной генерации, но в случае схемы с полуоткрытым резонатором он достигался только в определенном диапазоне мощностей.

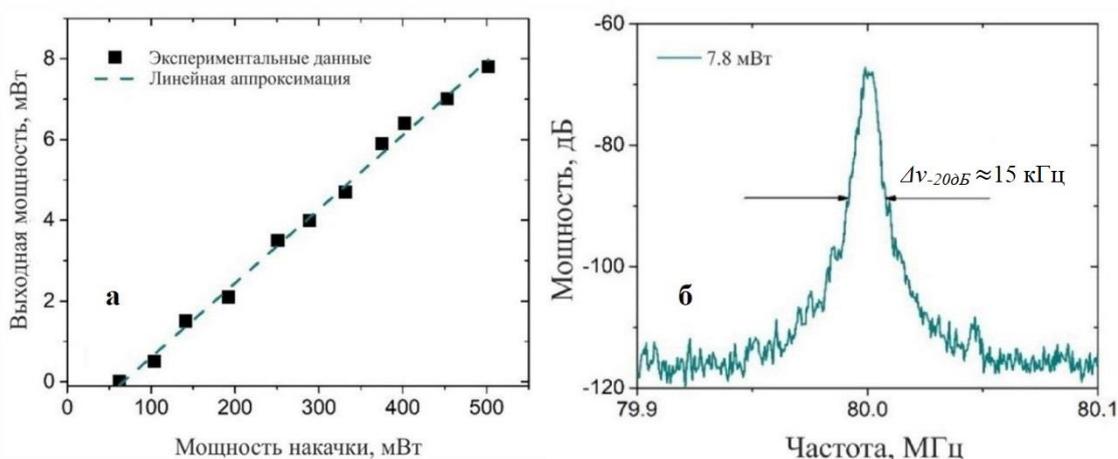


Рис.7. (а) Измеренная выходная мощность в зависимости от мощности накачки. (б) Спектр радиочастотных биений, полученный с применением методики самогетеродинамирования (кольцевая схема).

Для кольцевой (многопроходной) конфигурации одночастотный режим генерации наблюдался во всём мощностном диапазоне (рис.7(a)), ширина линии излучения при

максимальной мощности 7,8 мВт на уровне -20 дБ составила 15 кГц (рис.7(б)), что соответствует 0,75 кГц на полувысоте. Таким образом, спектральные характеристики СРОС-лазера в данной конфигурации не уступают РОС-лазерам, при этом по мощностным характеристикам превосходит эрбиевые РОС-лазеры на порядок.

Также показано, что применение широкополосной СРОС значительно упрощает реализацию перестройки длины волны генерации, что было продемонстрировано в конфигурации с полуоткрытым резонатором, где длина волны излучения перестраивалась в диапазоне  $\Delta\lambda \sim 10$  нм (Рис.8).

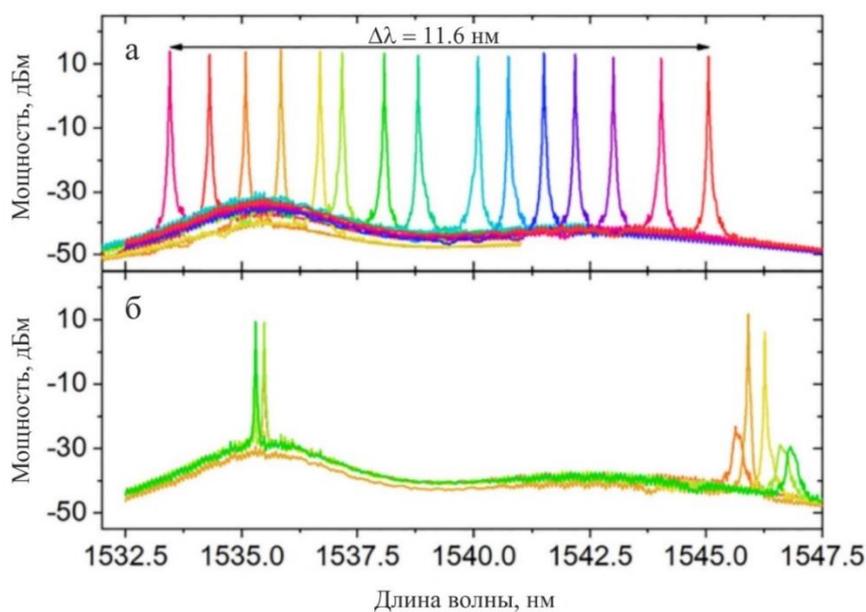


Рис.8 Перестройка длины волны СРОС-лазера в конфигурации с полуоткрытым резонатором на основе волокна НЦВО 1.2 мол. %  $\text{Er}^{3+}$ : (а) одноволновой и (б) многоволновой режимы работы.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Реализован волоконный РОС-лазер на основе ВБР с фазовым сдвигом, записанной с применением фемтосекундной поточечной методики в активном волоконном световоде, не сохраняющем поляризацию. Ввиду анизотропного наведения показателя преломления в структуре ВБР с фазовым сдвигом наблюдалась генерация единственной поляризационной моды с длиной волны излучения 1550 нм. Получены следующие мощностные и спектральные характеристики излучения: дифференциальная эффективность составила  $\eta \approx 0,14\%$  при максимальной выходной мощности в 700 мкВт, ширина линии генерации составила 17 кГц (на временах  $\sim 100$  мксек), отношение сигнал-шум соответствовало 70 дБ, пик относительного шума интенсивности находился на уровне -85 дБ/Гц на частоте 660 кГц. Для сравнения частотного состава излучения были изготовлены аналогичные резонаторы с применением голографической методики записи УФ-излучением в различных  $\text{Er}^{3+}$

световодах. Во всех конфигурациях одночастотный режим не наблюдался (в спектре присутствуют две поляризационные моды).

2. Продемонстрирован волоконный РОС-лазер с рекордно короткой длиной резонатора (5,3 мм), изготовленный в высоколегированном композитном эрбиевом волоконном световоде с применением фемтосекундной поточечной методики записи. Несмотря на высокую концентрацию редкоземельных элементов в световоде, содержание кластеров не превышало 8%, что позволило получить непрерывную генерацию во всем диапазоне мощностей накачки. Показано, что характеристики данного лазера соответствуют аналогичным характеристикам для РОС-лазера с длиной резонатора несколько сантиметров: дифференциальная эффективность составила  $\eta \approx 0,1\%$ , при максимальной выходной мощности 520 мкВт, ширина линии генерации составила 3,5 кГц (на временах  $\sim 100$  мксек), отношение сигнал-шум соответствовало 60 дБ, пик относительного шума интенсивности находился на уровне -95 дБ/Гц при частоте в 1,15 МГц. Также с помощью поточечной фс методики записи был реализован первый (насколько нам известно)  $\text{Ho}^{3+}$  РОС-лазер с длиной волны генерации 2,07 мкм, физическая длина резонатора составила 42 мм. Значение дифференциальной эффективности соответствовало 0,31%, величина относительного шума интенсивности в максимуме на частоте 800 кГц не превышала -85 дБ/Гц. Ширина линии генерации, измеренная АОС, при максимальной выходной мощности 12,5 мВт соответствовала значению аппаратной функции ( $\approx 100$  пм).
3. Экспериментально продемонстрировано сужение линии генерации РОС-лазера в гибридной конфигурации с дополнительной СРОС за счет рэлеевского рассеяния в 25-км катушке одномодового волокна SMF-28. Значения мгновенных ширин получены из данных на основе спектральной плотности частотных шумов и соответствовали 15 Гц для РОС-лазера и  $10^{-3}$  Гц для гибридной конфигурации, полученной оценочно ввиду ограничения, вызванного электрическими шумами фотоприемника. Также продемонстрирована возможность сужения линии с применением СРОС на основе искусственного рэлеевского отражателя, изготовленного с помощью фс-методики. Структура состояла из четырех рэлеевских отражателей, длина каждого сегмента составила 10 см с уровнем обратного рассеяния на 40 дБ больше естественного уровня рэлеевского рассеяния. Суммарное отражение от СРОС структуры составило  $\sim 0,05\%$ , что эквивалентно обратному рэлеевскому рассеянию катушки SMF-28 длиной  $\sim 10$  км. Присоединив случайный отражатель к резонатору РОС-лазера по аналогии с катушкой SMF-28, мы

наблюдали сужение линии генерации в  $\approx 7,5$  раз. Измерения проводились на временном интервале в 100 мксек.

4. Предложен и реализован узкополосный эрбиевый лазер в конфигурации с полукрытым резонатором, где в качестве слабоотражающего выходного зеркала применялась СРОС на случайной структуре, изготовленной с помощью фс-методики. Одночастотный режим генерации был реализован в диапазоне выходных мощностей до  $\sim 3$  мВт с шириной линии  $\sim 10$  кГц. При высоких мощностях (до 100 мВт) ширина линии генерации не превышала 3,3 пм. В зависимости от степени легирования используемых световодов дифференциальная эффективность эрбиевого СРОС-лазера составила 6–16%, отношение сигнал-шум для оптического спектра находилось в диапазоне 53–60 дБ, значение относительного шума интенсивности не превышало -80 дБ/Гц во всех случаях. В данной конфигурации продемонстрирована перестройка длины волны генерации в диапазоне 1533,4–1545 нм за счет растяжения ВБР.
5. Реализован волоконный эрбиевый лазер на основе кольцевой схемы с применением узкополосной ВБР и СРОС на случайной структуре, изготовленной с помощью технологии фс лазерной модификации показателя преломления. Использование искусственной СРОС позволило значительно уменьшить длину резонатора по сравнению с лазерами на основе рэлеевского рассеяния на естественных неоднородностях. Во всём диапазоне мощности накачки наблюдался одночастотный режим генерации с шириной линии не превышающей 750 Гц (на временах  $\sim 100$  мксек). Отношение сигнала к шуму при максимальной выходной мощности 7,8 мВт составило 63 дБ, относительный шум интенсивности не превышал -105 дБ/Гц на частоте 500 кГц.

### **Основные публикации по теме диссертации**

- A1. 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, № 3. P. 035103.
- A2. Wolf A.A., Skvortsov M.I. et al. All-fiber holmium distributed feedback laser at 2.07  $\mu\text{m}$  // Opt. Lett. 2019. Vol. 44, № 15. P. 3781–3784.
- A3. Skvortsov M.I. et al. Advanced distributed feedback lasers based on composite fiber heavily doped with erbium ions // Sci Rep. 2020. Vol. 10, № 1. P. 14487.

- A4. Скворцов М.И. и др. Одночастотный эрбиевый лазер со случайной распределенной обратной связью на основе неупорядоченных структур, созданных фемтосекундным лазерным излучением // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 12. С. 1051-1055.
- A5. Skvortsov M.I. et al. Extreme Narrowing of the Distributed Feedback Fiber Laser Linewidth Due to the Rayleigh Backscattering in a Single-Mode Fiber: Model and Experimental Test // Photonics. 2022. Vol. 9, № 8. P. 590.
- A6. Skvortsov M.I. et al. Narrow-Linewidth Er-Doped Fiber Lasers With Random Distributed Feedback Provided By Artificial Rayleigh Scattering // J. Lightwave Technol. 2022. Vol. 40, № 6. P. 1829–1835.
- A7. Dostovalov A.V., Skvortsov M.I. et al. Continuous and discrete-point Rayleigh reflectors inscribed by femtosecond pulses in singlemode and multimode fibers // Optics Laser Technology. 2023. Vol. 167. P. 109692.
- A8. Skvortsov M.I. et al. Single-Frequency Ring Fiber Laser with Random Distributed Feedback Provided by Artificial Rayleigh Scattering // Photonics. 2024. Vol. 11, № 2. P. 103.

### **Список цитируемой литературы**

1. Radic S. Coherent regeneration // Nature Photon. 2010. Vol. 4, № 10. P. 669–670.
2. Diaz S., Abad S., Lopez-Amo M. Fiber-optic sensor active networking with distributed erbium-doped fiber and Raman amplification // Laser & Photonics Reviews. 2008. Vol. 2, № 6. P. 480–497.
3. Chou C.W. et al. Optical Clocks and Relativity // Science. 2010. Vol. 329, № 5999. P. 1630–1633.
4. Adhikari R.X. Gravitational radiation detection with laser interferometry // Rev. Mod. Phys. 2014. Vol. 86, № 1. P. 121–151.
5. Eyler E.E. Precision, Not Power // Science. 2011. Vol. 333, № 6039. P. 164–165.
6. Feng S. et al. Widely Tunable Single Longitudinal Mode Fiber Laser With Cascaded Fiber-Ring Secondary Cavity // IEEE Photonics Technology Letters. 2013. Vol. 25, № 4. P. 323–326.
7. Wallerand J.-P. et al. Absolute frequency measurement of molecular iodine lines at 514.7 nm, interrogated by a frequency-doubled Yb-doped fibre laser // Metrologia, 2006. Vol. 43, № 3. P. 294.

8. Hald J. et al. Fiber laser optical frequency standard at 1.54  $\mu\text{m}$  // *Opt. Express*. 2011. Vol. 19, № 3. P. 2052–2063.
9. Babin S.A. et al. Single frequency single polarization DFB fiber laser // *Laser Physics Letters*. 2007. Vol. 4, № 6. P. 428–432.
10. Cranch G.A., Flockhart G.M.H., Kirkendall C.K. Distributed Feedback Fiber Laser Strain Sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2008. Vol. 8, № 7. P. 1161–1172.
11. Martínez A. et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser // *Electronics letters*. 2004. Vol. 40, № 19. P. 1170–1172.
12. Dostovalov A.V. et al. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule // *Opt. Express*. 2016. Vol. 24, № 15. P. 16232–16237.
13. Wolf A. et al. Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 101. P. 202–207.
14. Вольф А.А. Поточечная фемтосекундная запись брэгговских решеток в специализированных волоконных световодах: дисс. канд. физ.-мат. наук. 2020. 129 с.
15. Бабин С.А., Вольф А.А., Достовалов А.В., Немов И.Н., Скворцов М.И., Чурин А.Е. Пат. 2816557 Рос. Федерация. Компактный одночастотный линейно-поляризованный волоконный источник излучения (варианты). №2023127819. заявл. 30.10.2023; опубл. 02.04.2024. Бюл. № 10, 2024. с.13.
16. Erdogan T. Fiber grating spectra // *Journal of Lightwave Technology*. 1997. Vol. 15, № 8. P. 1277–1294.
17. Jovanovic N. et al. Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings nable simple, linearly polarized fiber lasers // *Opt. Express*. 2009. Vol. 17, № 8. P. 6082–6095.
18. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 2009. 634 p.