

Ткаченко Алина Юрьевна

**Разработка и исследование устройств опроса  
волоконно-оптических датчиков  
на основе самосканирующего волоконного лазера**

1.3.6 «Оптика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск–2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН).

Научный руководитель: **Лобач Иван Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт автоматики и  
электрометрии Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск

Официальные оппоненты: **Дмитриев Александр Капитонович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Новосибирский государственный  
технический университет»

**Фотиади Андрей Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательский технологический  
институт им. С.П. Капицы Ульяновского  
государственного университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт общей физики им.  
А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года в \_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном  
государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и  
электрометрии СО РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика  
Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН и на сайте:  
<https://www.iae.nsk.su/ru/dissertationcouncil>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Ильичев Л.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность**

В настоящее время одними из самых современных и быстроразвивающихся решений для мониторинга состояния технических объектов являются оптоволоконные технологии измерения физических параметров [1, 2]. Наиболее широко используемыми волоконно-оптическими датчиками (ВОД) для этих целей являются волоконные брэгговские решетки (ВБР) [3]. Существует большое множество различных схем опроса, демонстрирующих использование ВБР для измерения температуры и/или деформации [4-7]. Как правило, такие схемы основаны на использовании широкополосных источников излучения в связке со спектрометрами или перестраиваемого по длине волны лазера в связке с фотодетекторами. Разработка перестраиваемого лазера для создания последнего типа устройства опроса ВОД является отдельной научно-технической задачей. В частности, при реализации подобных источников излучения применяют сложные и дорогостоящие перестраиваемые по длине волны спектральные селекторы и управляющие драйвера [8-11]. Относительно недавно было показано, что перестройка длины волны генерации может быть достигнута без этих элементов. В частности, самоиндуцированное сканирование (далее, самосканирование) длины волны/ частоты генерации наблюдается в, так называемых, самосканирующих волоконных лазерах. Простота схемы (отсутствие управляющего драйвера и перестраиваемого спектрального селектора) и уникальные характеристики выходного излучения (например, малая ширины лазерной линии) позволяют им конкурировать с классическими перестраиваемыми лазерами в ряде прикладных задач [12-14].

Однако, существуют проблемы, связанные с природой эффекта самосканирования, которые усложняют практическое применение подобных источников перестраиваемого по длине волны излучения. В частности, отсутствие строгой временной эквидистантности импульсов генерации требует специальных методов обработки сигналов. Также большие флуктуации границ диапазона перестройки длины волны усложняют практическое применение самосканирующих лазеров. Поэтому задачи по

исследованию и разработке самосканирующего лазера и созданию схем опроса ВОД на его основе систем являются актуальными.

## **Цель работы**

Цель диссертационной работы состояла в разработке и исследовании устройств опроса волоконно-оптических датчиков на основе самосканирующего волоконного лазера.

## **Задачи работы**

Основные задачи, которые необходимо было решить для достижения цели:

1. Исследовать влияние параметров элементов схемы лазера на диапазон самосканирования и определить оптимальные значения для получения максимального диапазона сканирования; исследовать методы управления спектральным диапазоном для требуемой спектральной области;
2. Разработать и реализовать методы стабилизации границ диапазона сканирования;
3. Продемонстрировать применение самосканирующего лазера в качестве перестраиваемого источника в системах опроса ВОД на основе ВБР; определить выходные характеристики и возможные ограничения полученных систем опроса ВОД на основе ВБР.

## **Научная новизна**

Предложены и реализованы методы и подходы оптимизации характеристик сканирования (диапазона сканирования, флуктуаций границ сканирования) волоконного самосканирующего лазера.

Предложены и реализованы подходы обработки сигналов в оптических схемах на основе импульсных самосканирующих волоконных лазеров.

Продемонстрировано использование волоконного самосканирующего лазера в качестве перестраиваемого источника излучения для схем опроса ВБР как со спектральным, так и со спектрально-пространственным разделением. В частности, показана возможность применения схем опроса ВБР на основе самосканирующего лазера для измерения температуры.

## **Практическая значимость**

Полученные в ходе выполнения работы результаты обладают высокой практической значимостью и могут применяться как в опросе ВОД на основе ВБР, так и при разработке новых устройств на основе самосканирующих лазеров.

## **Апробация работы**

Результаты работы докладывались соискателем лично на следующих конференциях и семинарах: международная конференция «*17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*» (Эрлагол, Россия, 2016 г.), международная конференция «*International conference laser optics (ICLO)*» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), «*Российский семинар по волоконным лазерам*» (г. Новосибирск, 2018 г.), международная конференция «*SPIE/COS Photonics Asia*» (г. Пекин, КНР, 2018 г.), международная конференция «*8<sup>th</sup> Optics and photonics international congress (OPIC)*» (г. Иокогама, Япония, 2019 г.), международная конференция «*7<sup>th</sup> European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS)*» (г. Лимасол, Кипр, 2019 г.), «*Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО)*» (г. Пермь, 2019 г.), международная конференция «*Международный семинар по волоконным лазерам*» (г. Новосибирск, 2020 г.).

## **Защищаемые положения**

1. Максимум спектра усиления в волоконном самосканирующем лазере с однородным спектром потерь определяет положение области перестройки длины волны.
2. Флуктуации границ диапазона перестройки длины волны в волоконном самосканирующем лазере могут быть уменьшены при создании дополнительной обратной связи с помощью узкополосного селектора, реализованного либо в виде слабоотражающего селектора, расположенного со стороны выходного зеркала лазера, либо в виде высокоотражающего селектора, расположенного со стороны плотного зеркала лазера.
3. Применение волоконного самосканирующего лазера позволяет достичь спектрального разрешения порядка нескольких десятков МГц и

субмиллиметрового пространственного разрешения в задаче опроса волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток.

### **Личный вклад автора**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

### **Публикации**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных [А1-А8].

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 103 страницах, содержит 50 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 105 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** описывается состояние области исследования, обосновывается актуальность темы диссертации, дается обзор публикаций, посвященных волоконно-оптическим датчикам и наиболее широко используемым методам опроса со спектральным и временным разделением датчиков. Отмечается, что для ряда методов опроса ВОД необходимы перестраиваемые лазеры. Последние, как правило, основаны на активных перестраиваемых элементах (дифракционных решетках, фильтров или ВБР). Альтернативным перестраиваемым источником является самосканирующий лазер (Рис. 3а), в котором перестройка длины волны происходит без перестраиваемых элементов. Исходя из перспективности применения

самосканирующего лазера для задачи опроса ВОД были сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Далее приводится изложение основного содержания работы по главам. Приводится список публикаций и формулируются защищаемые положения.

**Первая глава** посвящена экспериментальному исследованию влияния характеристик элементов самосканирующего лазера (Рис. 3а) на спектральную область сканирования. В главе также описаны методы управления спектральной областью самосканирования.

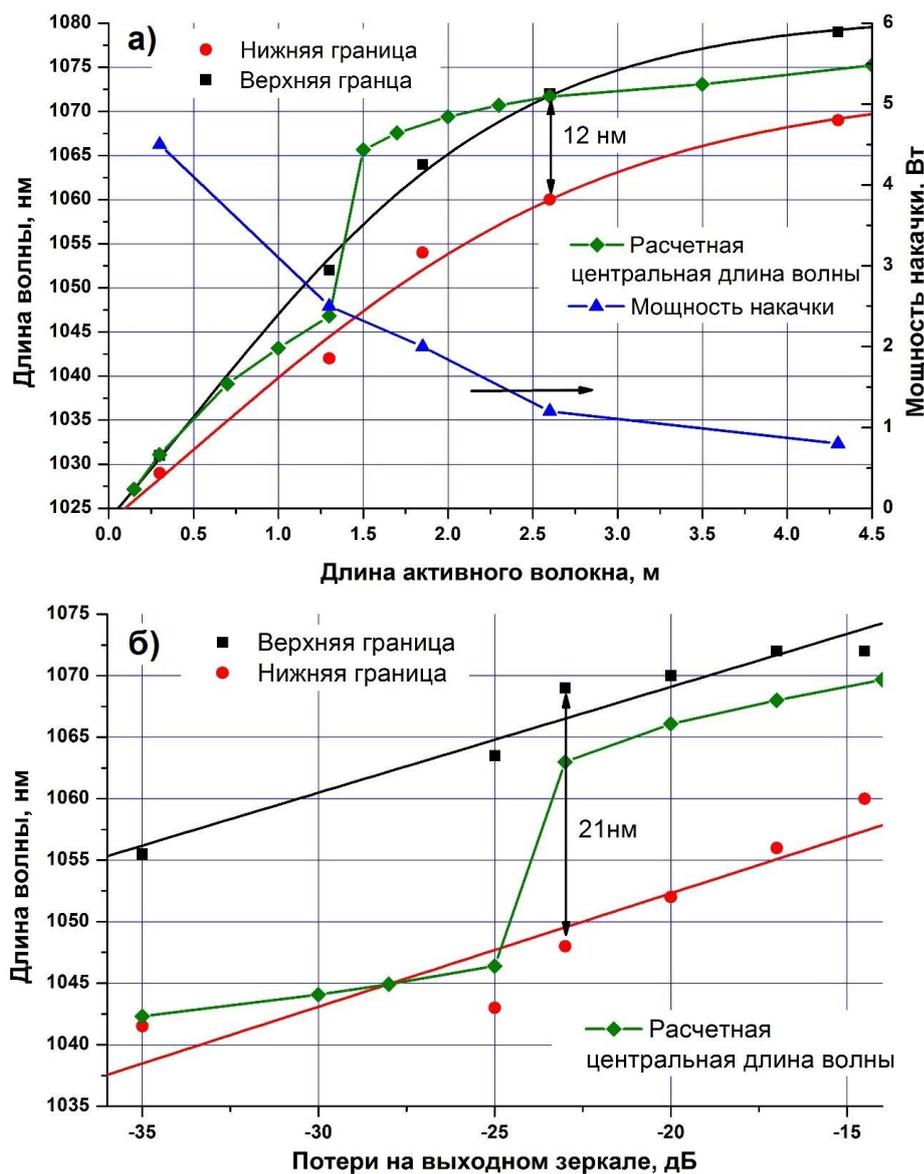


Рис.1. Зависимость области сканирования (а) от длины активного световода и (б) от потерь на выходном зеркале. Черными квадратами и красными точками показаны значения верхней и нижней границы сканирования соответственно.

В разделе 1.1 описано влияние длины активного волокна (Рис. 1а) и общих потерь в резонаторе (Рис. 1б) на положение и ширину области сканирования. Черными квадратами и красными точками показаны значения верхней и нижней границ сканирования соответственно. Было показано, что положение спектральной области самосканирования смещается вслед за смещением максимума спектра усиления в случае спектральной однородности уровня потерь в резонаторе. При увеличении длины активного волокна происходит увеличение вклада от коротковолнового поглощения сигнала и, как следствие, смещение максимума спектра усиления в длинноволновую область. При увеличении потерь в резонаторе для достижения лазерной генерации требуется увеличение мощности накачки. В свою очередь это приводит к более однородному распределению излучения накачки вдоль активного волокна и смещению контура усиления в коротковолновую область спектра. Были определены параметры элементов (длина активного волокна 3 метра, коэффициент отражения выходного зеркала 0,5 %), позволяющие получить максимальный диапазон сканирования в иттербиевом самосканирующем волоконном лазере 21 нм.

В разделе 1.2 исследована возможность управления спектральной областью диапазона самосканирования. Продемонстрировано, что на спектральную область влияет температура активного световода (Рис. 2а). Известно, что при нагреве волокна происходит смещение контура усиления иттербия в длинноволновую область спектра. Также на спектральную область сканирования влияет длина волны лазерного диода накачки (Рис. 2б). Такое поведение связано с приближением длины волны излучения накачки к пику поглощения в иттербии (~975 нм) и, как результат, увеличивается поглощенная мощность.

Заключение к 1 главе обобщает результаты первой главы. В результате проведенной оптимизации был создан волоконный лазер (Рис. 3а), работающий в режиме одночастотного самосканирования частоты с диапазоном перестройки 21 нм.

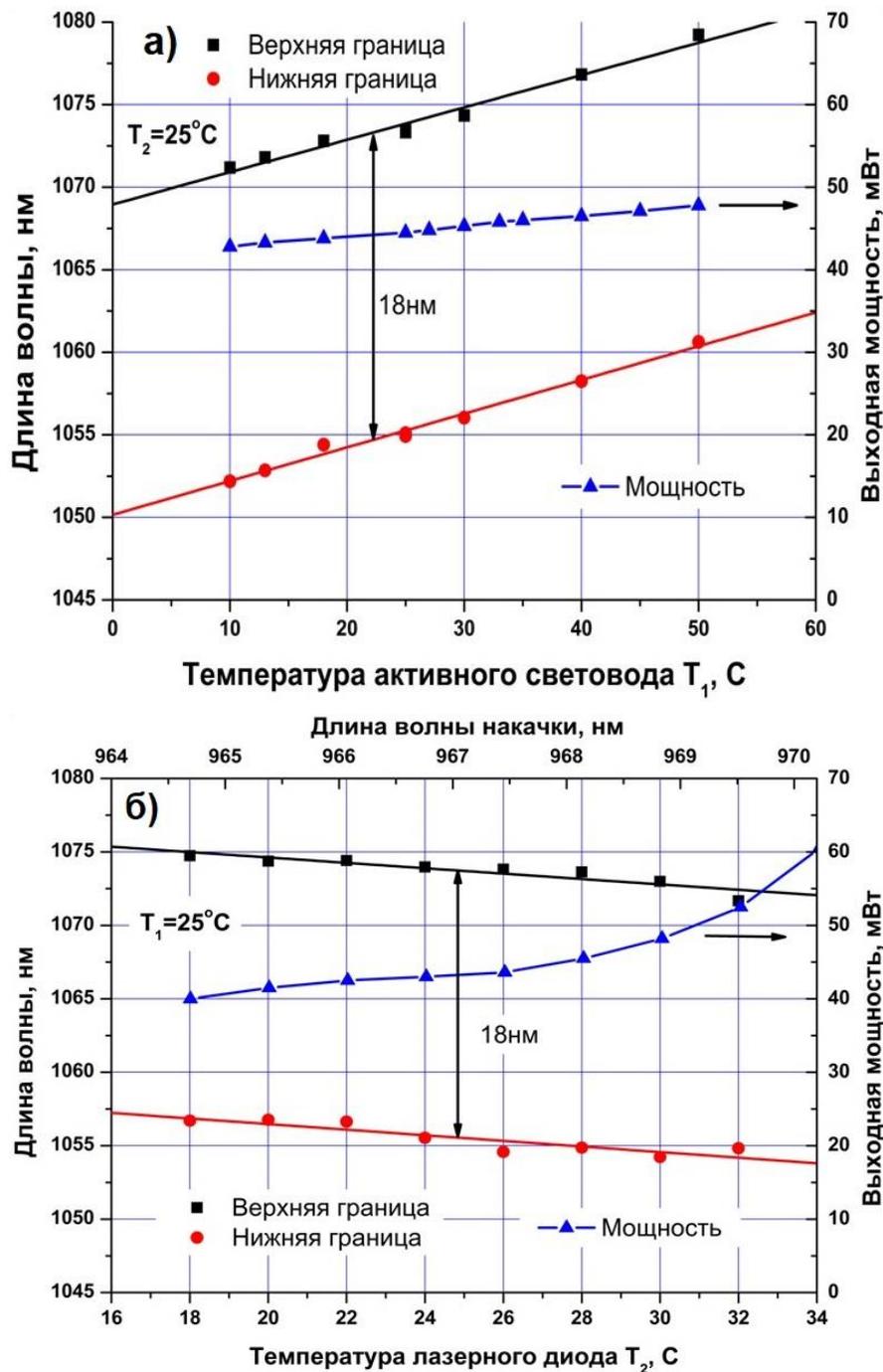


Рис. 2 Зависимость области сканирования (а) от температуры активного световода и (б) от длины волны диода накачки. Обозначения аналогичны Рис.1.

**Вторая глава** посвящена методам стабилизации границ диапазона сканирования, которые позволяют повысить предсказуемость перестройки длины волны генерации волоконных самосканирующих лазеров. На рисунках 3б и 3в показаны две предложенные схемы стабилизации.

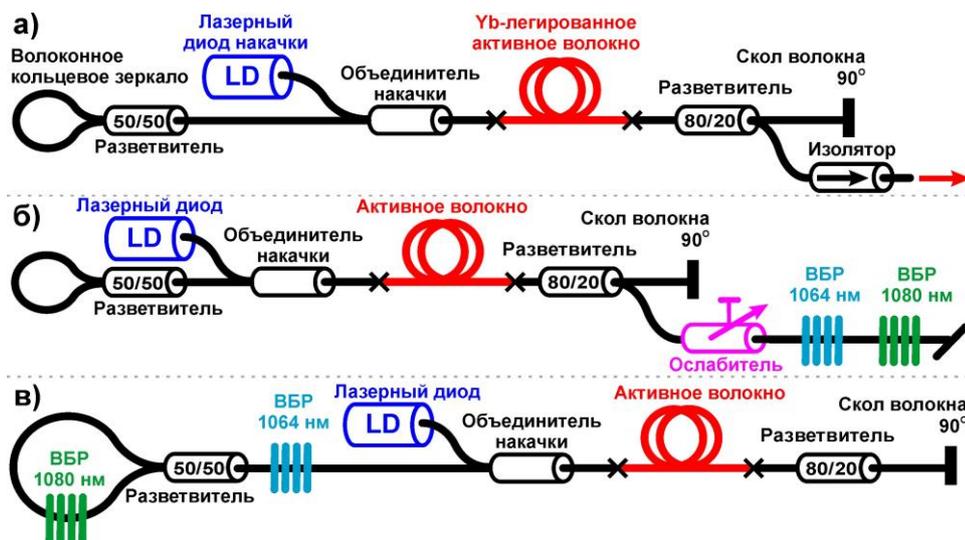


Рис. 3 Схема волоконного самосканирующего лазера а) без стабилизации; б) в схеме со стабилизацией с помощью слабой селективной обратной связи, образованной парой ВБР; в) в схеме со стабилизацией с помощью высокоотражающих ВБР расположенных со стороны плотного зеркала.

В разделе 2.1 рассмотрен метод стабилизации границ с помощью слабой селективной обратной связи, образованной парой ВБР (Рис. 3б). Подбор коэффициента отражения селектора позволил уменьшить флуктуации границ сканирования длины волны с 1100 до 13 пм для стартовой границы и со 110 до 7 пм для конечной границы (Рис. 4). Однако было установлено, что для стабилизации границ сканирования в предлагаемом методе требуются нестандартные ВБР с коэффициентами отражения порядка 0.01-0.1%. По этой причине был предложен альтернативный метод.

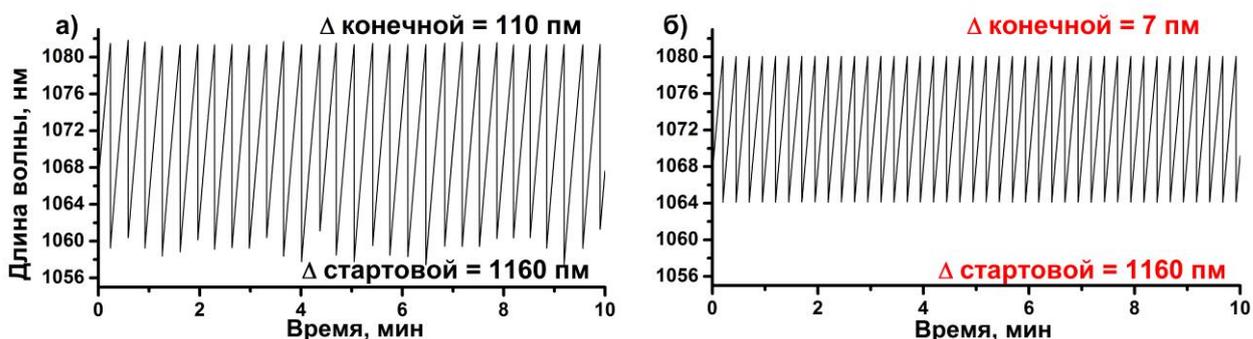


Рис. 4 Динамика длины волны самосканирующего лазера: (а) без ВБР, (б) с двумя ВБР.

В разделе 2.2 рассмотрен второй метод стабилизации, основанный на применении спектральных селекторов в виде высокоотражающих ВБР со

стороны плотного зеркала лазера (Рис. 3в). Этот метод позволил уменьшить флуктуации конечной границы сканирования со 100 до 9 пм и стартовой границы сканирования с 1500 до 6 пм, что сравнимо с результатами, полученными в предыдущей схеме. Данный подход имеет неоспоримое преимущество, поскольку не накладывает ограничения на коэффициент отражения применяемых ВБР.

В разделе 2.3 описан механизм стабилизации в схеме с применением высокоотражающих ВБР со стороны плотного зеркала. Добавления ВБР в волоконное кольцевое зеркало (ВКЗ) приводит к дополнительным селективным потерям, что способствует стабилизации конечной границы сканирования. Добавление ВБР перед ВКЗ приводит к селективному увеличению коэффициента отражения (т.е. уменьшению потерь в узкой области отражения ВБР), что отражается на привязке стартовой длины волны сканирования.

Заключение к 2 главе обобщает результаты второй главы.

**Третья глава** посвящена демонстрациям применений самосканирующего лазера в качестве простого перестраиваемого источника в системах опроса ВБР. Были рассмотрены две системы: на основе спектрального разделения каналов и на основе когерентного оптического частотного рефлектометра.

В разделе 3.1 описывается методика обработки данных, получаемых с помощью самосканирующего лазера. Поскольку импульсы лазера имеют непостоянный период следования и амплитуду, важное значение имеет корректная процедура обработки. Для извлечения полезной информации к сигналам применялась процедура поиска вершин импульсов и их последующая поимпульсная нормировка. Данная процедура далее использовалась при практических демонстрациях устройств опроса.

В разделе 3.2 описана схема и принцип работы устройства опроса ВБР со спектральным разделением каналов на основе самосканирующего лазера (Рис.5а). Устройство опроса было апробировано на сенсорной линии, состоящей из 7 ВБР (Рис. 5б). Одна из ВБР массива (реперная) использовалась для целей привязки длины волны в измеряемом спектре. Была продемонстрирована возможность измерения температуры одной из

ВБР от 25 до 90 °С. Полученные результаты находятся в согласии с результатами, полученными с помощью анализатора спектров. Устройство позволяет определять температуру ВБР датчиков с точностью  $\sim 0.3$  °С, скорость опроса датчиков составила  $\sim 0.05$  Гц. Полученный диапазон сканирования  $\sim 18$  нм позволяет измерять до 9 датчиков в одноканальном режиме при спектральном расстоянии между датчиками 2 нм.

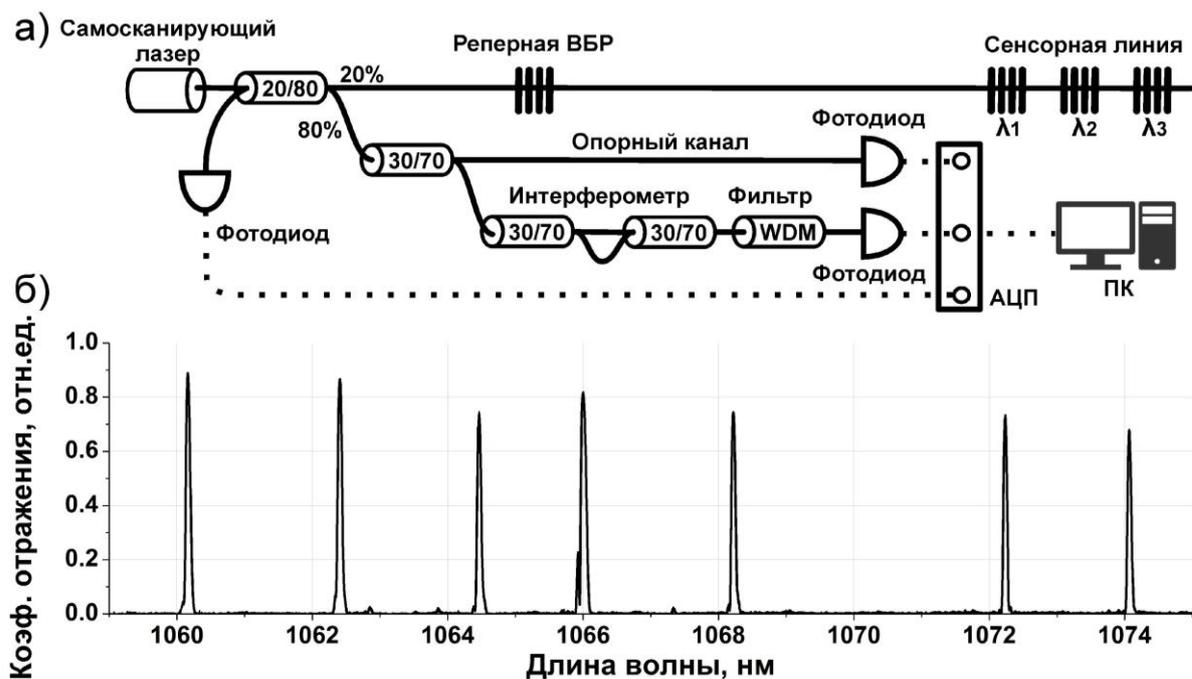


Рис. 5: (а) Схема устройства опроса; (б) Восстановленный спектр отражения сенсорной линии, состоящей из 7 ВБР.

В разделе 3.3 описана схема и принцип работы когерентного оптического частотного рефлектометра на основе самосканирующего волоконного лазера (Рис.6а). Апробация схемы была продемонстрирована для опроса массива из 28 ВБР с одинаковыми длинами волн отражения. При этом центральные длины волны отражения ВБР лежали вне спектрального диапазона сканирования лазера. Благодаря высокой чувствительности схемы рефлектометра удалось измерить сигнал отражения от ВБР. Преимуществами такой схемы по сравнению с предыдущей схемой является возможность пространственного разделения откликов с субмиллиметровым пространственным разрешением. В схеме была продемонстрирована возможность измерения температуры ВБР от 25 до 100°С (Рис.6б). Для

измерения смещения спектра отражения ВБР использовался корреляционный анализ.

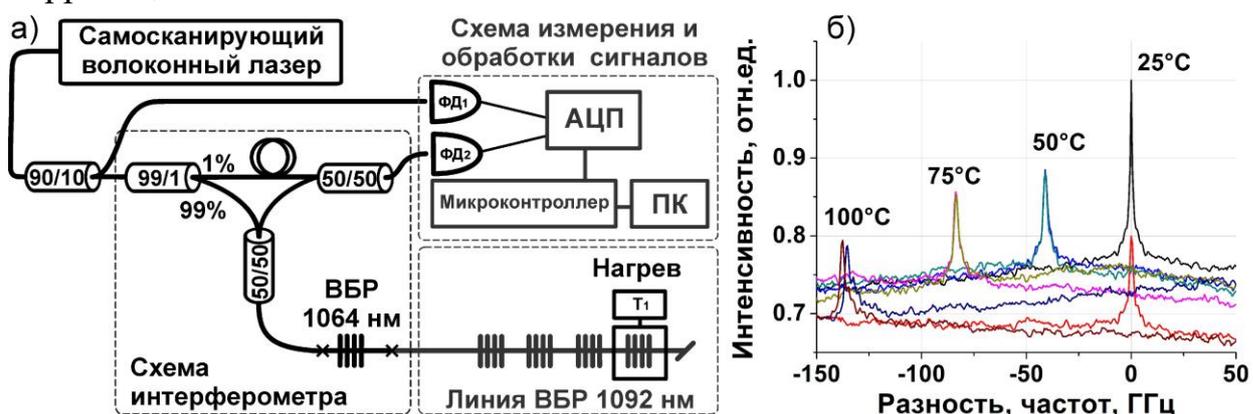


Рис. 6. (а) Схема когерентного частотного рефлектометра на основе самосканирующего лазера; (б) Функции кросс-корреляции между спектрами отражения ВБР при комнатной температуре (25 °С) и в нагретом состоянии.

**Заключение** содержит формулировку результатов данной работы.

## Основные результаты

1. Проведена оптимизация длины активного волокна и коэффициента отражения выходного зеркала в иттербиевом самосканирующем волоконном лазере. Диапазон непрерывного сканирования увеличен до 21 нм.

2. Экспериментально показано, что область перестройки длины волны иттербиевого самосканирующего волоконного лазера смещается в коротковолновую область при уменьшении длины активного волокна или увеличении общих резонаторных потерь. Экспериментально продемонстрировано управление положением области самосканирования в иттербиевом волоконном лазере в диапазоне от 1028 нм до 1080 нм.

3. Экспериментально продемонстрировано управление положением области сканирования в иттербиевом самосканирующем волоконном лазере без изменения параметров резонатора с помощью изменения температуры активной среды (0.2 нм/°С) и длины волны излучения источника накачки, с помощью изменения температуры лазерного диода накачки (-0.2 нм/°С).

4. Предложено и экспериментально реализовано два метода стабилизации границ области самосканирования в волоконном лазере. Первый метод основан на создании слабой селективной обратной связи со стороны выхода лазера, образованной парой волоконных брэгговских решеток и волоконным ослабителем. Метод позволил уменьшить флуктуации границ сканирования длины волны с 1100 до 13 пм и с 110 до 7 пм для стартовой и конечной границ соответственно. Второй метод стабилизации на основе спектральных селекторов в виде высокоотражающих волоконных брэгговских решеток, установленных со стороны плотного волоконного кольцевого зеркала лазера, позволил аналогичным образом уменьшить флуктуации границ сканирования с 1500 до 6 пм и с 100 до 9 пм соответственно.

5. Экспериментально продемонстрирована работа самосканирующего волоконного лазера в двух схемах опроса массивов волоконных брэгговских решеток. В схеме со спектральным разделением при опросе линии, состоящей из 6 волоконных брэгговских решеток с различающимися длинами волн отражения, достигнуто спектральное разрешение  $\sim 5.5$  МГц. В схеме когерентного оптического частотного рефлектометра при опросе линии, состоящей из 28 волоконных брэгговских решеток с одинаковыми длинами волн отражения, достигнуто пространственное разрешение на уровне 0.2 мм.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

- A1. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А.* Устройство опроса волоконных сенсоров на базе волоконного лазера с самосканированием частоты // Прикладная фотоника. — 2016. — Т. 3, № 1. — С. 37.
- A2. *Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Guskov L.N.* Fiber sensor interrogator based on self-sweeping fiber laser. // Proceedings of 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. — 2016. — P. 348–351.
- A3. *Lobach I. A., Tkachenko A. Yu., Kablukov S. I.* Optimization and control of sweeping range in Yb-doped self-sweeping fiber laser. // Laser Physics Letters. — 2016. — V. 13, № 4. — P. 045104-045110.

- A4. Tkachenko A. Yu., Vladimirskaya A. D., Lobach I. A., Kablukov S. I. Michelson mode selector for spectral range stabilization in a self-sweeping fiber laser. // *Optics Letters*. — 2018. — V. 43, Issue 7. — P. 1558-1561.
- A5. Tkachenko A. Yu., Vladimirskaya A. D., Lobach I. A., Kablukov S. I. Sweeping range control in a self-sweeping laser with selective mirrors. // *Proceedings SPIE Advanced Sensor Systems and Applications VIII, SPIE/COS Photonics Asia, Beijing, China*. — 2018. — V. 10821. — Paper 108210V.
- A6. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Подивилов Е.В., Каблуков С.И. Кольцевое зеркало с ВБР для стабилизации диапазона сканирования в волоконном лазере с самосканированием частоты. // *Квантовая электроника*. — 2018. — 48(12). — С. 1132–1137.
- A7. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И. Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты. // *Квантовая электроника*. — 2019. — Т. 49. — № 12. — С.1121–1126.
- A8. Tkachenko A. Yu., Smolyaninov N. N., Skvortsov M. I., Lobach I. A., Kablukov S. I. A Coherent Optical Frequency-Domain Reflectometer Based on a Self-Sweeping Fiber Laser for Sensing Applications. // *Instruments and Experimental Techniques*. — 2020. — V. 63. — No. 4. — P. 536–541.

### **Список цитируемых работ**

- [1] Norris J.O.W. Optical Fiber Chemical Sensors: Fundamentals and Applications. // *Springer: Optical Fiber Sensor Technology*. — 2000. — P. 337-378.
- [2] Kasik I., Matejec V., Chomat M., Hayer M., Berkova D. Optical fibres for optical sensing. // *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. — 2006. — V. 224.
- [3] Васильев С.А., Медведков О. И., Королев И. Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // *Квантовая электроника* – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085-1103.
- [4] Lloyd G. D., Everall L. A., Sugden K., Bennion I. A high-performance miniaturized time division multiplexed sensor system for remote structural health monitoring // *Proceedings SPIE, Optical Sensing*. — Vol. 5459. — 2004. — P. 145-156.

- [5] Zhang P., Cerecedo-Nunez H. H., Qi B., Pickrell G. R., Wang A. Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg-grating-based sensor system // *Optical Engineering*. — 2003. — Vol.42, № 6. — P. 1596-1603.
- [6] Berkoff T. A., Davis M. A., Bellemore D.G., Kersey A.D., Williams G.M., Putnam M.A. Hybrid time- and wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor array. // *Proceedings SPIE Smart Structures and Materials: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*. — 1995. — Vol. 2444.
- [7] MacDonald R. I. Frequency domain optical reflectometer // *Applied Optics*. — 1981. — V. 20, Issue 10. — P. 1840-1844.
- [8] Dawson J.W., Park N., Vahala K.J. Co-lasing in an electrically tunable erbium-doped fiber laser. // *Applied Physics Letters*. — 1992. — № 60. — P. 3090-3092.
- [9] Liu C., Yang X., Laurell F., Fokine M. Widely tunable Er:Yb fiber laser using a fiber Bragg grating embedded in a 3D printed beam. // *Optical Materials Express*. — 2020. — V. 10. — Issue 12. — P. 3353-3358.
- [10] Kwon Y. S., Ko M. O., Jung M. S., Park I. G., Kim N., Han S. -P., Ryu H. -C., Park K. H., Jeon M. Y. Dynamic sensor interrogation using wavelength-swept laser with a polygon-scanner-based wavelength filter. — *Sensors*. — 2013. — V. 13, Issue 8. — P. 9669-9678.
- [11] Yamashita S., Takubo Y. Wide and fast wavelength-swept fiber lasers based on dispersion tuning and their application to optical coherence tomography. // *Photonic Sensors*. — 2013. — № 3 — P. 320-331.
- [12] Kir'yanov A. V., Il'ichev N. N. Self-induced laser line sweeping in an ytterbium fiber laser with nonresonant Fabry-Perot cavity. // *Laser Physics Letters*. — 2011. — V. 8, Issue 4. — P. 305-312.
- [13] Lobach I. A., Babin S. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V. Broadrange self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser. // *Optics Express*. — 2011. — V. 19, Issue 18. — P. 17632-17640.
- [14] Lobach I. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V., Babin S. A. Self-scanned single-frequency operation of a fiber laser driven by a self-induced phase grating. // *Laser Physics Letters*. — V. 11, № 4. — P. 045103-045108.