

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

**Ткаченко Алина Юрьевна**

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

Специальность 1.3.6  
«Оптика»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук  
Лобач Иван Александрович

Новосибирск, 2022

## Оглавление

Список обозначений и сокращений	3
Введение	4
1. Оптимизация и управление спектральной областью сканирования	29
1.1 Влияние характеристик компонент на спектральную область сканирования	29
1.1.1 Влияние длины активного волокна	29
1.1.2 Влияние общих потерь в резонаторе	33
1.2 Управление спектральным диапазоном сканирования	38
1.2.1 Управление с помощью температуры активного волокна	38
1.2.2 Управление с помощью длины волны лазерного диода накачки	39
Заключение к главе 1.	41
2. Стабилизация границ диапазона сканирования	43
2.1 Слабая селективная обратная связь для стабилизации границ сканирования	43
2.2 Кольцевое зеркало с ВБР для стабилизации границ диапазона сканирования	51
2.3 Механизм стабилизации границ сканирования	58
Заключение к главе 2	62
3. Системы опроса ВБР на основе самосканирующего лазера	63
3.1 Обработка данных с самосканирующего волоконного лазера.	63
3.2 Устройство опроса ВБР со спектральным разделением каналов	65
Заключение к разделу 3.2	72
3.3 Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе самосканирующего лазера для опроса ВБР	73
3.3.1. Определение чувствительности КОЧР	77
3.3.2. Опрос массива ВБР с помощью КОЧР	78
Заключение к разделу 3.3	84
Заключение	87
Основные результаты	89
Список публикаций автора по теме квалификационной работы	90
Список литературы	91

## Список обозначений и сокращений

АЦП	аналого-цифровой преобразователь
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ВОД	волоконно-оптический датчик
ВБР	волоконная брэгговская решетка
ИМЦ	интерферометр Маха-Цендера
КОЧР	когерентная оптическая частотная рефлектометрия
ОСД	область свободной дисперсии
ТВЛ	тестируемая волоконная линия

## Введение

### **Волоконные брэгговские решетки и волоконно-оптические датчики на их основе**

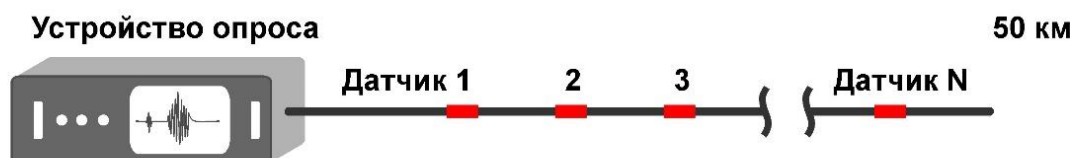
С развитием технологий в промышленности, строительстве, нефте- и газодобыче, а также других сферах деятельности человека повышается сложность конструкций зданий, сооружений, различных технических агрегатов и устройств. Как следствие, особо важную роль играют диагностика и мониторинг их текущего технического состояния. Самым современным и быстроразвивающимся решением мониторинга являются оптоволоконные технологии измерения физических параметров [1, 2]. Преимуществами волоконно-оптических датчиков (ВОД) являются малый вес и размер, отсутствие электричества в измерительном тракте, нечувствительность к электромагнитным помехам и воздействию агрессивных сред, поэтому они могут применяться в условиях повышенной взрывоопасности, сильных электромагнитных и радиочастотных воздействий, в контакте с горючими смесями. В настоящее время существует большое множество ВОД, позволяющие измерять различные физические величины: давление, деформацию, температуру, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, электрическое и магнитное поле, концентрацию газа и др. Также, к преимуществам таких систем относится возможность мультиплексирования и объединения большого количества датчиков в квази-распределённые информационно-измерительные системы [3].

ВОД можно классифицировать по возможности пространственной характеристики физической величины, а именно точечные, квази-распределенные, и распределенные системы ВОД (Рис. 1). Точечные датчики (Рис. 1а) измеряют физическую величину только в месте расположения и используют волоконно-оптический кабель для передачи света от источника к датчику и от датчика к системе детектирования. Как правило, точечные датчики мультиплексируют таким образом, что несколько датчиков используют одно и то же оптическое волокно для передачи сигналов. В случае, когда точечные ВОД расположены достаточно близко к друг другу, то уже говорят о квази-распределенной системе (Рис. 1б). В распределенном датчике (Рис. 1в) само оптическое волокно является чувствительным элементом и измеряет физическую величину во всех точках вдоль волоконной линии [4].

### а) Точечные датчики



### б) Квази-распределенные датчики



### в) Распределенный датчик



Рисунок 1 – классификация систем ВОД а) точечные, б) квази-распределенные, в) распределенные. Красным цветом обозначены чувствительная область ВОД.

Также ВОД можно классифицировать по принципу действия в соответствии с тем, какой из параметров оптического излучения, распространяющегося по волокну, используется для получения информации об измеряемом физическом воздействии: амплитудные, фазовые (интерференционные), поляризационные и спектральные ВОД. Чувствительный элемент в амплитудном ВОД представляет собой либо специально встроенное в волоконно-оптический тракт модулирующее устройство, либо введенную в волоконную линию нерегулярность (разрыв, изгиб и т.д.). Такие нерегулярности могут существенно менять амплитудную передаточную характеристику волокна. Для детектирования модулированного светового сигнала применяется обычная методика фотодетектирования. Фазовые (или интерференционные) ВОД представляют собой устройства, регистрирующие изменения фазы оптического излучения, распространяющегося по оптическому каналу. Изменения возникают при внешнем воздействии на материал канала и регистрируются интерферометрическим методом при наложении сигналов измерительного и опорного каналов. Такие ВОД могут быть сделаны, например, на основе интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ). Для детектирования сигнала фазовых ВОД необходимо применять когерентные методы — гомо- и

гетеродинное детектирование. К примеру, датчики на базе интерферометров отличаются высоким разрешением и большим динамическим диапазоном. Интерферометр Фабри-Перо является наиболее привлекательным для создания датчика давления из-за его простоты, компактности и чувствительности [6]. Чувствительным элементом датчика является мембрана, выполненная из боросиликатного стекла. Анализ значений изменения давления проводится по смещению интерференционной картины, которая образуется благодаря обратным отражениям от торца оптического волокна, внутренней и внешней частей мембраны. Также существуют волоконно-оптические акустические датчики на основе ИМЦ. В этом случае чувствительный элемент датчика представляет собой чувствительное плечо, погруженное в среду, и опорное плечо. На фотодетекторе регистрируется интерференционная картина с опорного и чувствительного плеча. Эта конфигурация имеет две особенности [7] - нестабильность рабочей точки интерферометра и влияние любых фазовых шумов на изменение интенсивности регистрируемого светового сигнала. В отличие от ИМЦ в датчиках на основе интерферометра Майкельсона [8] используется один разветвитель, который и разделяет, и соединяет проходящее излучение. Излучение, приходящее от источника, разделяется между измерительным и опорным плечами интерферометра. Опорное волокно служит для определения внешнего воздействия на контролируемую конструкцию путем сравнения параметров распространения света в опорном и измерительном волокнах. Пройдя по всей длине плеч, излучение отражается рефлектором и проходит обратно через те же плечи. Измерительное волокно прикреплено к контролируемой конструкции и следует за всеми ее деформациями [9]. Пройдя по волокнам, свет отражается зеркалами на концах волокон. Для каждой пары отражателей наблюдается интерференционная картина с тремя пиками. Центральный пик образуется при равновесии двух плеч интерферометра Майкельсона, т.е. при отсутствии разности оптического пути. Боковые пики соответствуют положению подвижного зеркала, когда разность оптического пути соответствует оптической разности хода в первом интерферометре. Таким образом, разность между положением центрального и боковых пиков соответствует разности плеч первого интерферометра, т.е. смещению измеряемого объекта. Положение пиков может быть определено с точностью до 2 мкм [10].

Поляризационные датчики основаны на зависимости изменения поляризации излучения при прохождении его через оптические среды, находящиеся под воздействием измеряемой величины. Для детектирования поляризационно-модулированного сигнала применяется схема со скрещенными поляризаторами. В частотных датчиках исследуемое физическое воздействие изменяет частоту генерируемого, отраженного или пропускаемого света [5].

Одним из наиболее распространённых типов ВОД является спектральный, когда измеряются изменения спектрального состава излучения, вызванные внешними условиями. Наибольшую популярность этого типа ВОД получили волоконные брэгговские решетки (ВБР) [11]. ВБР представляет собой участок волоконного световода, в сердцевине которого сформирована периодическая модуляция показателя преломления с определённым периодом  $\Lambda$  (Рис.2). Такая структура способна отражать излучение в узком спектральном диапазоне, то есть на определенной (брэгговской) длине волны [12]:

$$\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

где  $n_{eff}$  - средний показатель преломления сердцевины волокна,  $\Lambda$  – период структуры.

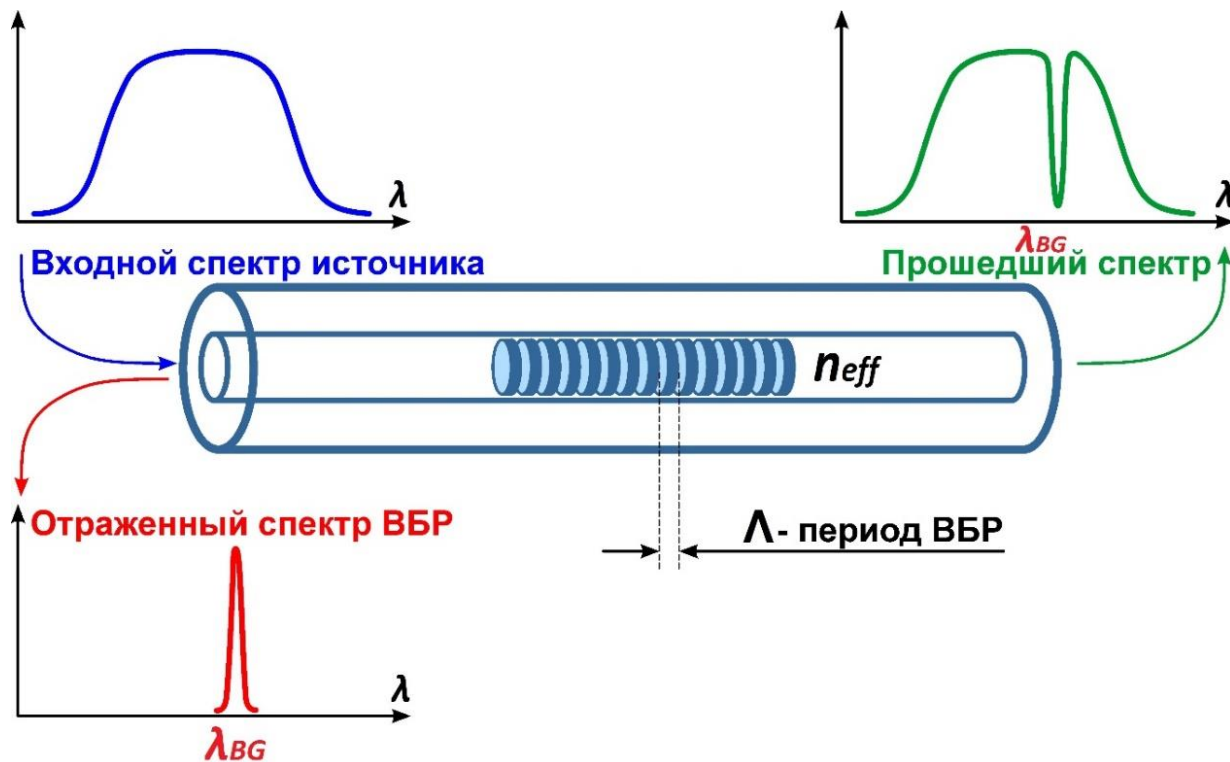


Рисунок 2 – Иллюстрация работы волоконной брэгговской решетки.

На сегодняшний день ВБР могут иметь различные оптические свойства в зависимости от решаемой задачи: коэффициент отражения 0,1–99,9%, спектральная ширина полосы отражения 0,01–10 нм [11, 13 - 17]. В силу малого периода ВБР ( $\Lambda \sim 0.5$  мкм) их, как правило, формируют с использованием интерференционных методов. Так как процесс записи необходимой решеточной структуры может длиться несколько десятков минут, изготовление качественной решетки возможно лишь при высокой стабильности интерференционной картины. Несмотря на то, что число предложенных схем записи ВБР довольно велико, можно выделить ряд основных. Среди основных методов записи ВБР выделяют поточечный метод [13], метод с использованием фазовой маски [17] и интерферометрический метод [18]. Формирование ВБР методом фазовой маски является наиболее простым и эффективным. В основном, в качестве источника создания решеток применяются УФ-эксимерные лазеры. Основной причиной использования УФ-излучения является повышенная фоторефрактивность и фоточувствительность оптического волокна в этом спектральном диапазоне. Недостатками данного метода является невозможность изменять длину волны отражения ВБР вследствие фиксированного значения периода фазовой маски. Также данный метод не позволяет производить запись ВБР в процессе вытяжки волокна, так как последнее требует отсутствия оптических элементов вблизи движущегося световода [17]. Кроме того, при использовании УФ света нужно производить процедуру снятия защитной полимерной оболочки волокна перед записью решетки. Эта процедура необходима, так как стандартные полимеры, используемые в качестве оболочки волокна, непрозрачны для УФ-излучения.

Также существует множество схем записи ВБР интерферометрическим методом [18 - 20]. В зависимости от вида интерферометра различают схемы записи ВБР с амплитудным и пространственным разделением пучка УФ-излучения. В схеме с амплитудным разделением происходит деление исходного УФ пучка с помощью светоделительной пластины. Затем, с помощью системы зеркал пучки сводятся в области расположения световода под определенным углом друг к другу. Этот угол задает период интерференционной картины и, следовательно, период ВБР. Популярной схемой записи с пространственным разделением пучка является схема на основе интерферометра Ллойда. Диэлектрическое зеркало делит фронт пучка на две равные части, а перестройка угла в данном случае осуществляется путем поворота зеркала вместе с закрепленным на нем



световодом. Преимуществом интерферометрических схем записи является гибкость в выборе таких параметров, как период и длина записываемых решеток, однако требуется высокая пространственная и временная когерентность записывающего излучения. Так как интерферометрические схемы записи с пространственным разделением пучка имеют меньшее количество оптических элементов, то, следовательно, большую временную стабильность.

Еще один применяющийся на сегодняшний день метод записи – это пошаговый метод. Формирование ВБР осуществляется при помощи механического перемещения оптического волокна относительно сфокусированного на сердцевину лазерного излучения. Привлекательность данного метода в том, что он устраняет необходимость использования фазовой маски и позволяет записывать ВБР с брэгговским резонансом на произвольной длине волны. Данный метод является более гибким, так как позволяет формировать произвольные профили отдельного штриха решетки и всего распределения амплитуды наведенного показателя преломления в целом, а также изменять период по длине решетки, то есть создавать чирпированные ВБР без использования фазовой маски с переменным по длине периодом. Однако, данный метод требует прецизионного механического перемещения оптического волокна вдоль сфокусированного излучения [13].

Важной особенностью ВБР является то, что ее резонансная длина волны зависит от внешних параметров, а именно – от температуры и механического напряжения [12]:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2 \left( \Lambda \frac{dn}{dl} + n \frac{d\Lambda}{dl} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  - изменение температуры,  $\Delta l$  – механическая деформация,  $n$  - эффективный показатель преломления основной моды. В ситуации, когда на ВБР действует только изменение температуры, выражение приобретает следующий вид [3]:

$$\Delta\lambda_{BG} = \lambda_{BG} \left[ \frac{1}{\Lambda} \left( \frac{d\Lambda}{dT} \right) + \frac{1}{n} \left( \frac{dn}{dT} \right) T \right] \Delta T. \quad (3)$$

Это соотношение дает типичные значения сдвига  $\lambda_{BG}$  в зависимости от температуры  $\Delta\lambda_{BG}/\Delta T \sim 0,01$  нм/К [11, 12]. Таким образом, принцип работы спектральной ВОД на основе ВБР основан на зависимости длины волны отражения от внешнего воздействия. Измерения оптического отклика ВОД позволяет определить величину физического воздействия. Как правило, длина стандартных ВБР мала (порядка 1 см), поэтому ВБР-ВОД измеряет локальное

значение физической величины (температуры или деформации), где находится ВБР. Для измерения распределенного значения физической величины в нескольких точках необходимо сформировать в оптическом волокне несколько ВБР. Количество ВБР в одной волоконной линии может достигать несколько десятков единиц. Как уже отмечалось выше, в случае близкого расположения соседних ВБР в волоконной линии сенсорную систему можно считать квази-распределенной. Для измерения оптического отклика используются, так называемые устройства опроса ВОД, которые также называют анализаторами сигналов или интеррогаторами (от англ. interrogator – опрашивать). Далее рассмотрим подробнее виды и принципы работ подобных устройств.

### **Устройства опроса ВОД на основе ВБР**

Сенсорные системы из ВБР-датчиков имеют ряд преимуществ, включая низкие потери и возможность создания больших сетей. Основной проблемой, определяющей практическое применение ВБР, является разработка методов и оборудования для измерения малых сдвигов брэгговских пиков с большой точностью [21]. С одной стороны, для измерения физической величины необходимо отслеживать изменение положения пика отражения ВБР. С другой стороны, при использовании ВБР для измерения какой-либо физической величины необходимо знать место воздействия. Таким образом, при опросе системы из ВОД на основе ВБР необходимо решать две связанные между собой задачи: 1) измерять изменение длины волны и 2) локализовать это воздействие. При этом зачастую возникает потребность в нахождении пространственного распределения измеряемой величины. Другими словами, при измерении подобных ВОД нужно иметь разрешение как по спектру, так и по пространству. Это связано с малыми размерами датчика, измерение физических величин происходит только в месте нахождения ВБР. Для этого требуется использование массива ВБР, расположенные в различных точках пространства. Для их опроса разработаны схемы, позволяющие мультиплексировать сенсорные элементы, в том числе расположенных в одном оптическом волокне. Основными техническими характеристиками для схем опроса являются: ширина спектрального диапазона источника (нм); общее количество опрашиваемых датчиков, количество оптических каналов и количество датчиков на канал; разрешение по длине волны (нм) и погрешность измерения длины волны (нм);

частота опроса (Гц). Квази-распределенные сенсорные системы измерения температуры и деформации возможны с применением параллельных или последовательных схем объединения ВБР. При этом метод опроса системы датчиков определяется ее топологией.

Наиболее простыми являются схемы последовательного соединения ВБР с разными длинами волн отражения, (Рисунок 3-а) [22], формирующие линию ВОД. При этом каждая из ВБР занимает свой отдельный спектральный диапазон, что является главным ограничением количества датчиков в таких системах. Для увеличения числа датчиков используют ВБР (или группы ВБР) с одинаковыми длинами волн отражения, разделенными между собой в пространстве (Рисунок 3-б) [23]. Основным преимуществом является то, что каждая из ВБР занимает одно и то же окно в диапазоне длин волн, т.е. общее количество датчиков не зависит от спектральной ширины источника.

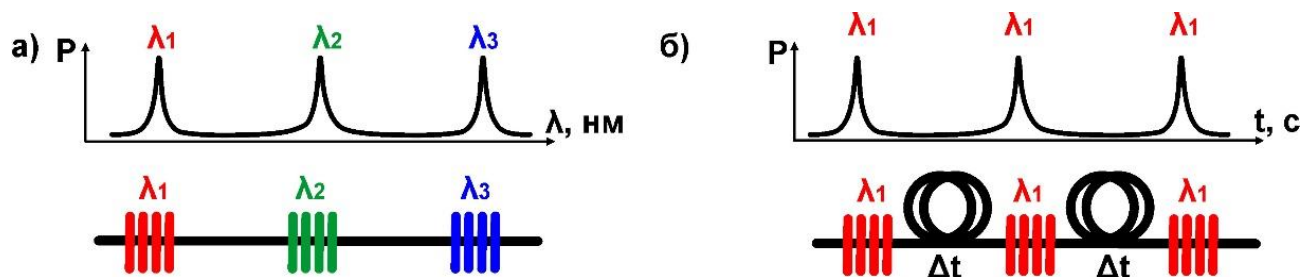


Рисунок 3 – Схемы последовательного соединения ВБР а) с разными длинами волн отражения, б) с одинаковыми длинами волн отражения, разделенными между собой в пространстве.

Дальнейшее увеличение количества датчиков можно достичь с помощью распараллеливания различных линий. При параллельном соединении несколько линий ВБР-датчиков с одинаковыми [24] или разными [25] длинами волн отражения подключаются к одному устройству опроса. Важным элементом в такой схеме является оптический переключатель [26], который осуществляет выбор текущего канала опроса. Основным преимуществом такой схемы является увеличение количества опрашиваемых датчиков. Однако, данные схемы требуют наличие элемента, выбирающего действующий канал, что приводит к уменьшению быстродействия пропорционально количеству параллельно подключенных каналов с датчиками.

Также стоит отметить работы, когда параллельные линии ВБР организованы в одном многосердцевинном волоконном световоде [27]. Такого

пространственного уплотнения можно добиться с помощью фемтосекундной поточечной записи ВБР в выбранных сердцевинах волокна. В частности, было показано, что массив ВБР может быть записан в центральной и выбранной боковой сердцевине световода. Однако для опроса различных датчиков требуются специальные переходники с обычных волокон на многосерцевинные – устройство ввода-вывода [28]. Дальнейший опрос ВБР осуществлялся, как и в случае нескольких параллельных линий ВОД.

Таким образом, проблема опроса параллельных линий ВОД решается с применением оптического переключателя. По этой причине далее мы будем рассматривать только задачу об опросе одной линии ВОД. Для этого рассмотрим самые распространённые схемы разделения откликов от ВБР, расположенных в одной линии: с временным и со спектральным разделением.

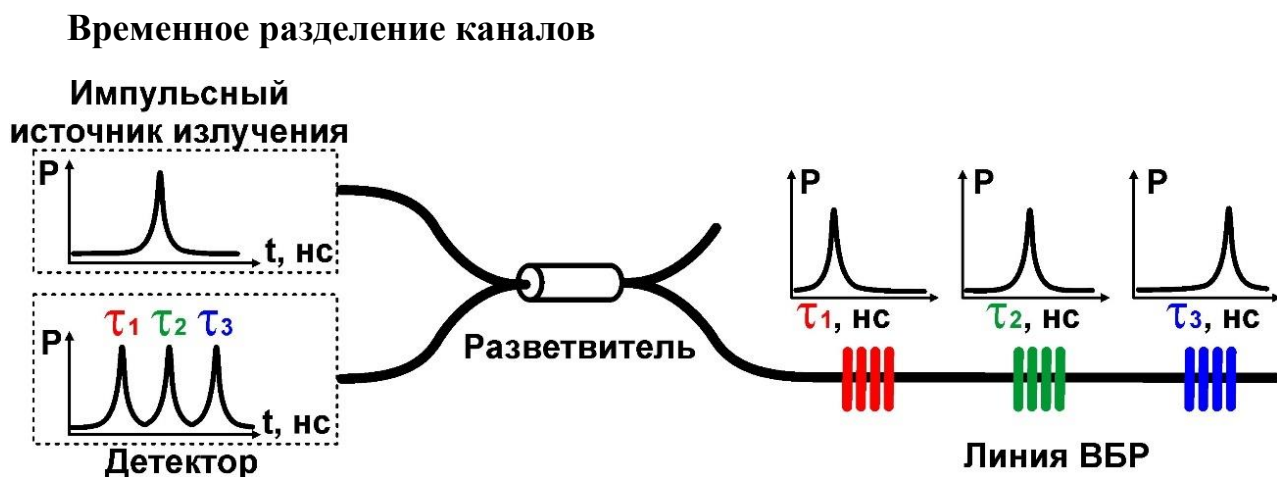


Рисунок 4 – Типичная система опроса ВБР с временным разделением откликов.

Схема временного разделения каналов представлена на рисунке 4. В основе временного разделения лежат принципы временной оптической рефлектометрии [29, 30]. Опрос ВБР осуществляется мощным коротким импульсом света, заведенным в волоконно-оптическую линию. В устройстве опроса детектируется отраженное излучение от разных ВОД, расположенных вдоль линии. В этом случае местоположение отражателя линейно связано со временем задержки между входным и отраженным сигналами. Для временной рефлектометрии характерно наличие диапазонов измерений, достигающих сотен километров, что делает их полезными для анализа длинных волоконно-оптических линий связи. При этом пространственное разрешение характеризуется как наименьшее расстояние между двумя различными отражающими событиями отражения, и обычно определяется

длительностью импульса оптического излучения. Для повышения пространственного разрешения необходимо уменьшать длительность зондирующего импульса, что приводит к снижению чувствительности рефлектометра к измеряемой мощности вследствие уменьшения отношения сигнал/шум. Увеличение пиковой мощности зондирующего импульса для увеличения отношения сигнал/шум ограничено нелинейными процессами в волокне [31], которые искажают измеряемый сигнал. В случае опроса ВОД излучение, отраженное от каждой из ВБР, будет иметь отличную временную задержку  $\tau_i$ , обусловленную удаленностью датчика от источника  $L_i$ , что позволяет различать каждый отдельный датчик [23]:

$$\tau_i = 2n \frac{L_i}{c}. \quad (4)$$

Основным преимуществом такой схемы является то, что каждая из ВБР может занимать одинаковое окно в диапазоне длин волн, т.е. общее количество датчиков не зависит от спектральной ширины импульсного источника излучения. Дальнейшее измерение изменения длины волны отражённого излучения для каждой ВБР может осуществляться различными методами, в том числе интерференционными, сканирующими фильтрами, наклонными фильтрами (более подробно будет описано далее в разделе про спектральное разделение). Основным недостатком такой схемы является взаимное влияние датчиков друг на друга в одном канале. При близко расположенных ВБР с высоким коэффициентом отражения наблюдается затенение соседних датчиков из-за высокого уровня отраженных сигналов [23]. Поэтому существуют серьезные ограничения из-за частичного затенения спектров отражения ВБР и последующие ошибки в результатах определения длины волны отражения. Максимальное рабочее расстояние, в случае временного разделения, ограничено потерями при передаче по волокну и может достигать десятков километров [23]. В этом случае основной проблемой может стать уменьшение уровня сигнала из-за постепенно снижающегося уровня опрашивающего сигнала из-за отражения от большого количества ВБР. Для решения этой проблемы необходимо использовать слабоотражающие ВБР. Например, в работах [32, 33] было продемонстрировано мультиплексирование с разделением по времени слабоотражающих ВБР-датчиков. При этом в работах показана высокая точность измерения центральной длины волны отражения ВБР, для более 80% датчиков составляет менее 20 пм, что соответствует температуре 2 °С.

Другая сложность в реализации системы с временным разделением связана со скоростью обработки отраженного сигнала, которая требуется для разделения сигналов, поступающих от каждого датчика. Например, для массива ВБР, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга, отражения будут приходить с интервалами  $\sim 20$  нс. Для решения этой проблемы применяют электрическое стробирование сигналов отражения [34]. Однако это накладывает требования к полосе пропускания в несколько десятков МГц, что увеличивает шум сигнала [34]. Альтернативой электрическому стробированию является оптическое стробирование - оптический модулятор используется для передачи только отражений для одной решетки в массиве. Получая сигнал отражения от отдельной выбранной решетки, можно извлекать измеренную длину волны датчика. Затем можно внести изменения в синхронизацию оптического модулятора, чтобы изолировано опросить следующий датчик в массиве, и таким образом получить данные со всей линии ВБР [22].

### **Спектральное разделение каналов**

Другой подход опроса ВОД основан на спектральном разделении каналов (Рис. 5). В схеме со спектральным разделением каналов ВБР изготавливаются с разными центральными длинами волн отражения. Опрос сенсорной системы со спектральным разделением каналов можно осуществить двумя основными подходами, основное различие между которыми состоит в последовательности выполнения спектральной селекции излучения: до (Рис. 5а) или после (Рис. 5б) ВБР.

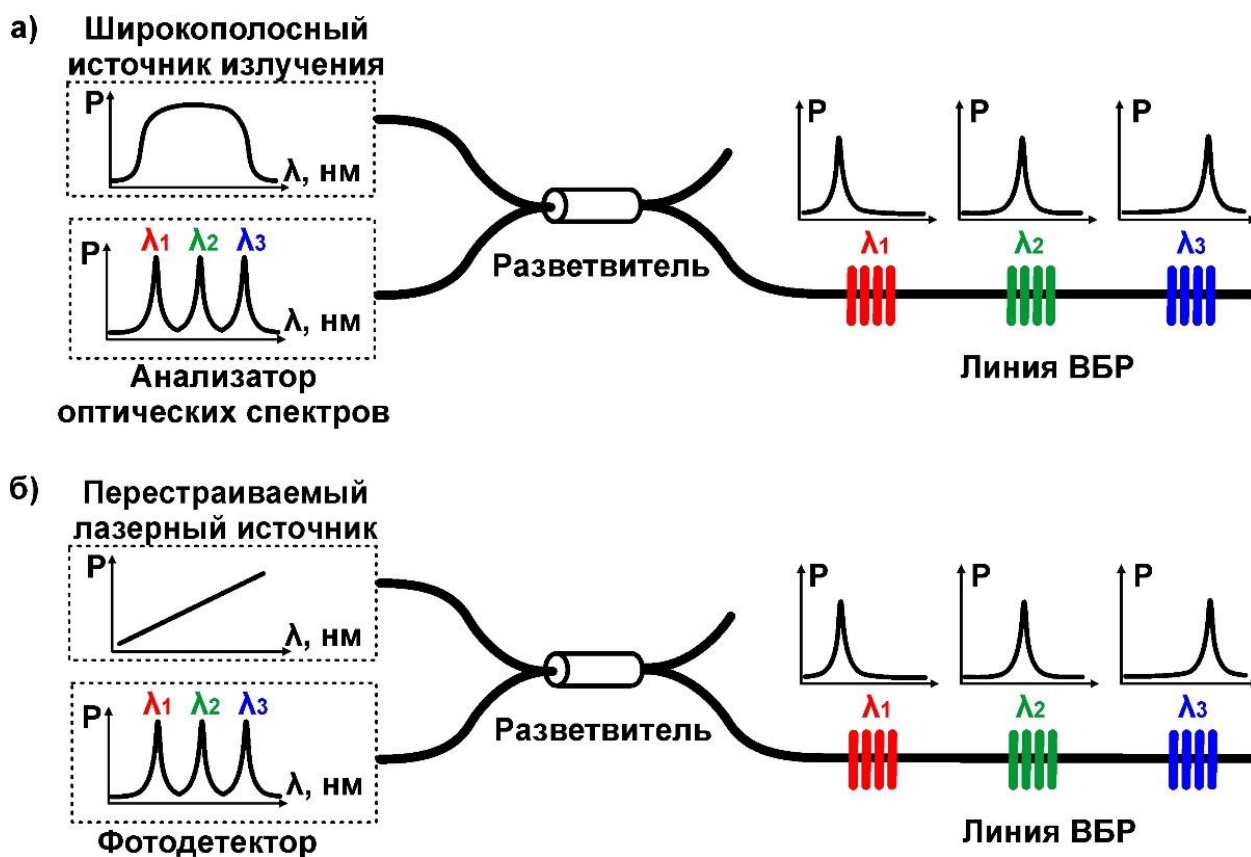


Рисунок 5 – Типичная система опроса ВБР со спектральным разделением.

Самым простым решением этой задачи является использование широкополосного источника излучения и последующей спектральной селекцией после отражения излучения от ВБР (Рис. 5а). Лобовым решением такой селекцией является использование анализатора оптического спектра [22]. Коммерчески доступные анализаторы обладают разрешением до 1 пм, что в диапазоне 1.5 мкм соответствует изменению температуры ВБР на 0.1 °С. Однако практическое применение таких приборов ограничено в силу их высокой стоимости. К примеру, в работе [5] показана схема спектрального разделения для линии последовательно соединенных ВБР. В качестве источника используются два широкополосных светодиода с длинами волн 1550 и 1300 нм, которые соединяются в одно волокно с помощью разветвителя WDM. Сигналы, отраженные от ВБР, через дополнительный разветвитель передаются на анализатор спектра для измерения длин волн отражения каждого отдельного датчика.

Также описаны схемы опроса ВБР, где селективным элементом является ИМЦ [35 - 37]. В линию ВБР датчиков поступает сигнал от широкополосного источника. Отраженные сигналы последовательно фильтруются и разделяются схемой на основе упорядоченной волноводной решетки с однородными полосами

пропускания и оптического переключателя. Далее, изолированные сигналы отражения попадают на несбалансированный ИМЦ. Калибровка и измерение абсолютной длины волны каждой ВБР происходит путем температурной регулировки ИМЦ с помощью АЦП. Сложность метода заключается в необходимости изолировать ИМЦ от вибрации и препятствовании передачи тепла между плечами во время тепловой настройки. Данная схема опроса показала возможность измерения абсолютной длины волны отражения ВБР с точностью до 20 пм (что эквивалентно  $\sim 2$  °С).

В работе [38] показана схема опроса ВБР на основе перестраиваемого фильтра Фабри-Перо. Схема состоит из широкополосного источника излучения, волоконной линии из 4 ВБР, циркулятора и фотодетектора. Отраженный от ВБР сигнал поступает на фотодетектор через перестраиваемый фильтр Фабри-Перо. Спектр пропускания фильтра изменяется под действием приложенной пилообразной волны управляющего напряжения и используется для определения длин волн Брэгга с помощью аппроксимации кривой Гаусса. Длина волны каждой ВБР из массива была определена с точностью 12 пм. Характеристики схемы опроса возможно улучшить, используя температурную компенсацию фильтра Фабри-Перо, и за счет улучшения отношения сигнал/шум в спектре отражения ВБР.

Другим подходом является использование перестраиваемого лазерного источника и детектора (Рис. 56). В данном случае селекция длины волны осуществляется источником [39]. Количество датчиков в таких схемах ограничено диапазоном излучения источника. Поскольку каждый из датчиков занимает отдельное спектральное окно, реализация системы опроса с разделением по длине волны всегда является компромиссом между количеством ВБР-датчиков и их рабочим диапазоном. Для опроса каждой ВБР требуется диапазон длин волн для регистрации измеряемой величины. Например, при диапазоне измерения температуры от 0 до 100 °С и типичных значениях сдвига длины волны отражения ВБР в зависимости от температуры  $\sim 0.01$  нм/К, для опроса 10 ВБР необходим диапазон перестройки 10 нм. Это является ограничивающим фактором, поскольку увеличение числа датчиков требует увеличения диапазона перестройки источника. В качестве решения этой проблемы можно использовать схемы с параллельным соединением нескольких одинаковых линий ВБР [40]. Возможность измерения деформации в схеме со спектральным разделением датчиков с помощью перестраиваемого лазера была представлена в ряде работ. В



[41] качестве перестраиваемого источника используется волоконный эрбиевый кольцевой лазер с перестраиваемым с помощью напряжения фильтром Фабри-Перо. Линия состояла из 10 последовательно соединенных ВБР с длинами волн от 1541.25 до 1562.4 нм и коэффициентами отражения 80-99%. Отраженный от линии датчиков сигнал поступал на детектор. Была продемонстрирована возможность измерения деформации с чувствительностью 1.19 пм/мк.

К общим недостаткам метода со спектральным разделением можно также отнести сложность изготовления ВБР-датчиков с разными центральными длинами волн, поскольку необходимо изготавливать множество фазовых масок, либо использовать интерференционные методы, что накладывает высокие требования к пространственной когерентности оптического излучения источника, а также возникает необходимость использования спектроанализатора или лазера с широким диапазоном перестройки. Несмотря на указанные минусы, метод спектрального разделения каналов демонстрируется в ряде работ для опроса систем ВБР датчиков [13, 23, 27, 28, 43].

### **Гибридные схемы**

Существуют также и гибридные схемы опроса, использующие преимущества спектрального и временного разделения одновременно. Например, в работе [44] линия образована одинаковыми группами ВБР, причем каждая группа содержит ВБР с разными длинами волн для обеспечения спектрального разделения каналов. Группы датчиков отделены друг от друга отрезками волокна, для формирования временной задержки. Линия опрашивается широкополосным импульсным источником, излучение которого заводится в линию. Как и в методе временного разделения каналов, временная задержка от каждой из ВБР будет определять удаленность от источника. Таким образом, отраженные от линии импульсы содержат информацию от всех ВБР. При этом временная задержка позволяет определить, от какой из групп датчиков получен сигнал, а спектральный анализ позволяет разделить сигналы от каждой из ВБР. Основным преимуществом является то, что комбинация двух методов мультиплексирования, позволяет увеличить количество сенсорных элементов, к которым можно обратиться.

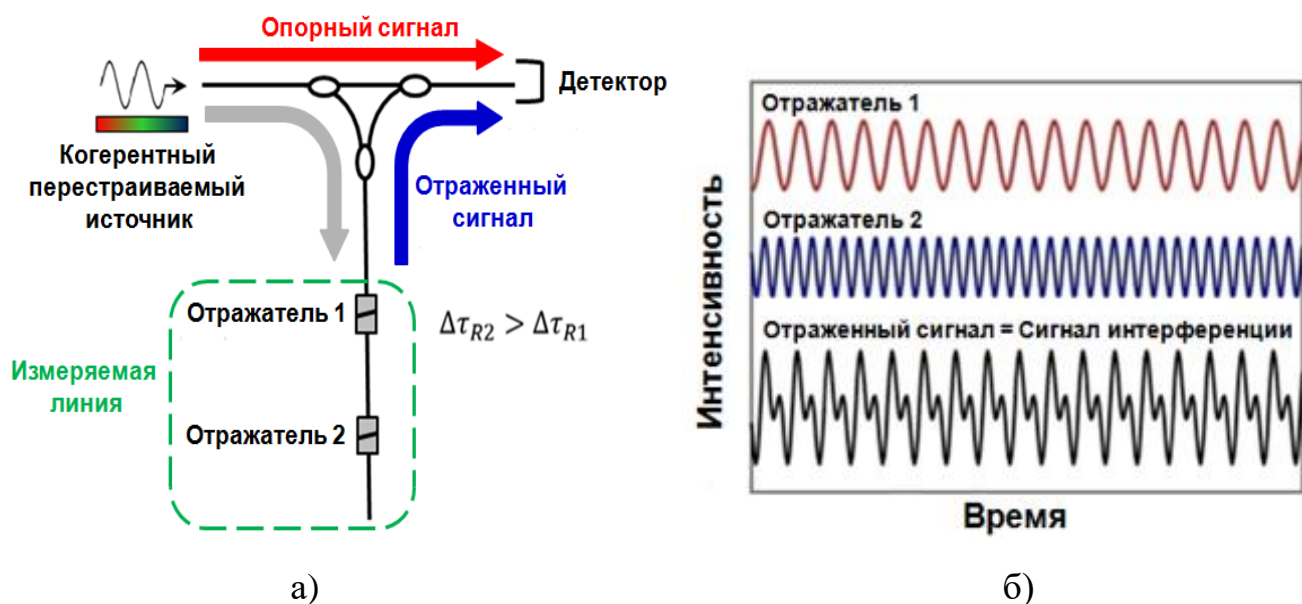


Рисунок 6 – а) схема когерентного оптического частотного рефлектометра, б) сигналы интерференции от двух отражателей.

Как уже упоминалось выше, в основе временного разделения лежит принцип временной оптической рефлектометрии. В этом случае пространственное разрешение определяется длительностью зондирующих импульсов. Для случаев, когда требуется более высокое разрешение, применяются метод когерентной оптической частотной рефлектометрии (КОЧР) (англ. Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR) [45, 46]. КОЧР близка по своей сути к схеме спектрального разделения каналов. Однако, КОЧР является интерферометрическим методом измерений, что позволяет определять положение ВБР в линии, в отличие от метода спектрального разделения. Принцип работы основан на спектральном анализе интерференционного сигнала, возникающего при смешении зондирующего и рассеянного излучений. Данный анализ может осуществляться при перестройке оптической частоты зондирующего излучения. Анализ интерференционной картины производится с помощью преобразования Фурье. В этом случае пространственная координата отражателей, расположенных вдоль исследуемой линии, пропорциональна частотной координате максимумов Фурье-спектра от измеренного в процессе перестройки оптической частоты интерференционного сигнала. Метод КОЧР является оптимальным при решении задач, требующих сочетания высокой скорости, чувствительности и разрешения при анализе коротких и промежуточных длин линий передачи [47, 48, 49, 50].

Принципиальная схема КОЧР (Рисунок 6а) состоит из высококогерентного лазерного источника излучения с непрерывно перестраиваемой длиной волны,

интерферометра с тестируемой волоконной линией и фотодетекторов. Излучение от источника поступает в измерительную схему и разделяется первым разветвителем на два канала. Первая часть излучения без изменений проходит к третьему разветвителю и называется опорной. Вторая часть поступает в тестируемое волокно, где отражается от дефектов линии и поступает на третий разветвитель. При этом наблюдается сигнал интерференции (Рисунок 6б), период модуляции которого определяется удаленностью отражателя от источника, а глубина модуляции определяется величиной отражения. Ключевым элементом когерентного оптического частотного рефлектометра является перестраиваемый источник излучения, обладающий большой длиной когерентности. В этом случае пространственное разрешение  $\delta l$  определяется диапазоном перестройки длины волны  $\Delta\nu$  зондирующего лазера:

$$\delta l = c/2n\Delta\nu, \quad (5)$$

где  $n$  - показатель преломления волокна,  $c$  - скорость света.

Максимальная длина линии  $L_{\text{макс}}$  ограничена частотой дискретизации  $\delta\nu$  измеряемого сигнала. Она связана с проявлением эффекта стробирования, когда шаг оцифровки становится больше частоты модуляции оцифровываемого сигнала, растущей с увеличением разности плеч интерферометра. Максимальная длина линии оценивается как:

$$L_{\text{макс}} = c/(2n \cdot \delta\nu). \quad (6)$$

Для примера коммерческий оптический частотный рефлектометр OBR 4600 производителя LUNA имеет пространственное разрешение 10 мкм при длине измеряемой линии 30 м.

Таким образом, КОЧР сочетает в себе достоинства временного и спектрального разделения при опросе ВОД на основе ВБР – позволяет определить положение и спектр ВБР датчика независимо от топологии сенсорной линии. Помимо стандартного применения, т.е. диагностики волоконно-оптических линий, в настоящее время КОЧР рассматривается как инструмент опроса ВОД [51]. Высокая чувствительность такого рефлектометра к коэффициенту отражения (лучше, чем -120 дБ/мм) позволяет характеризовать замороженные в оптическое волокно неоднородности показателя преломления. В частности, это свойство позволяет использовать характерные для обычного оптического волокна малые замороженные флуктуации показателя преломления для различных сенсорных

задач [52, 53]. Другими словами, обычное волокно может выступать чувствительным элементом ВОД.

Существуют примеры работ, где опрос ВБР, формирующих квази-распределенные сенсорные линии осуществляется с помощью КОЧР. В этом случае несколько одинаковых ВБР записываются в одном волокне, которые могут быть проанализированы с помощью одной системы опроса [54, 55]. КОЧР позволяет восстанавливать отраженные спектры каждой отдельной ВБР из массива, даже если их длины волн отражения совпадают. Так, например, есть работы, где в схеме КОЧР опрашивался массив идентичных ВБР для определения влияния осевой деформации [56] или изменений температуры. К примеру, в работе [57] производился опрос линии из 10 ВБР с длиной волны отражения вблизи 1583.7 нм и коэффициентом около 10%. Две ВБР одновременно подвергались температурным изменениям между комнатной температурой и 100 °С с шагом 10 °С. Остальные восемь решеток оставались при температуре окружающей среды. При этом наблюдалось хорошее совпадение эталонных и измеренных значений, а максимальная погрешность измеренных температур была около 2 °С. Среднее значение погрешности, рассчитанное из данных 1000 выборок, равна 14.2 пм, что соответствует температурной погрешности около 1.4 °С.

Также стоит отметить, что КОЧР применяется в широком спектре различных приложений, например для определения характеристик оптических компонентов и модулей с субмиллиметровым разрешением [58], для измерения распределенного двулучепреломления [59] в одномодовых волокнах и волокон, сохраняющих поляризацию [60], для биомедицинской визуализации тканей человека с использованием диапазона перестройки длины волны около 70 нм в области 1300 нм [61], а также в системе визуализации офтальмологии, работающей в области 1050 нм [62].

Исходя из обзора методов опроса ВБР, можно сказать, что для ряда подходов опроса датчиков на основе ВБР таких как спектральное разделение каналов и КОЧР требуются источники перестраиваемого излучения. Далее рассмотрим более подробно, как можно получать перестраиваемое по длине волны излучение.

### **Лазеры с перестройкой длины волны**

На сегодняшний день существует множество исследований, посвященных разработке перестраиваемых лазерных источников с целью создания устройств

опроса ВОД. Однако, стоит отметить, что практически во всех этих работах применяются перестраиваемые спектральные элементы, которые управляются либо вручную, либо внешней электроникой. К примеру, для получения перестраиваемых лазеров используются коммерчески доступные волоконные интерферометры Фабри-Перо [63, 64, 65]. Они обладают высокой селективностью, возможностью быстрой перестройки с помощью пьезоэлементов и сравнительно низкими вносимыми потерями. Однако, стоит заметить, что их применение возможно только в сложносоставной кольцевой схеме, так как такое устройство имеет узкие интерференционные полосы в пропускании. Иным методом является использование перестраиваемых ВБР, которые позволяют получить достаточно большой диапазон перестройки, однако они ограничены в скорости перестройки, так как перестройка длины волны возможна только за счёт растяжения/сжатия волокна или температурной подстройки [66, 67, 68]. Также известны работы, в которых перестройка частоты осуществляется благодаря дифракционным решеткам [69] или за счет модуляции параметров лазера, как, например, тока в работе [70]. Сравнение характеристик для разных методов получения перестраиваемого излучения представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики основных методов перестройки волоконных лазеров.

Фильтр	Диапазон перестройки, нм	Ширина линии	Частота перестройки, кГц
Интерферометр Фабри-Перо [65]	>100	0.7 кГц	100
Перестраиваемые ВБР [66]	40	0.07 нм	~2
Дифракционные решетки [69]	90	0.15 нм	18
Модуляция тока [70]	80	0.45 нм	10

Также перестройку длины волны можно получать и в не волоконных схемах. Наиболее распространенным и коммерчески доступным является лазерный диод с внешним резонатором. Однако в данном типе лазеров наблюдаются скачки режима, которые обычно подавляются только в ограниченной части диапазона настройки, вызывая значительное ухудшение восстановленных спектров ВБР [71].

Также, для корректировки фазы сигнала источника может использоваться подстрочный интерферометр [45].

Во всех этих случаях для перестраиваемых лазеров также необходим управляющий драйвер, который задает управляющий электрический сигнал. Стоит отметить, что управляющий драйвер совместно с перестраиваемым спектральным фильтром являются достаточно дорогостоящими элементами, что приводит к увеличению стоимости как перестраиваемого лазера, так и всего устройства опроса ВОД. На сегодняшний день коммерчески доступные устройства опроса для ВБР датчиков, использующие перечисленные выше схемы, обладают разрешением до 1 пм, что в диапазоне 1.5 мкм соответствует изменению температуры 0.1 °С, но практическое применение таких приборов ограничено в силу их высокой стоимости [21].

Таким образом, можно резюмировать, что для всех рассмотренных ранее перестраиваемых лазеров требуется драйвер для управления частотой генерации перестраиваемого фильтра. Однако есть работы [72, 73, 74, 75, 76, 77, 78], в которых показано, что перестройка лазерной частоты может происходить без управляющего драйвера. Например, подобная перестройка частоты происходит в лазерах с самоиндуцированным сканированием (для краткости самосканированием) частоты/длины волны. Эффект самосканирования длины волны генерации лазера был обнаружен впервые через несколько лет после создания первого рубинового лазера [73]. Из-за небольшого и нестабильного диапазона сканирования (около 0.1 нм) эффект считался паразитным, поэтому были разработаны различные методы для его устранения [79]. В волоконных же лазерах эффект был обнаружен всего несколько лет назад [74, 75]. Самосканирование частоты связано с формированием динамических решеток коэффициента усиления и показателя преломления из-за эффекта выжигания дыр стоячей волной в линейном резонаторе [76]. Долгоживущие решетки, индуцированные генерируемыми продольными модами, влияют на выход в генерацию новых мод, что приводит к динамике спектра генерации. Динамика интенсивности лазера состоит из квазипериодических микросекундных импульсов. При этом возможно получение режима работы, когда каждый импульс соответствует одной продольной моде со спектральной шириной не более 1 МГц [76]. Надо отметить, что оценка на ширину линии связана с небольшим изменением оптической частоты за время генерации одного импульса (т.н. частотный чирп). Ожидается, что реальная мгновенная ширина линии меньше,

чем величина частотного чирпа. Даже в этом случае длину когерентности лазера можно оценить как  $\sim 200$  метров. Оптическая частота лазера изменяется между импульсами на величину, пропорциональную области свободной дисперсии (ОСД) лазерного резонатора  $\sim$  нескольких МГц до нескольких десятков МГц.

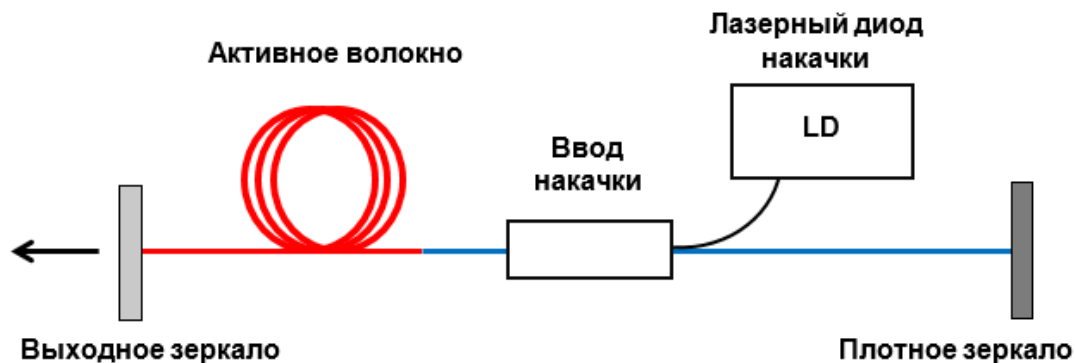


Рисунок 7 – Схема волоконного лазера с самосканированием частоты.

На рисунке 7 изображена типичная схема волоконного лазера с самосканированием частоты. Как видно, она мало отличается от схемы классического волоконного лазера и состоит из источника накачки, активной среды и линейного резонатора. Область самосканирования определяется типом активного волокна. Одними из наиболее изученных являются иттербиевые лазеры с генерацией вблизи 1 мкм [74, 75, 76]. Также эффект самосканирования в волоконных лазерах уже удалось наблюдать в висмутовом лазере в области 1.46 мкм [80], в эрбиевом лазере в области 1.55-1.6 мкм [77, 81, 82], в тулий-гольмиевом лазере в области 1.9 мкм [83], в гольмиевом лазерах в области 2.1 мкм [84]. Таблица 2 демонстрирует сравнение различных типов самосканирующих лазеров.

Таблица 2 – Сравнительная таблица самосканирующих лазеров на основе различных легирующих добавок.

Параметр сканирования	Иттербий [76]	Висмут [80]	Эрбий [81]	Тулий-гольмий [83]	Гольмий [84]
Область, мкм	1	1.46	1.55-1.6	1.9	2.1
Диапазон, нм	20	10	2.8	17	10
Скорость, нм/с	1	0.36	0.8-6	0.4-1.5	0.7

Для примера на рисунке 8 изображена характерная динамика длины волны иттербиевого самосканирующего лазера. Диапазон самосканирования

определяется как абсолютная разность между стартовым и конечным значениями длины волны, является одной из ключевой характеристик самосканирующих лазеров. На рисунке 8 диапазон самосканирования составляет порядка 20 нм. Как результат, можно заключить, что самосканирующий лазер представляет собой высококогерентный (ширина спектра  $<1$  МГц) широкоперестраиваемый источник излучения, который может составить конкуренцию обычным перестраиваемым лазерам на основе перестраиваемых фильтров и управляющих драйверов. В частности, можно ожидать, что подобные источники могут быть использованы для опроса ВОД на основе ВБР. На момент начала диссертационной работы этот вопрос был открыт.

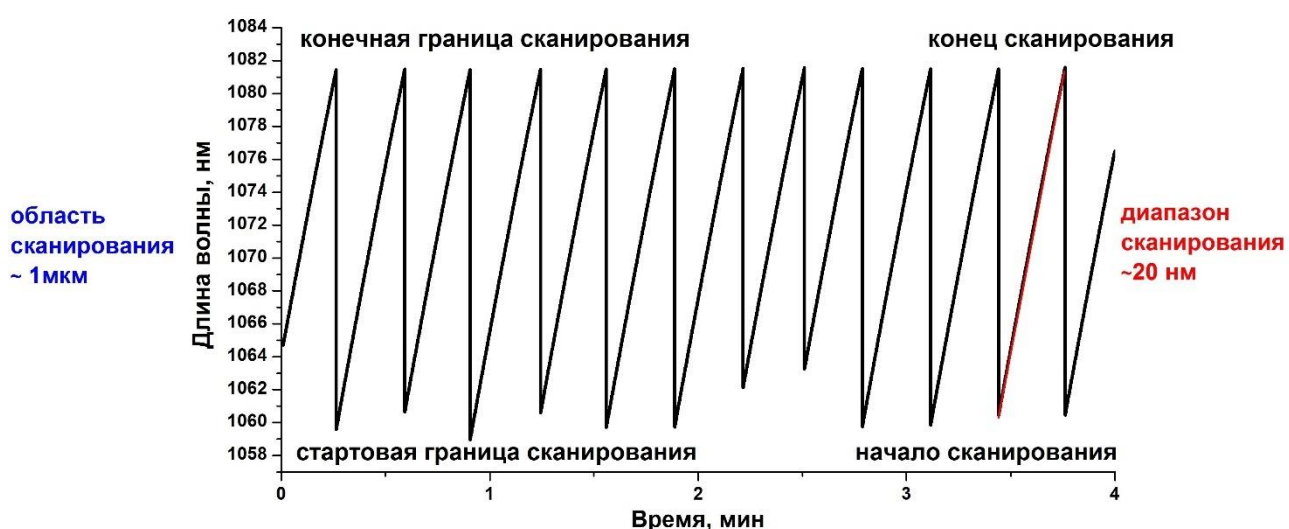


Рисунок 8 – Характерная динамика длины волны иттербиевого самосканирующего лазера.

Несложно понять, что для применения самосканирующего волоконного лазера в схемах опроса большого количества ВОД на основе ВБР требуется как можно большее значение диапазона сканирования. Можно отметить, что на момент начала диссертационной работы наибольший диапазон сканирования составлял ~16 нм [75] и был получен в области 1 мкм. В настоящее время, рекордным значением диапазона сканирования является 26 нм, достигнутый в тулиевом лазере [85]. К сожалению, самосканирование длины волны в наиболее востребованной области для опроса ВБР датчиков ~1.55 мкм имеет достаточно малый диапазон ~3 нм. Диапазон сканирования определяется множеством факторов, таких как ширина контура усиления активной среды, ширина спектров отражения/пропускания используемых в резонаторе элементов, характер



насыщения усиления активной среды и т.д. В свою очередь эти параметры во многом определяются используемыми в лазере элементами. Можно ожидать, что комплексная оптимизация резонатора позволит увеличить диапазон сканирования. Также на момент начала диссертационной работы эксперименты показывали, что границы диапазона сканирования флуктуируют от одного сканирования к другому (см, например, Рис. 8). Это связано с неконтролируемым характером процесса самосканирования. В свою очередь этот факт усложняет практические применения подобных лазеров. В частности, для задачи опроса ВОД на основе ВБР требуется источник со стабильным диапазоном сканирования.

Другой проблемой для практического применения самосканирующего лазера является импульсный характер излучения. Импульсы лазера не являются строго эквидистантными во временной области и также имеют флуктуации мощности, что усложняет обработку измеряемых данных.

Важным достоинством самосканирующего лазера помимо его простоты является тот факт, что один импульс во временной области соответствует одной определенной оптической частоте, и, как результат, все импульсы являются эквидистантными в частотной области, поскольку оптическая частота изменяется между импульсами на величину, пропорциональную ОСД резонатора.

Исходя из проблем, поставленных перед началом **диссертационной работы, ее целью** является разработка и исследование устройств опроса волоконно-оптических датчиков на основе самосканирующего волоконного лазера.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Исследовать влияние параметров элементов схемы лазера на диапазон самосканирования и определить оптимальные значения для получения максимального диапазона сканирования; исследовать методы управления спектральными диапазоном для требуемой спектральной области;
- Разработать и реализовать методы стабилизации границ диапазона сканирования;
- 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.

Поставленные задачи решались на примере иттербиевого самосканирующего лазера. Этот факт связан со следующими причинами. Во-первых, на момент начала диссертационной работы для иттербиевых лазеров был получен наибольший диапазон сканирования. И, как упоминалось ранее, только относительно недавно была продемонстрирована работа [85] самосканирующего тулиевого лазер с диапазоном сканирования, превышающим 26 нм в области 1.92 мкм. При этом следует отметить большую доступность элементной базы (волокна и компоненты) для спектральной области 1 мкм по сравнению с 2 мкм. Несмотря на это, можно ожидать, что рассмотренные в работе подходы могут быть перенесены на волоконные лазеры на основе других редкоземельных элементов (тулий, эрбий).

Поставленная цель является **актуальной**, что связано со следующими причинами. ВОД на основе ВБР позволяют создавать систему диагностики и мониторинга текущего технического состояния различных технических устройств. При этом ключевой элемент устройства опроса волоконной сенсорной системы – перестраиваемый лазер – является достаточно сложным и дорогостоящим прибором из-за необходимости в активном перестраиваемом элементе и управляющем драйвере к нему. В свою очередь лазеры, работающие на эффекте самосканирования частоты, обладают простой схемой и являются альтернативой лазеру с активной перестройкой длины волны, поскольку не нуждаются в управляющем драйвере и спектральном селекторе. Это значительно упрощает схему. Однако, существуют проблемы, связанные с природой эффекта самосканирования. Отсутствие строгой временной эквидистантности импульсов генерации накладывает определенные условия при обработке данных в практических применениях. Границы диапазона самосканирования имеют достаточно большие флуктуации, что также усложняет практическое применение подобных лазерных источников. Поэтому задачи по исследованию и разработке самосканирующего лазера и созданию схем опроса ВОД на его основе систем являются актуальными.

**К научной новизне работы** можно отнести следующие моменты:

- 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 лазеров.

- Продемонстрировано использование волоконного самосканирующего лазера в качестве перестраиваемого источника 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.

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

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

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.

**Апробация работы:** Основные результаты работы лично докладывались на:

1. Российский семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, Россия, 2016;
2. International Conference Laser Optics (ICLO), Санкт-Петербург, Россия, 2017;
3. SPIE/COS Photonics Asia, Пекин, КНР, 2018.
4. 8th Optics and photonics international congress (ОПИС), Япония, Иокогама, 2019;
5. 7th European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS), Лимасол, Кипр, 2019;
6. Всероссийская конференция по волоконной оптике, Пермь, Россия, 2019.

**Личный вклад:** 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 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 2 – в тезисах докладов.

**Объем и структура работы:** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 104 страницы, включая 50 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 105 наименований.

Настоящая работа имеет следующую структуру:

Глава 1 посвящена исследованию влияния характеристик элементов лазера (длина активного световода и потери на выходном зеркале) на спектральную область сканирования. Определены параметры элементов, позволяющие получить максимальный диапазон сканирования. Также исследовано влияние температуры активного световода и длины волны лазерного диода накачки на область сканирования. Предложены методы управления спектральным положением области сканирования.

В главе 2 рассмотрены методы стабилизации границ диапазона сканирования, которые позволяют повысить предсказуемость перестройки длины волны генерации волоконных самосканирующих лазеров. С помощью предложенных методов удалось уменьшить флуктуации границ диапазона сканирования на один-два порядка.

В продолжении работы в главе 3 демонстрируется применение 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.

## 1. Оптимизация и управление спектральной областью сканирования

### 1.1 Влияние характеристик компонент на спектральную область сканирования

Одной из ключевых характеристик перестраиваемых (самосканирующих, в частности) лазеров является диапазон сканирования (Рис. 8). Например, для применения самосканирующего волоконного лазера для опроса большого количества ВОД на основе ВБР требуется как можно большее значение диапазона сканирования. Поэтому ставится задача о поиски схем лазеров с наибольшим диапазоном сканирования. На момент начала диссертационной работы была известна только одна работа [86], в которой исследуется зависимость спектральных характеристик от температуры лазерного диода накачки. В частности, было установлено, что с изменением температуры изменяется как диапазон сканирования, так и скорость сканирования. В работе приводятся экспериментальные результаты без их объяснения.

В настоящей главе описано комплексное исследование влияния характеристик элементов лазера (длина активного световода и потери на выходном зеркале) на спектральную область сканирования, в том числе на диапазон сканирования. Также исследовано влияние температуры активного световода и температуры лазерного диода на область сканирования. Предложено качественное объяснение полученных результатов.

#### 1.1.1 Влияние длины активного волокна

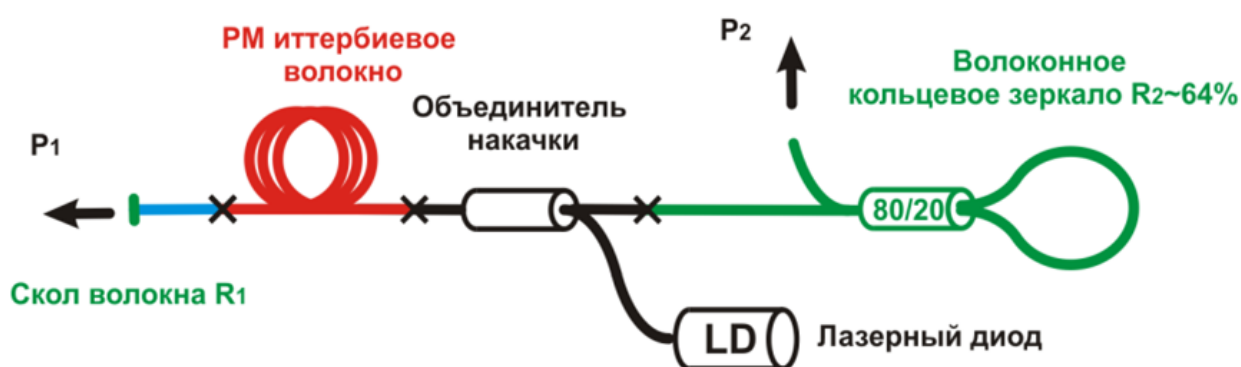


Рисунок 9 – Схема самосканирующего волоконного иттербиевого лазера при исследовании влияния длины активного волокна и общих потерь в резонаторе.

В качестве отправной точки в работе была выбрана схема иттербиевого волоконного лазера с самосканированием частоты, изображенная на рисунке 9 [87]. Одна из задач, поставленных в работе, заключалась в получении широкого диапазона сканирования. Не сложно понять, что на диапазон сканирования должны влиять спектрально-селективные свойства элементов резонатора, в частности зеркал. Можно предположить, что максимальное значение диапазона сканирования достигается для резонатора с плоской спектральной характеристикой разности усиления и потерь. По этой причине, в большинстве работ по исследованию самосканирующих лазеров применяются широкополосные отражатели в виде торцов волокна с отражением Френеля или волоконные кольцевые зеркала. В данной работе резонатор лазера был образован широкополосным плотным (коэффициент отражения  $R_2=64\%$ ) кольцевым зеркалом на основе волоконного разветвителя 80/20 и конца волокна, сколотым под прямым углом ( $R_1=4\%$ ), в качестве выходного зеркала. В качестве активной среды использовалось иттербиевое волокно с двойной оболочкой и сохранением поляризации марки Nufern PM-YDF-5/130. Накачка активной среды осуществлялась в оболочку с помощью многомодового лазерного диода мощностью до 9 Вт через объединитель накачки типа  $(2+1)\times 1$ . Длина активного волокна варьировалась от 0.3 до 4.3 м. Спектральная динамика выходного излучения изучалась с помощью быстрого спектрографа LSA (Laser Spectrum Analyzer, Angstrom/HighFinesse). Также измерялась выходная мощность с двух концов  $P_1$  и  $P_2$ . Стоит отметить, что при варьировании мощности накачки изменялась как скорость сканирования, так и диапазон сканирования. Для каждой длины активного волокна подбиралась мощность накачки, при которой наблюдался максимальный диапазон сканирования. При этом измерялись мощность накачки, значения стартовой и конечной границ сканирования (см, для примера, Рис.8).

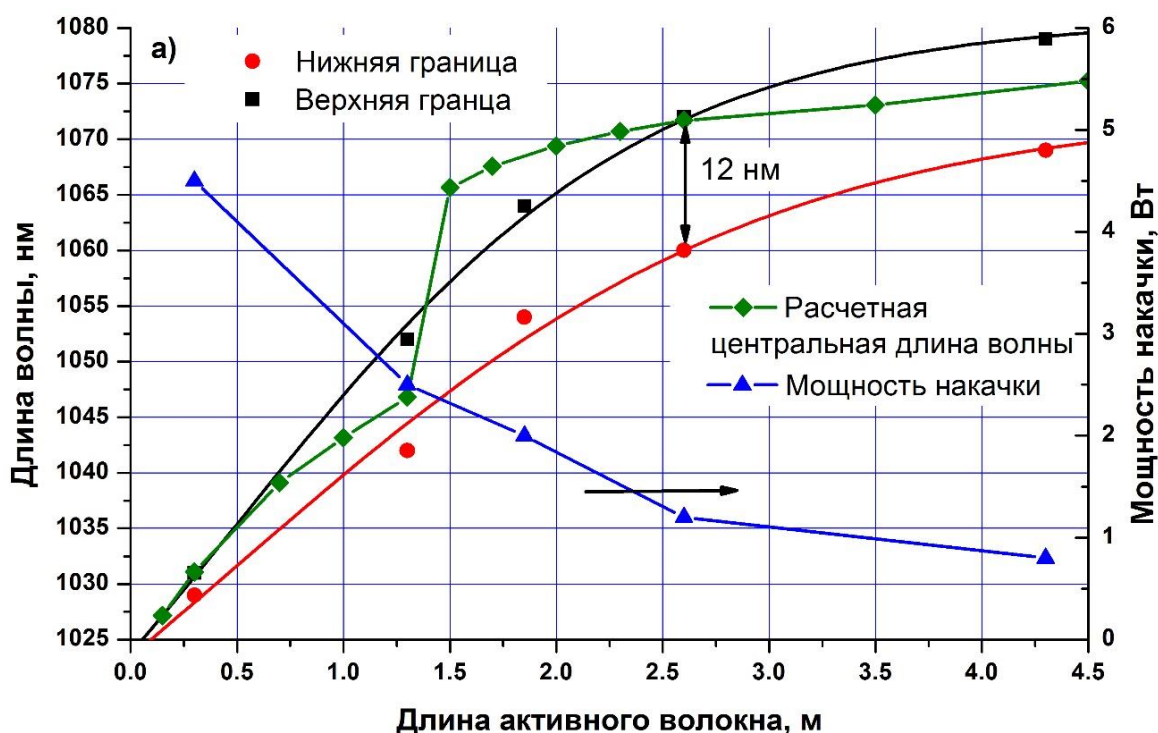


Рисунок 10 – Зависимость области сканирования от (а) длины активного световода. Черными квадратами показаны значения верхней границы сканирования, красными точками показаны значения нижней границы сканирования, также синими треугольниками показана мощность накачки, при которой наблюдался максимальный диапазон сканирования.

Полученные результаты представлены на рисунке 10. Из полученных данных видно, что с уменьшением длины активного волокна наблюдается как уменьшение диапазона сканирования, так и смещение области сканирования в коротковолновую область. Последний результат хорошо согласуется с хорошо известным фактом о смещении контура усиления иттербия в коротковолновую область при увеличении однородности распределения излучения накачки в активной среде [88], которая увеличивается с уменьшением длины активного волокна. Также на рисунке 10 видно, что мощность накачки, при которой наблюдается режим самосканирования частоты, уменьшается с увеличением длины активного световода. Это означает, что длинные отрезки волокна прокачены меньше, чем короткие, что и приводит к более длинноволновой генерации. С другой стороны, при достаточно большой длине световода, область сканирования меняется слабо, так как однородность распределения накачки практически не меняется. Таким образом, на рисунке 10 можно выделить две области: линейный рост длины волны генерации (до 2-3 метров) и область стабилизации (более 3 метров). Также стоит отметить, что диапазон сканирования

существенно уменьшается для маленьких длин волокна. Это можно связать с тем, что контур усиления сужается для более прокаченных световодов [88]. В качестве оптимальной длины активного волокна было выбрано значение 2.6 м, при котором было получено максимальное значение диапазона сканирования от 1060 до 1072 нм.

Для качественного описания полученных результатов необходимо рассмотреть профиль спектра усиления вблизи порога генерации. Хорошо известно, что коэффициент усиления в дБ линейно зависит от поглощенной мощности накачки  $P_a$  и длины активного волокна  $l$  [89, 90]:

$$g = 4.34 \left[ \frac{\phi_p (\sigma_e + \sigma_a) \tau P_a \Gamma_s}{A h \nu_p} - N \sigma_a l \Gamma_s \right], \quad (7)$$

где  $P_a$  - поглощенная мощность накачки,  $l$  - длины активного волокна,  $\sigma_a$  и  $\sigma_e$  - сечения поглощения и излучения соответственно (данные взяты из работ [91,92]);  $\phi_p = \nu_s/\nu_p \sim l$  - квантовая эффективность накачки;  $\tau$  - время жизни верхнего уровня,  $A = 33 \text{ мкм}^2$  - площадь сердцевины,  $h$  - постоянная Планка,  $\nu_p$  и  $\nu_s$  - частота накачки и частота сигнального лазера соответственно,  $N=1,12 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  - общая концентрация ионов  $\text{Yb}^{3+}$  для волокна Nufem PM-YDF-5/130,  $\Gamma_s$  - интеграл перекрытия, который учитывает поперечное перекрытие генерируемой моды с ионами легирующей примеси.

По оценкам, общие потери в резонаторе за один обход составляют порядка  $-18$  дБ и складываются из потерь  $\sim -1.5$  дБ на сварках и объединителе накачки и потерь резонатора  $10 \log(R_1 R_2) = -16$  дБ, состоящих из потерь на выходном зеркале  $(1-R_1)$ , образованном выходным разветвителем и прямым сколом волокна и потерь в волоконном кольцевом зеркале  $(1-R_2)$ . Расчетные профили усиления для некоторых длин активного волокна при фиксированных потерях на один обход в резонаторе  $-18$  дБ представлены на рисунке 11. Из рисунка 11 видно, что для волокон длиной короче 1.3 м преобладают относительно узкие пики вблизи 1025-1040 нм. При этом для волокон длиннее 1.3 м преобладают относительно узкие пики около 1070 нм. На длине 1.3 м можно увидеть переход между пиками, когда коэффициент усиления имеет относительно широкий спектр с плоской вершиной в диапазоне длин волн от 1045 до 1067 нм. Также видно, что диапазон самосканирования становится значительно меньше для коротких отрезков волокна. Это может быть связано с узким спектром усиления для коротких волокон (Рисунок 10, розовый график).



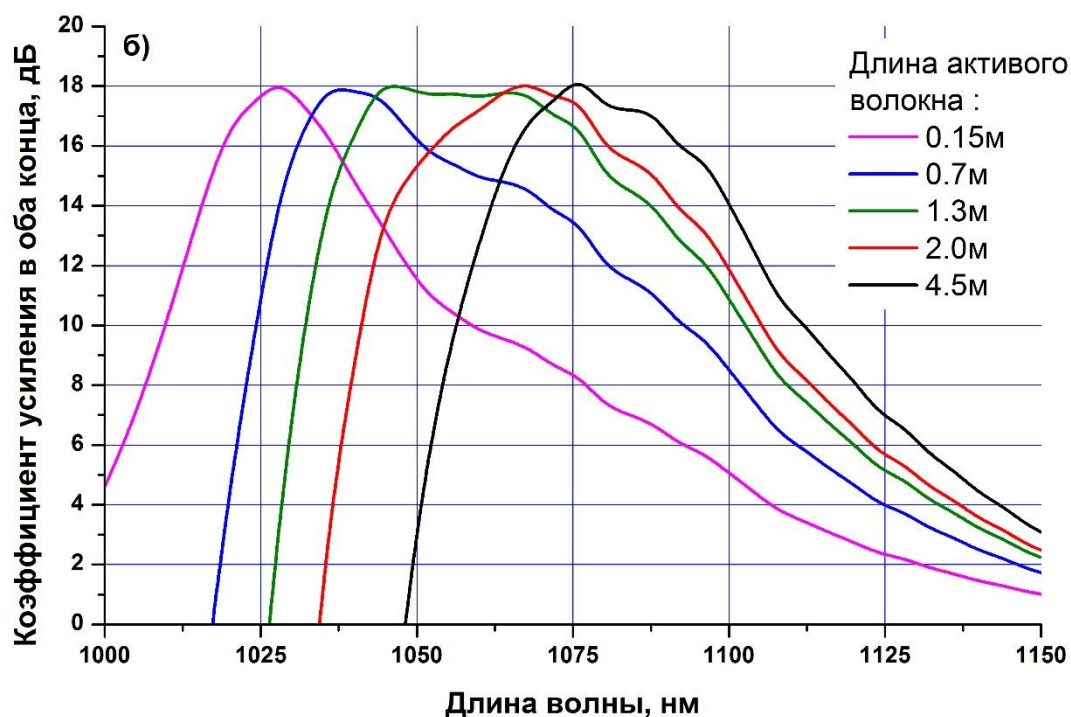


Рисунок 11 – Расчетный профиль усиления для различной длины активного волокна при фиксированном уровне потерь в резонаторе  $-18$  дБ.

Можно отметить, что экспериментальные данные на рисунке 10 не демонстрируют широкого самосканирования именно при такой длине активного волокна  $\sim 1.3$  метра. Одной из возможных причин отличия от эксперимента является более высокий уровень мощности накачки, поскольку для простоты спектры усиления в расчетах рассматривались вблизи порога генерации. Увеличение поглощенной мощности накачки приведет к уменьшению расчетной длины волны, при которой достигается максимальное усиление и увеличение активной длины волокна, соответствующей спектру усиления с плоской вершиной. Другой возможной причиной наблюдаемых разногласий является ограниченная точность используемых сечений поглощения и излучения и параметров волокна.

### 1.1.2 Влияние общих потерь в резонаторе

Далее было исследовано влияние общих потерь в резонаторе на диапазон самосканирования частоты. Схема установки, используемая в данном эксперименте, не отличается от предыдущего эксперимента и изображена на рисунке 9. Так как основные потери в резонаторе обеспечиваются слабоотражающим сколом волокна, то в качестве параметра для управления

добротностью резонатора было выбрано значение отражения от скола волокна. Хорошо известно, что излучение, отраженное из-за эффекта Френеля от сколотого под прямым углом торца волокна, распространяется назад по сердцевине. С увеличением угла скола эффективный коэффициент отражения в сердцевину экспоненциально уменьшается [92]. В эксперименте выходной торец волокна скалывался, угол скола определялся по изображению на сварочном аппарате Fujikura FSM-45PM. Кроме того, для определения эффективного коэффициента отражения измерялись выходные мощности с двух сторон  $P_1$  и  $P_2$ . Коэффициент отражения слабоотражающего выходного зеркала ( $R_1 \ll 1$ ) вычислялся согласно выражению:

$$R_1 \approx \frac{R_2}{(1-R_2)^2} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^2, \quad (8)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  мощности, выходящие со стороны выходного  $R_1$  и плотного  $R_2$  зеркал соответственно. Использованное выражение может быть получено из соображений сохранения мощности при полном обходе лазерного резонатора. Стоит заметить, что коэффициенты отражения, вычисленные на основании выходных мощностей и на основании измерений угла скола, хорошо согласуются между собой.

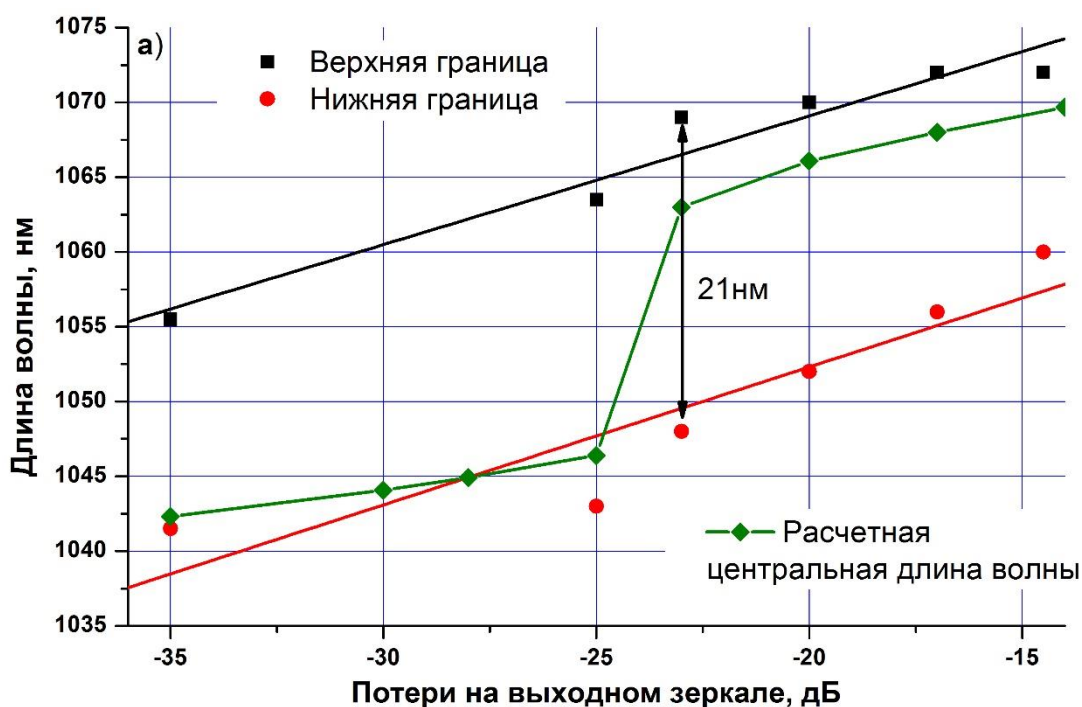


Рисунок 12 – Зависимость области сканирования от коэффициента отражения выходного зеркала (линии – линейная подгонка).

Зависимость области сканирования от коэффициента отражения выходного зеркала представлена на рисунке 12. Для каждого угла скола измерялся диапазон сканирования частоты. Из приведенных на рисунке 12 результатов видно, что при уменьшении коэффициента отражения выходного зеркала (т.е. при увеличении потерь резонатора) область сканирования смещается в коротковолновую область. Это факт связан с тем, что при увеличении потерь в резонаторе для лазерной генерации требуется большая мощность накачки, что приводит к более однородному распределению излучения накачки и смещению контура усиления в коротковолновую область, при этом ширина диапазона сканирования практически не изменяется. При этом можно ожидать, что для больших потерь ( $> 30$  дБ) (что эквивалентно малой длине световода) диапазон сканирования должен уменьшаться. Было установлено, что максимальный диапазон сканирования от 1048 до 1069 нм достигается при потерях около -23 дБ, что соответствует коэффициенту отражения порядка  $R = 0.5 \%$ .

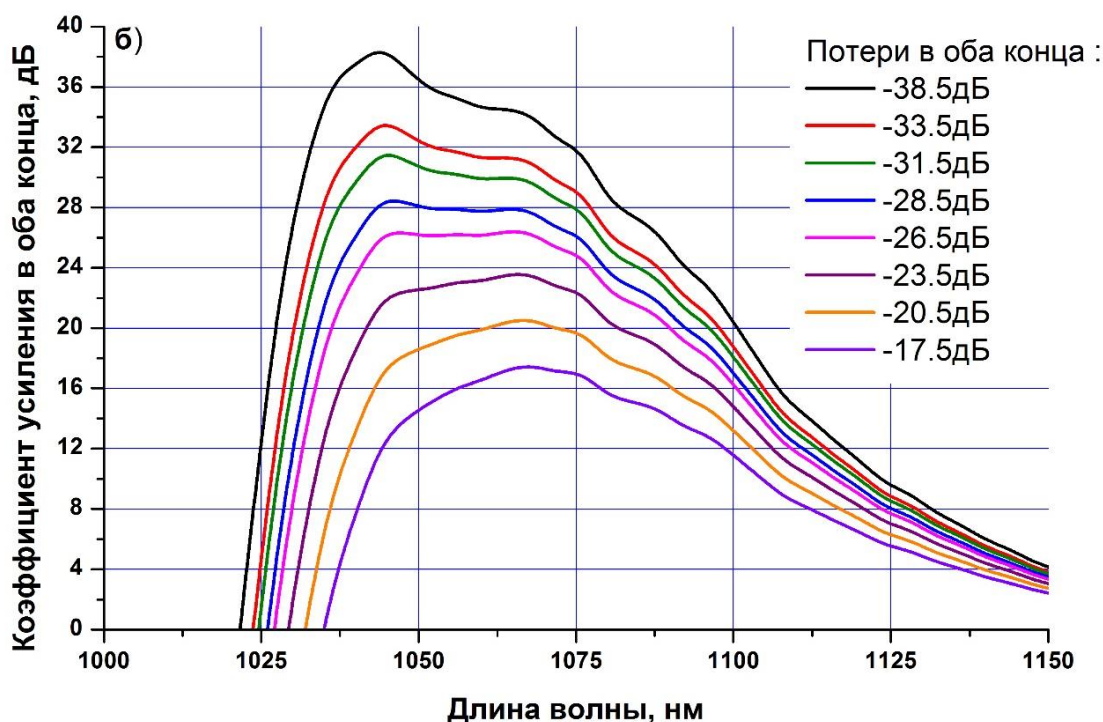


Рисунок 13 – Расчетный профиль усиления для различных полных потерь в резонаторе и фиксированной длины активного волокна 2.6 м.

Полученные результаты хорошо согласуются с расчетами длины волны максимального усиления, представленными на рисунке 13. Методика расчетов аналогична предыдущим экспериментам с изменением длины активного волокна. В этом случае увеличение потерь в резонаторе требует увеличения поглощаемой

мощности накачки (что делает продольное распределение более однородным), что вызывает сдвиг спектра усиления в коротковолновую область.

Как результат проведенных исследований была определена область параметров – длина активного волокна от 2 до 4 метров, коэффициент отражения 0.1-1%, при которых наблюдается наибольший диапазон сканирования ~20 нм. Однако при работе с оптимизированной схемой обнаружился ряд недостатков: 1) необходимость поляризационной настройки схемы и влияние внешних воздействий на схемы из-за использования элементов, не сохраняющих поляризацию, 2) невозможность использовать основной канал выходной мощности со стороны скола волокна в полностью волоконных схемах. Для устранения этих недостатков была предложена схема лазера, представленная на рисунке 14.



Рисунок 14 – Модернизированная схема самосканирующего лазера.

Данный лазер был собран в полностью волоконной схеме с использованием компонент с сохранением поляризации. Как было показано в работах [76, 78], использование поляризационных элементов позволяет существенно улучшить стабильность лазерной генерации. Использование скола волокна в качестве выходного зеркала имеет свои недостатки. В первую очередь, это усложняет дальнейшее использование выходного излучения в волоконных схемах, т.к. требует дополнительного использования объемной оптики для его заведения в оптическое волокно, что приводит к дополнительным потерям. По этой причине скол волокна был заменен на широкополосное зеркало, состоящее из волоконного разветвителя, скола волокна и изолятора аналогично работе [75]. Резонатор лазера образован широкополосным высокоотражающим волоконным кольцевым зеркалом на основе поляризующего разветвителя 50/50 и разветвителем 20/80 со сколотым под прямым углом 20% портом для формирования отражения по формуле Френеля. Порт 80% разветвителя 20/80 совместно с изолятором служит для вывода лазерного излучения из резонатора и его дальнейшего использования.

В результате эффективный коэффициент отражения выходного зеркала в виде скола волокна составил  $\sim 0.2\%$ . Однако основная часть излучения была сконцентрирована в волокне и могла быть использована в дальнейшем. Длина используемого активного волокна, легированного иттербием Nufern PM-YDF-5/130, составляла 3 метра, что близко к оптимальному значению. Активная среда накачивалась многомодовым лазерным диодом с длиной волны  $\sim 970$  нм мощностью до 9 Вт через объединитель накачки. Также в модернизированной схеме было уделено особое внимание динамике интенсивности, которая, как было показано в работе [76], в первую очередь определяется положением активного световода в резонаторе. Подобрал длину пассивного волокна  $\sim 10$  метров, находящегося между объединителем накачки и плотным зеркалом, был получен режим одночастотного самосканирования частоты [76, 78]. В этом случае динамика интенсивности состоит из периодических микросекундных импульсов, лазерная частота меняется между импульсами на одну ОСД  $\sim 5.5$  МГц (Рисунок 15а), а спектральная ширина каждого импульса составляет порядка 1 МГц. При рабочей мощности накачки  $\sim 2.6$  Вт лазер работает в режиме самосканирования длины волны в области 1058 – 1082 нм со скоростью  $\sim 1$  нм/с, характерная выходная мощность составляет 30 мВт, типичная динамика длины волны показана на Рисунке 15-б. Для реализованной схемы была изучена работа лазера в зависимости от температуры активного волокна и длины волны лазерного диода накачки при фиксированной мощности.

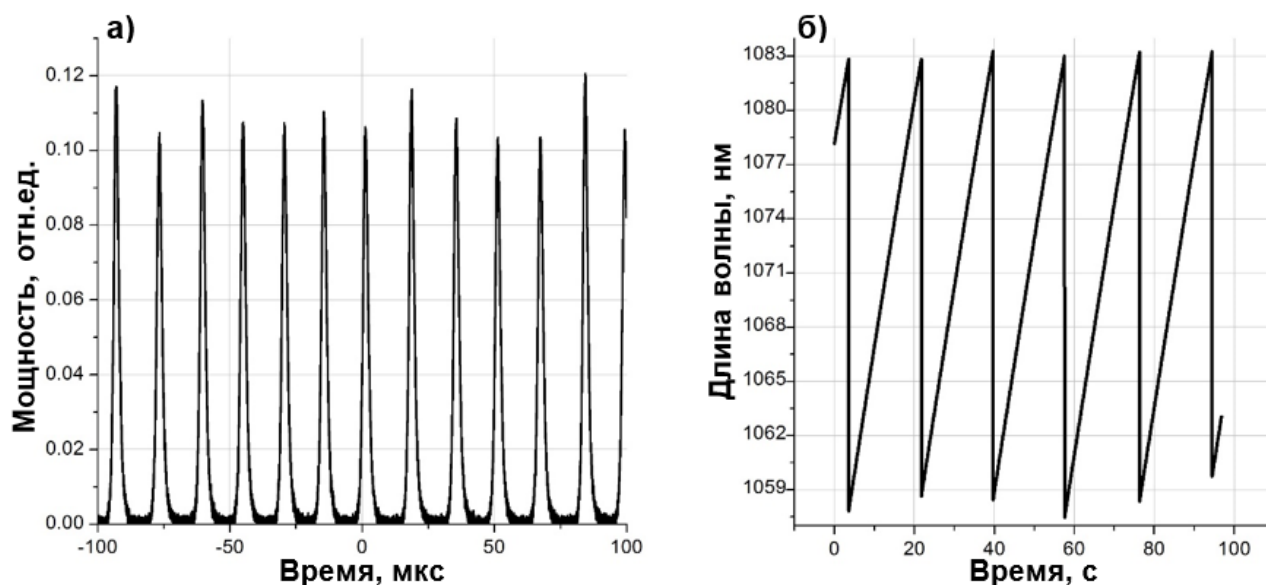


Рисунок 15 – Выходные характеристики иттербиевого самосканирующего лазера: а) динамика интенсивности, б) динамика длины волны.

## 1.2 Управление спектральным диапазоном сканирования

В предыдущей части работы были установлены оптимальные параметры элементов схемы лазера, для которых наблюдалось наибольшее значение диапазона сканирования. Для управления диапазоном самосканирования схема лазера была несколько модернизирована и представлена на рисунке 16. Отличие заключается в замене выходного разветвителя и замене волоконного кольцевого зеркала на волоконное плотное широкополосное зеркало. Исследовалось влияние температуры активного световода и температуры лазерного диода на область самосканирования, поэтому в лазере была реализована возможность изменения температуры активного волокна  $T_1$  и лазерного диода накачки  $T_2$  [87].

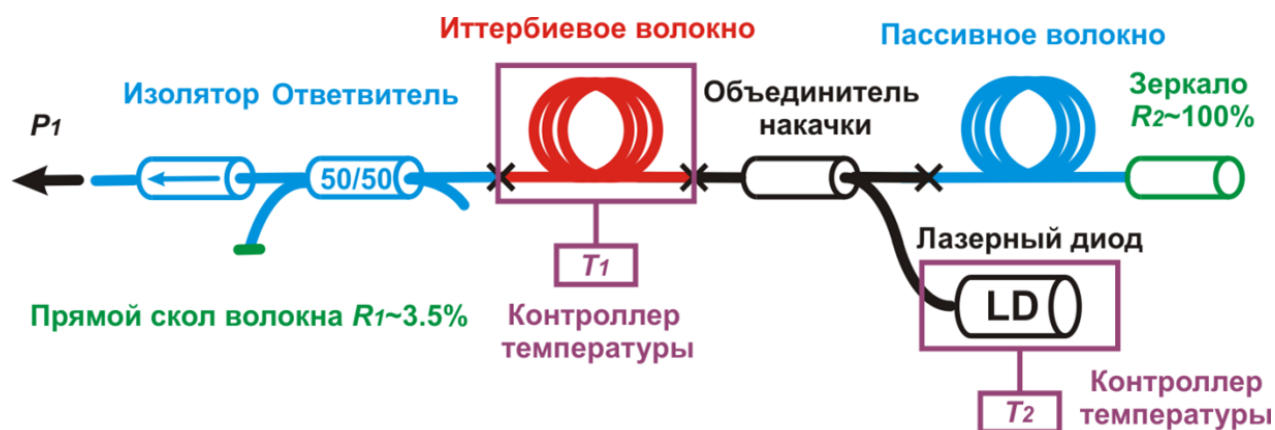


Рисунок 16 – Схема волоконного иттербиевого лазера с самосканированием частоты при температурном управлении спектральным диапазоном.

### 1.2.1 Управление с помощью температуры активного волокна

Для исследования влияния температуры активного волокна на характеристики лазерного излучения активное волокно было намотано на термостабилизированную катушку с элементом Пельтье, которая позволяет изменять температуру световода от 10 до 50 °С. Нагрев активного волокна производился при постоянной температуре лазерного диода  $T_2$  равной 25 °С. Для каждого значения температуры измерялись динамики спектра и интенсивности, выходная мощность излучения.



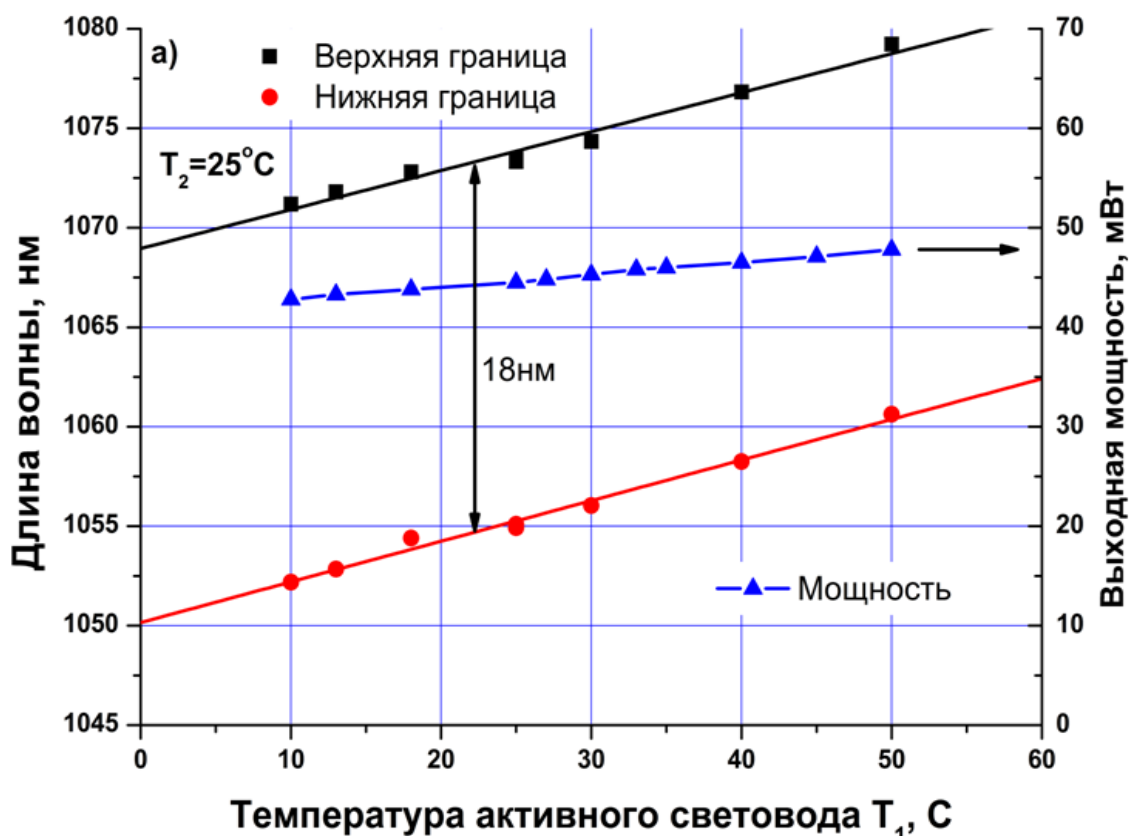


Рисунок 17 – Зависимость области сканирования и выходной мощности от температуры активного световода (данные аппроксимированы линейной функцией).

Зависимость области сканирования и выходной мощности от температуры активного световода представлена на рисунке 17. Из полученных данных видно, что при нагреве активного волокна область сканирования смещается на 8 нм в длинноволновую область спектра с наклоном  $0.2 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ . При этом стабильность, скорость и диапазон сканирования, частота следования импульсов и их длительность практически не меняются с температурой. Выходная мощность изменяется всего на 10 %. Такое поведение можно объяснить тем, что контур усиления в иттербии смещается в длинноволновую область при его нагреве [92, 93].

### 1.2.2 Управление с помощью длины волны лазерного диода накачки

Для изучения влияния длины волны лазерного диода накачки использовалась схема лазера, представленная на рисунке 16. При этом температура активного волокна  $T_1$  равна  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Характерный спектр лазерного диода накачки (LUMICS) при разных токах показан на рисунке 18.

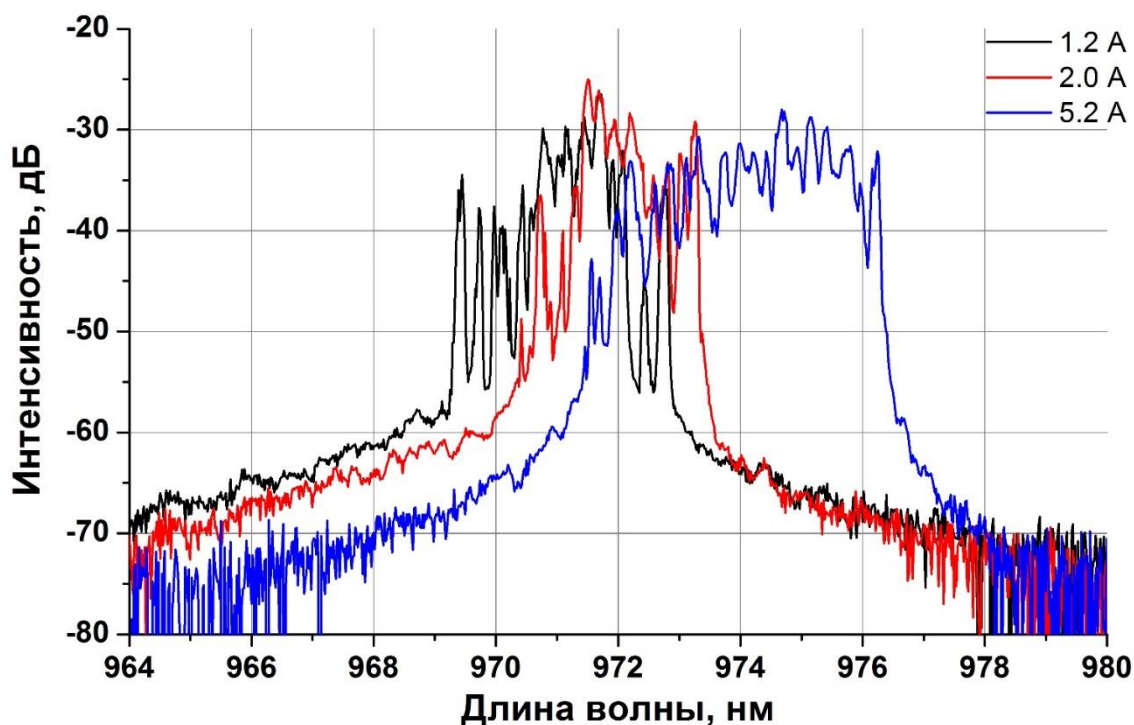


Рисунок 18 – Характерный спектр лазерного диода накачки LUMICS при трех различных токах: черный – 1.2 А; красный – 2 А (рабочий ток); синий – 5.2 А.

Управление длиной волны лазерного диода накачки осуществлялось с помощью его нагрева. Зависимость области сканирования и выходной мощности от длины волны лазерного диода накачки представлена на рисунке 19. На полученном графике видно, что при смещении длины волны накачки в длинноволновую область спектра область сканирования смещается в коротковолновую область с наклоном  $0.2 \text{ нм}/^\circ\text{С}$ . Такое смещение можно объяснить изменением уровня поглощенной мощности накачки. С увеличением температуры лазерного диода увеличивается длина волны его генерации. Тем самым длина волны приближается к максимуму поглощения в иттербии ( $\sim 975 \text{ нм}$ ), что приводит к большей однородности поглощения излучения накачки в активном световоде. При этом также наблюдается резкий рост выходной мощности и частоты следования импульсов при температуре более  $30 \text{ }^\circ\text{С}$ . При этой же температуре сканирование становится нестабильным – диапазон сканирования часто не превышает  $10 \text{ нм}$ . При температуре более  $34 \text{ }^\circ\text{С}$  сканирование пропадает полностью.



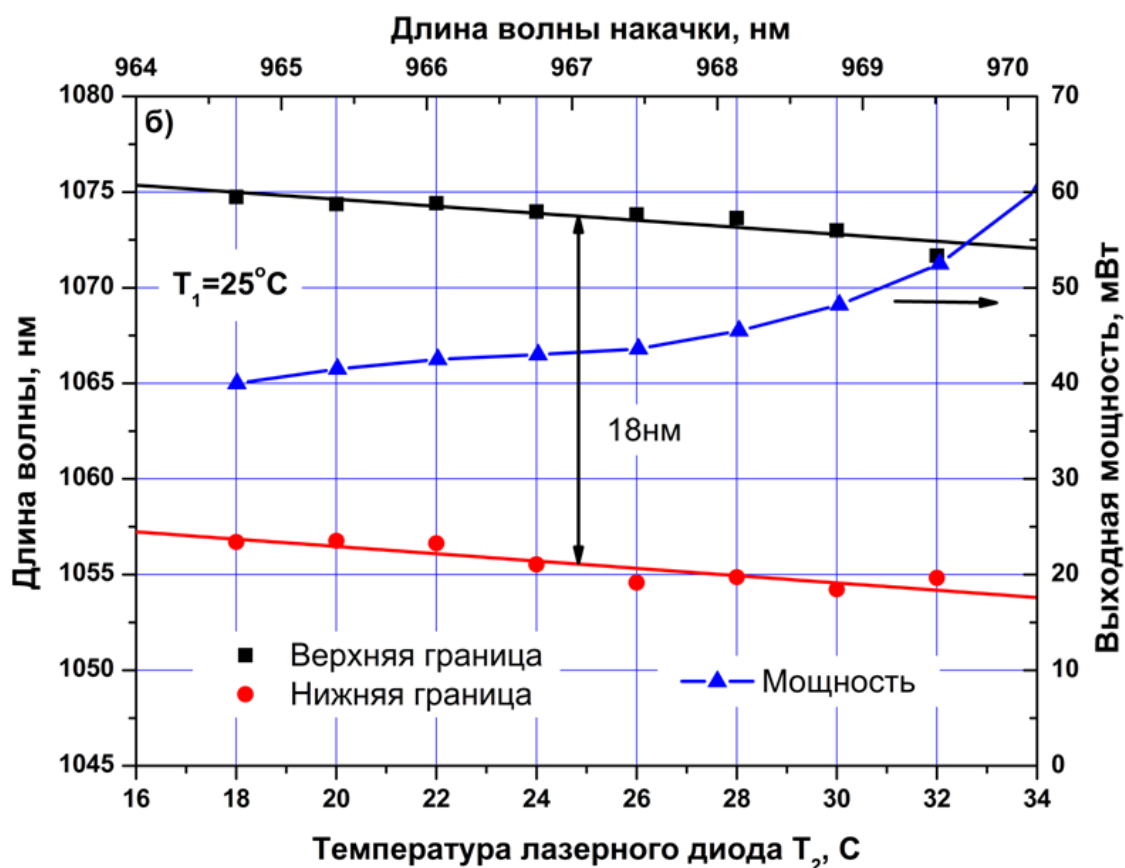


Рисунок 19 – Зависимость области сканирования и выходной мощности от длины волны лазерного диода накачки (данные аппроксимированы линейной функцией).

### Заключение к главе 1.

В результате исследований можно заключить, что область самосканирования смещается в коротковолновую область при увеличении однородности поглощения излучения накачки световода. Этого можно добиться с помощью уменьшения длины активного волокна, увеличения общих потерь в резонаторе или увеличения эффективности поглощения накачки. При этом оптимизация параметров лазера позволяет значительно расширить диапазон сканирования. В частности, это связано с плоской спектральной характеристикой контура усиления в лазере с учетом поглощенной мощности накачки. Была продемонстрирована возможность увеличения диапазона сканирования до 21 нм. Также можно заключить, что управление спектральными характеристиками с помощью температуры активной среды более предпочтительно по сравнению с температурой лазерного диода накачки, так как получаемый диапазон управления больше. Это связано с тем, что область изменения температуры лазерного диода

существенно ограничена. При низких температурах можно ожидать, что длина волны генерации диода будет далека от контура усиления активной среды, и поэтому поглощение будет происходить крайне неэффективно. При высоких температурах длина волны диода хорошо совпадает с максимумом поглощения иттербия, что приводит к эффективному поглощению, что также плохо отражается на эффекте самосканирования. Управление с помощью температуры активной среды, по сути, ограничено контуром усиления, ширина которого для иттербия составляет более 100 нм. Это означает, что в реализованном лазере можно получить самосканирование частоты практически в любой области усиления иттербия. В проведенной работе показано, что режим самосканирования может быть получен в области от 1028 до 1080 нм. Полученные результаты позволяют создавать широко перестраиваемые лазеры с самосканированием длины волны с генерацией в требуемой спектральной области.

## 2. Стабилизация границ диапазона сканирования

Помимо ширины диапазона перестройки для практических применений перестраиваемых лазеров важна также стабильность ее границ. Однако из-за самоорганизующегося (т.е. неконтролируемого) характера процесса, значения стартовой и конечной границы диапазона сканирования флуктуируют от одного сканирования к другому, что усложняет практические применения подобных лазеров. В предыдущей главе для получения максимального диапазона сканирования использовались широкополосные отражатели в виде кольцевого зеркала и скола волокна. В настоящей главе исследовано поведение динамики длины волны самосканирующего лазера, в котором резонатор преимущественно сформирован широкополосными отражателями, но дополнительно добавлен узкополосный селектор в виде ВБР, и предложены две схемы стабилизации границ.

### 2.1 Слабая селективная обратная связь для стабилизации границ сканирования

Схема лазера для исследования аналогична схемам из предыдущего раздела и представлена на рисунке 20. При рабочей мощности 2 Вт реализованный лазер сканирует в диапазоне от 1058 до 1081 нм. Принципиальное отличие заключалось в дополнительных ВБР с различными длинами волн отражения (1064, 1070, 1074, 1080 нм), которые вставлялись со стороны выходного зеркала. С целью регулировки эффективного коэффициента отражения использовался волоконный регулируемый ослабитель. Таким образом, эффективным отражателем являлось составное зеркало, состоящее из скола волокна и одной или нескольких ВБР (далее используется конструкция “ВБР+ослабитель”). В экспериментах анализировалась динамика длины волны.

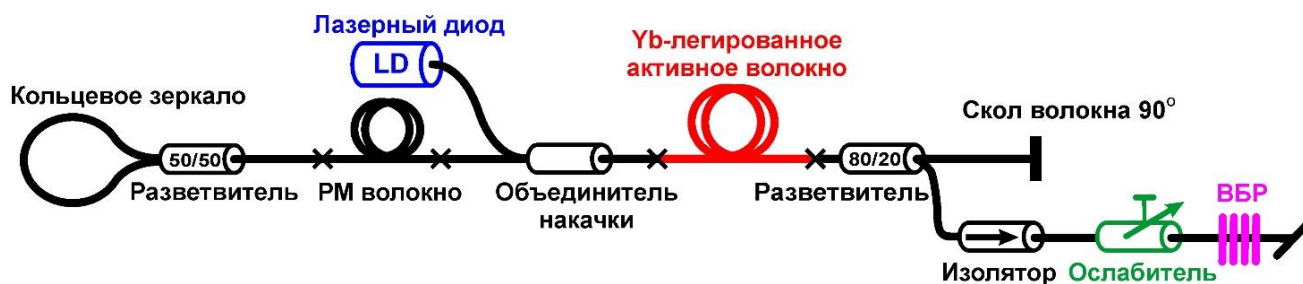


Рисунок 20 – Схема волоконного лазера с самосканированием частоты с дополнительной регулируемой селективной обратной связью.

### а) Стабилизация стартовой границы сканирования

Вначале было изучено поведение лазера с ВБР с длинами волн 1064, 1070 и 1074 нм. Регулировка эффективного коэффициента отражения осуществлялась с помощью волоконного регулируемого ослабителя. Сразу можно отметить, что поведение для всех трех ВБР было качественно одинаковым. Далее для простоты результаты приведены для самой коротковолновой ВБР с длиной волны отражения 1064 нм. Было установлено, что динамика длины волны волоконного самосканирующего лазера изменяется в зависимости от эффективного коэффициента отражения селектора, образованного ВБР и волоконным ослабителем. При отсутствии обратного отражения от ВБР (то есть, когда ослабитель полностью закрыт) длина волны генерации волоконного лазера изменяется от 1058 до 1081 нм, при этом как стартовая, так и конечная граница диапазона сканирования имеют флуктуации. В зависимости от величины эффективного коэффициента отражения было выделено четыре режима работы лазера, изображенные на рисунке 21.

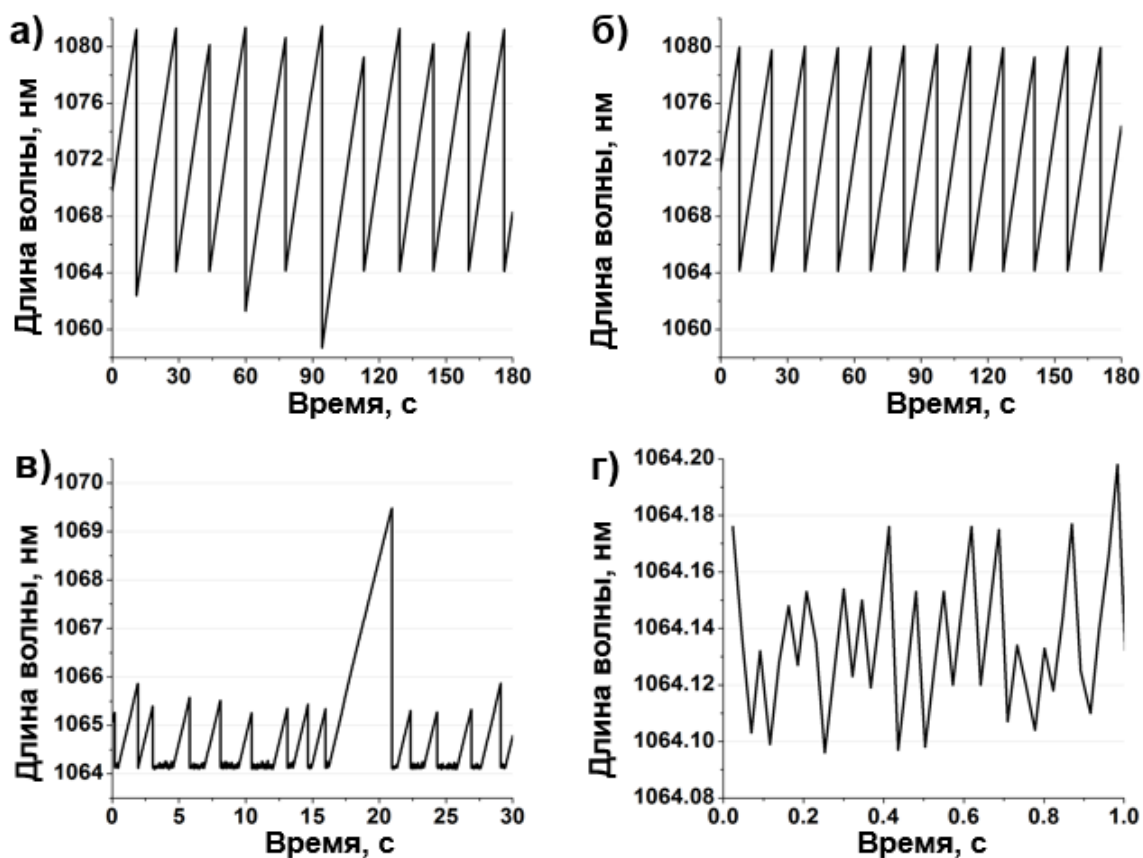


Рисунок 21 – Динамика длины волны при различных уровнях эффективного коэффициента селектора с длиной волны 1064 нм. От а) к г) происходит увеличение коэффициента отражения.

При малых величинах эффективного коэффициента отражения ВБР наблюдается появление областей с началом генерации длины волны в области центральной длины волны ВБР (рис. 21-а), то есть наблюдается частичная стабилизация стартовой границы сканирования. При дальнейшем увеличении эффективного коэффициента отражения стартовая длина волны генерации имеет фиксированное значение, равное длине волны отражения ВБР. Таким образом, в волоконном лазере сканирование длины волны происходит с полным привязыванием к центральной длине волны отражения ВБР (рис. 21-б). При дальнейшем увеличении коэффициента отражения наблюдается частичное пропадание процесса сканирования – в некоторые моменты времени генерация происходит строго на длине волны ВБР (рис. 21-в). В действительности сканирование происходит в области длин волн отражения решетки. При максимально полученном в схеме эффективном коэффициенте отражения генерация происходит только в небольшой области длин волн отражения ВБР (рис. 21-г).

#### **в) Стабилизация конечной границы сканирования**

Аналогичные зависимости были получены для ВБР с длиной волны 1080 нм. Единственное отличие заключается в том, что в этом случае наблюдалась стабилизация конечной длины волны. На рисунке 22 приведены характерные динамики длины волны при различных коэффициентах отражения узкополосного селектора, образованного ВБР и волоконным ослабителем. В отсутствие обратного отражения от ВБР, диапазон сканирования составляет порядка 23 нм, при этом наблюдаются большие флуктуации границ.

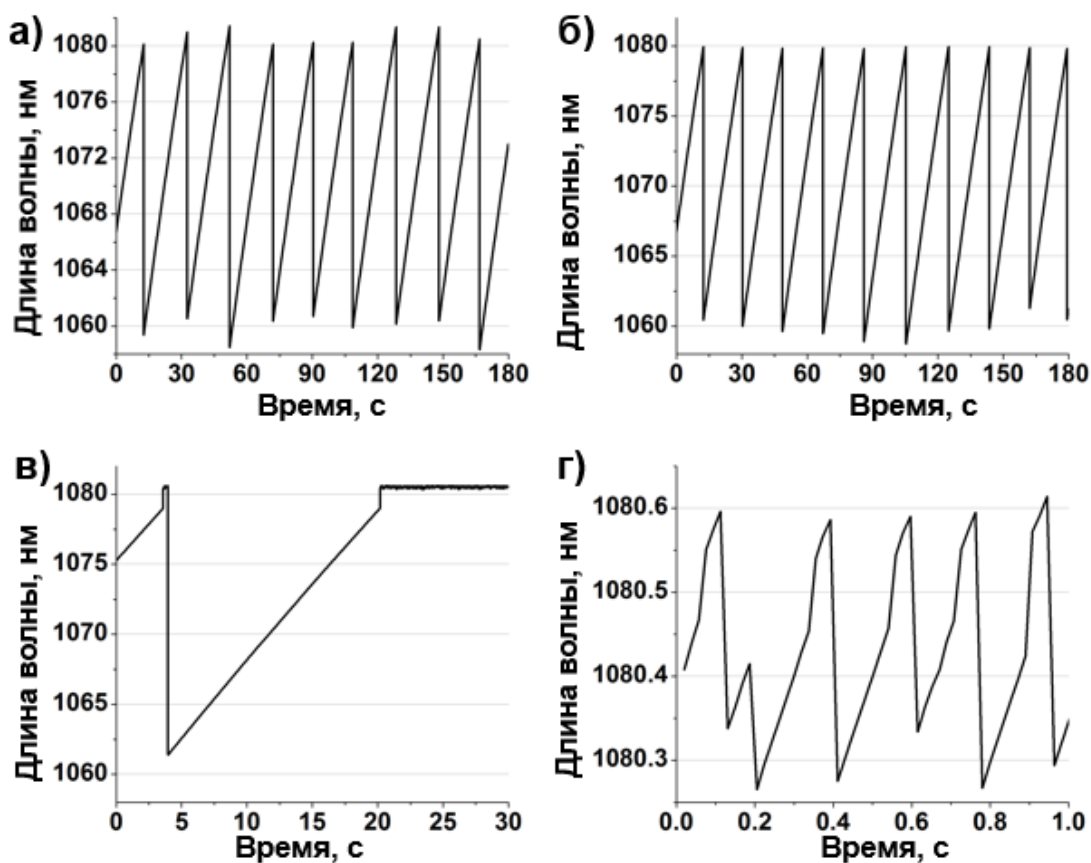


Рисунок 22 - Динамика длины волны при различных уровнях эффективного коэффициента селектора с длиной волны 1080 нм. От а) к г) происходит увеличение коэффициента отражения.

При малых величинах эффективного коэффициента отражения ВБР наблюдается появление областей с конечной длиной волны генерации в области центральной длины волны ВБР (рис. 22-а), то есть наблюдается частичная стабилизация стартовой границы сканирования. При дальнейшем увеличении эффективного коэффициента отражения конечная длина волны генерации имеет фиксированное значение, равное длине волны отражения ВБР, то есть происходит полное привязывание к центральной длине волны отражения ВБР (рис. 22-б). При дальнейшем увеличении коэффициента отражения наблюдается частичное пропадание процесса сканирования – в некоторые моменты времени генерация происходит в области длин волн отражения ВБР (рис. 22-в). При максимально полученном в схеме эффективном коэффициенте отражения генерация происходит только в небольшой области длин волн отражения ВБР (рис. 22-г).

Для всех ВБР было произведено измерение характерных эффективных коэффициентов отражения селектора на их основе. Для этого был использован второй аналогичный самосканирующий лазер, излучение которого заводилось

через один из портов разветвителя 80/20 (“лазер 2”). Схема эксперимента представлена на рисунке 23. Сигнал отражения от системы “ВБР+ослабитель” измерялся с помощью фотодетектора, установленного в одном из портов разветвителя 50/50. Для калибровки уровня отраженного сигнала дополнительно был измерен уровень отраженного сигнала от прямого скола волокна, который заменил систему “ВБР+ослабитель”. В расчетах эффективного коэффициента были учтены потери на разветвителях и на изоляторе. Также для компенсации разности плеч перед ВБР и ослабителем добавлялся кусок одномодового волокна.

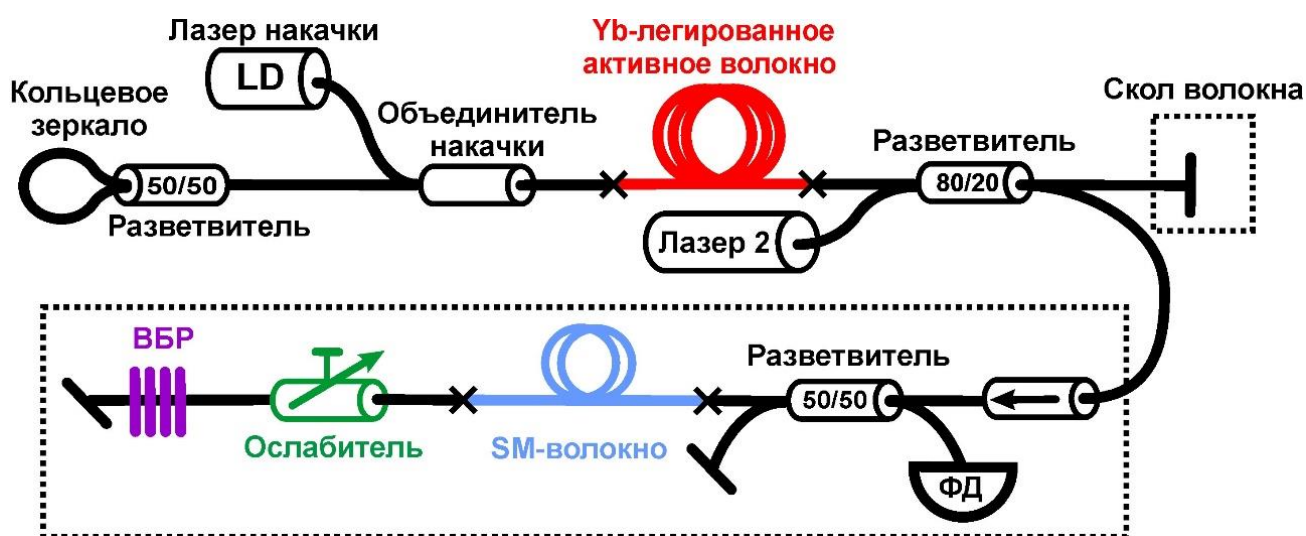


Рисунок 23 – Схема экспериментальной установки для измерения характерных коэффициентов отражения.

В эксперименте измерялись коэффициенты отражения эффективного селектора, при которых наблюдается начало ( $R_2$ ) и окончание ( $R_1$ ) процесса стабилизации на длине волны отражения ВБР. Таким образом можно определить диапазон значений эффективных коэффициентов отражения для стабилизации границ диапазона сканирования. Экспериментальные значения эффективных коэффициентов отражения  $R_1$ ,  $R_2$  для разных ВБР представлены на рисунке 24.

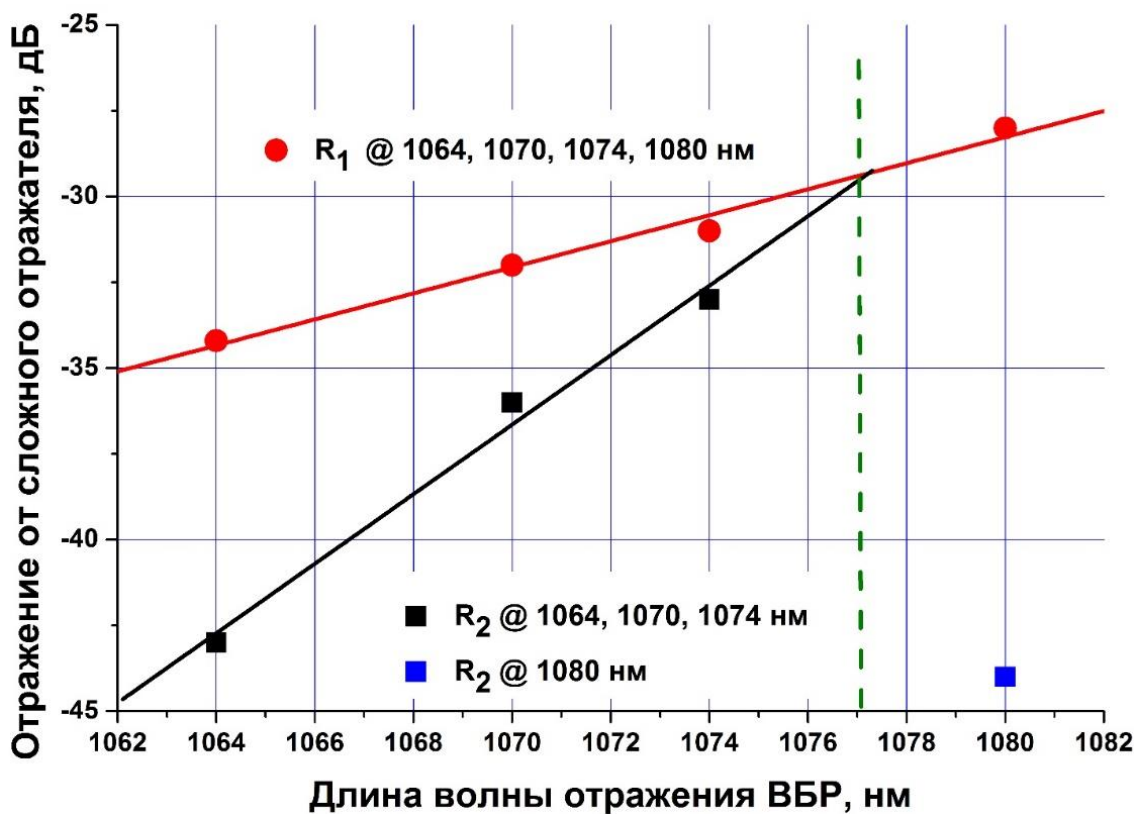


Рисунок 24 – Зависимость характерных коэффициентов отражения для разных длин волн ВБР. Прямые – линейная аппроксимация экспериментальных значений.

Черными квадратами обозначены эффективные коэффициенты отражения  $R_2$  для ВБР 1064, 1070 и 1074 нм, при которых наблюдалось начало стабилизации стартовой границы сканирования на соответствующей длине волны. Синим квадратом обозначен эффективный коэффициент отражения  $R_2$  для ВБР 1080 нм, при котором наблюдалось начало стабилизации конечной границы сканирования. Красными точками обозначены эффективные коэффициенты отражения  $R_1$  для ВБР 1064, 1070 и 1074 нм соответствующих стартовой границе и для ВБР 1080 нм, соответствующей конечной границе, при которых процесс стабилизации границ диапазона широкополосного сканирования на соответствующей длине волны исчезал. Также на рисунок 24 добавлены линейные аппроксимации экспериментальных точек. Диапазон значений эффективного коэффициента отражения ВБР для стабилизации границ диапазона сканирования определяется разностью ( $R_1 - R_2$ ) для соответствующей ВБР.

Результаты показывают, что для всех ВБР эффективный коэффициент отражения системы “ВБР+ослабитель“, соответствующий исчезновению самосканирования, увеличивается с увеличением длины волны. Также видно, что



с увеличением длины волны ВБР для стабилизации нижней границы, наблюдается сужение диапазона стабилизации из-за разного наклона линий. Наименьший диапазон стабилизации наблюдается на длине волны отражения ВБР 1074 нм. Линейная экстраполяция позволяет оценить длину волны  $\sim 1077$  нм, как граничную, для перехода из зоны стабилизации нижней границы в зону стабилизации верхней границы. Однако для проверки предположения требуется дополнительный эксперимент с перестраиваемой ВБР.

Таким образом, были выделены области и значения эффективных коэффициентов отражения узкополосного селектора, образованного ВБР и волоконным ослабителем. На границах данных областей наблюдается процесс самосканирования с различной динамикой изменения длины волны волоконного лазера. Было выявлено два характерных значения коэффициента отражения ( $R_1$ ,  $R_2$ ), при которых меняются режимы сканирования. Диапазон значений коэффициента отражения между  $R_1$  и  $R_2$  соответствует значению эффективного отражения узкополосного селектора, образованного ВБР и волоконным ослабителем, при котором наблюдается стабилизация стартовой границы сканирования.

### **с) Одновременная стабилизация стартовой и конечной длин волн сканирования**

Далее был проведен эксперимент по количественному измерению стабилизации границ сканирования с двумя ВБР с резонансными длинами волн 1064 и 1080 нм. Для этого коэффициенты отражения селекторов были выбраны между  $R_1$  и  $R_2$  (см. Рис. 24). В работе проводилось долговременное ( $\sim 25$  минут) измерение временной динамики самосканирующего лазера с помощью быстрого спектрографа Laser Spectrum Analyzer (Angstrom/HighFinesse). Также для сравнения был проведен аналогичный эксперимент в отсутствие слабой селективной обратной связи. Измерялось среднеквадратичное отклонение ( $\Delta$ ) значений стартовой и конечной границы диапазона сканирования. Полученные результаты представлены на рисунке 25. При отсутствии слабой селективной обратной связи границы диапазона сканирования имеют достаточно большие флуктуации, достигающие 110 пм для конечной границы и 1160 пм для стартовой границы (Рисунок. 25-а), при этом флуктуации стартовой границы на порядок выше, чем для конечной.

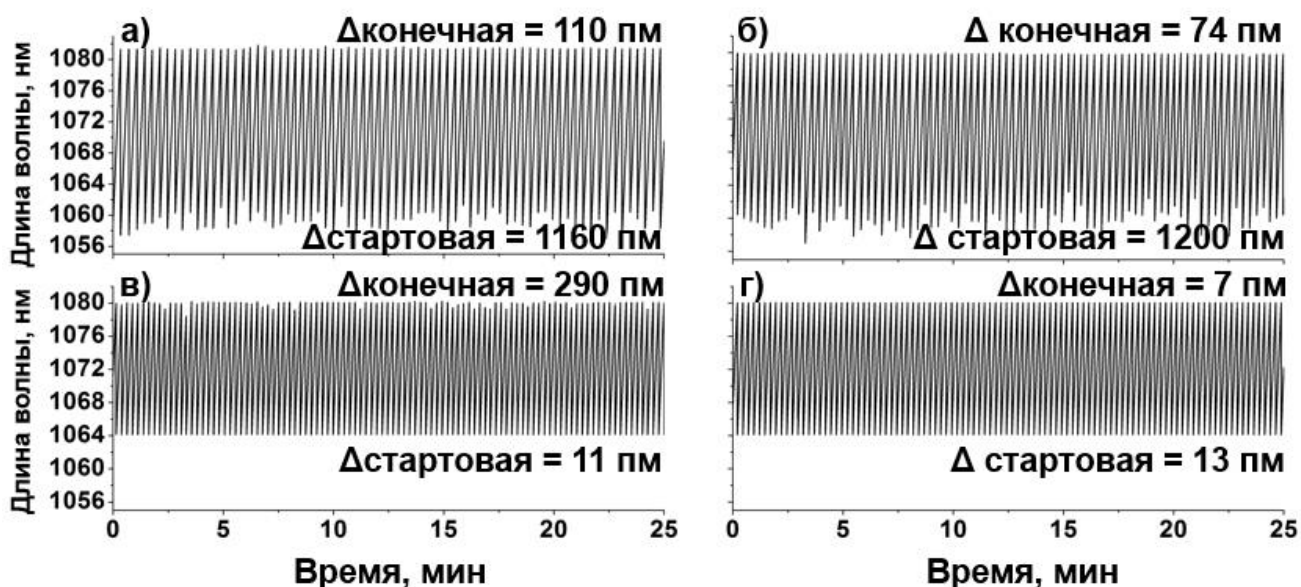


Рисунок 25 – Долговременная динамика самосканирующего лазера при различных конфигурациях селекторов: а) в отсутствии ВБР, б) при ВБР с длиной волны 1064 нм, в) при ВБР с длиной волны 1080 нм, д) с двумя ВБР.

При добавлении селективной обратной связи на длине волны 1080 нм флуктуации конечной границы существенно уменьшаются до 74 пм (Рисунок 25-б). При добавлении селективной обратной связи на длине волны 1064 нм флуктуации стартовой границы существенно уменьшаются до 11 пм (Рисунок 25-в). При одновременном добавлении двух ВБР наблюдается стабилизация как стартовой, так и конечной границ сканирования (Рисунок 25-г). Таким образом, одновременное добавление двух ВБР позволяет уменьшить флуктуации стартовой и конечной границ диапазона сканирования длины волны до 13 пм и 7 пм соответственно (Рисунок 25-г). Итоговые результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения флуктуаций границ диапазона сканирования до и после стабилизации на основе ВБР.

Граница диапазона самосканирования	Величина флуктуаций без использования схемы стабилизации на основе ВБР	Величина флуктуаций с использованием схемы стабилизации на основе ВБР
Стартовая	1100 пм	13 пм
Конечная	110 пм	7 пм

Являясь селективным отражателем, ВБР позволяет стабилизировать начальное коротковолновое значение длины волны в процессе перескока сканирования с длинноволновой границы, привязывая её к центральной длине волны отражения. В зависимости от длины волны отражения ВБР происходит стабилизация стартовой или конечной границы сканирования. Стабилизация конечной границы происходит за счет того, что в процессе сканирования очередная генерируемая мода попадает в область уменьшенного отражения, связанного с интерференцией отражений от торца волокна и от ВБР. При резком перескоке в коротковолновую область генерация начинается в узкой спектральной области отражения второй ВБР. Наличие второй ВБР приводит к стабилизации стартовой границы сканирования. Однако из-за того, что коэффициент отражения выходного зеркала, как правило, составляет порядка 0.1-5% [74, 94], то и коэффициент отражения ВБР, используемых для стабилизации границ, должен составлять порядка 0.01-0.1% (см. Рис. 24). При меньших коэффициентах отражения стабилизация не наблюдается, а при больших – сканирование наблюдается только в спектральной области отражения ВБР. Создание слабоотражающих ВБР с малой шириной спектра отражения и с коэффициентами отражения  $\sim 0.1\%$  является трудной технологической задачей, поэтому в данной схеме для создания слабого отражения с использованием стандартных ВБР (т.е. с коэффициентом отражения  $\sim 10-99\%$ ) использовался регулируемый волоконный ослабитель. Однако, это существенно увеличивало потери в выходном сигнале и усложнило схему эксперимента, поэтому дальнейшее использование волоконного ослабителя не представляет практического интереса. По этой причине была предложена другая конфигурация лазера, позволяющая выполнять стабилизацию границ сканирования.

## **2.2 Кольцевое зеркало с ВБР для стабилизации границ диапазона сканирования**

Для решения указанной выше проблемы при стабилизации границ сканирования предлагается располагать селективные отражатели со стороны плотного волоконного кольцевого зеркала (ВКЗ). В этом случае, из-за высокого коэффициента отражения плотного зеркала (как правило, он составляет более 50% для обеспечения однонаправленности лазерной генерации) жесткие требования на малые коэффициенты отражения ВБР исключаются. Стабилизация границ

диапазона сканирования лазера осуществлялась в схеме лазера, изображенной на рисунке 26, с помощью высокоотражающей ВБР, которая была перенесена в сторону ВКЗ.

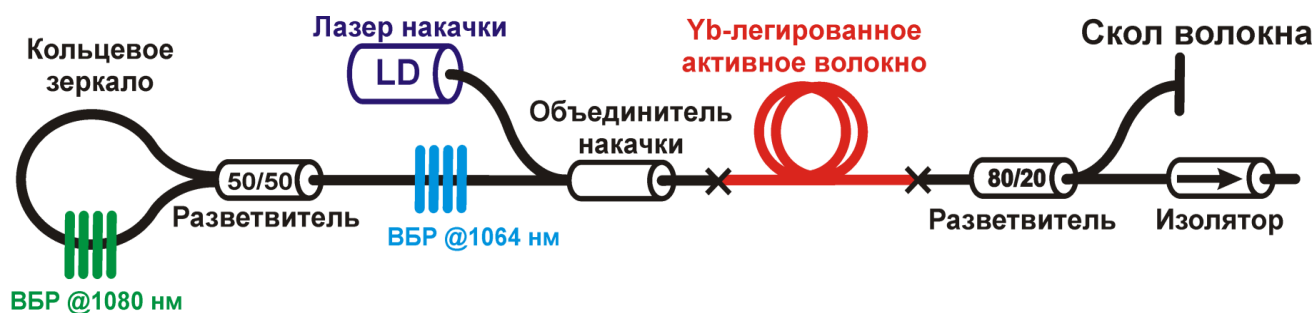


Рисунок 26 – Схема волоконного самосканирующего лазера со стабилизацией границ диапазона сканирования с использованием ВКЗ.

Для корректировки диапазона сканирования также происходил нагрев активного волокна в соответствии с результатами раздела 1.2. В экспериментах по стабилизации границ сканирования использовались ВБР с разными коэффициентами отражения с центральными длинами волн отражения 1064 нм ( $R \sim 27, 55, 85\%$ ) и 1080 нм ( $R \sim 8, 24, 34\%$ ) и сформированные в волокне с сохранением поляризации. В зависимости от расположения ВБР относительно плотного ВКЗ происходила стабилизация стартовой или конечной границы сканирования.

#### а) Стабилизация конечной границы сканирования

Для стабилизации конечной границы сканирования в ВКЗ добавлялась ВБР с центральной длиной волны отражения близкой к этой границе в лазере без селекторов. В соответствии с работой [95] в спектре отражения ВКЗ появляются дополнительные провалы, связанные с наличием ВБР. Кроме того, эти провалы дополнительно промодулированы благодаря интерференции волн в ВКЗ, а период модуляции определялся относительным положением ВБР внутри ВКЗ. Для стабилизации конечной границы была выбрана ВБР с центральной длиной волны отражения  $\lambda = 1080.8$  нм и коэффициентом отражения  $R \sim 34\%$ . При температуре активного волокна 25 °С среднее значение конечной длины волны составляло  $\sim 1077$  нм, и влияния ВБР на процесс сканирования не наблюдалось (Рисунок 27-а,г). Отсутствие стабилизации в этом случае можно связать с тем, что сканирование не достигает области отражения ВБР. Действительно, временная

динамика длины волны была аналогична динамике в отсутствие ВБР, и конечная граница сканирования имела достаточно большие флуктуации  $\sim 200$  пм.

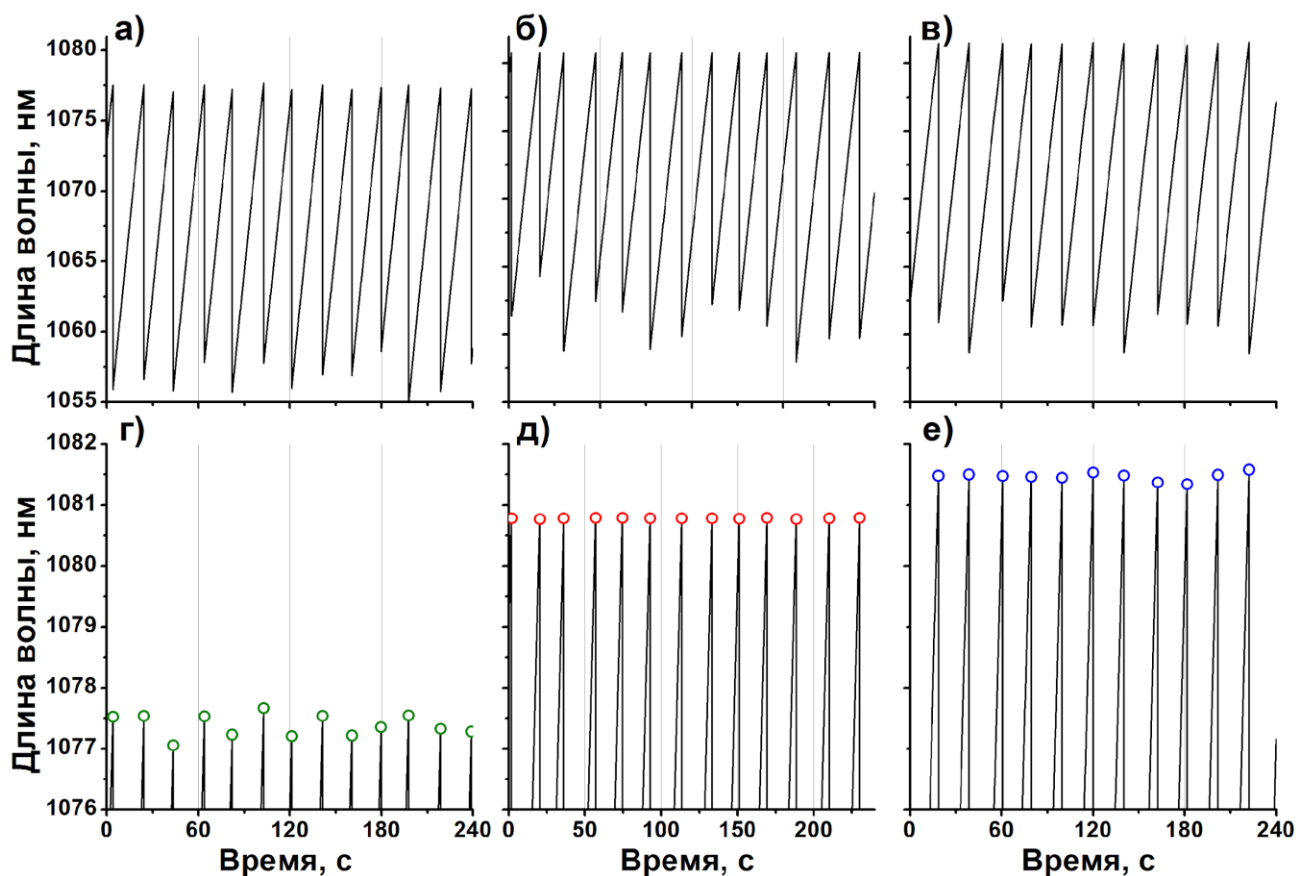


Рисунок 27 – Временная динамика длины волны излучения лазера: а) с ВБР ( $\lambda=1080.8$  нм и  $R\sim 34\%$ ) при  $25$  °C; б) с ВБР ( $\lambda=1080.8$  нм и  $R\sim 34\%$ ) при  $45$  °C; в) без ВБР при  $45$  °C. На рисунках г,д,е) показаны более подробно те же зависимости вблизи верхней границы сканирования.

На рисунке 28 красными квадратами показано смещение среднего значения верхней границы сканирования при нагревании активного волокна. Можно увидеть, что до температуры активного волокна  $35$  °C происходит рост значения конечной границы. Однако, при температуре свыше  $35$  °C рост прекращается на значении, соответствующем длине волны отражения ВБР, что свидетельствует о стабилизации конечной границы (Рис. 27-б,д). При этом флуктуации конечной границы уменьшаются до  $\sim 9$  пм. Для сравнения на рисунке 27-в,е представлена динамика длины волны лазера при температуре  $45$  °C без добавления ВБР. Как видно, конечная граница также имеет большие флуктуации, достигающие  $\sim 110$  пм, что говорит о необходимости использования ВБР для стабилизации.

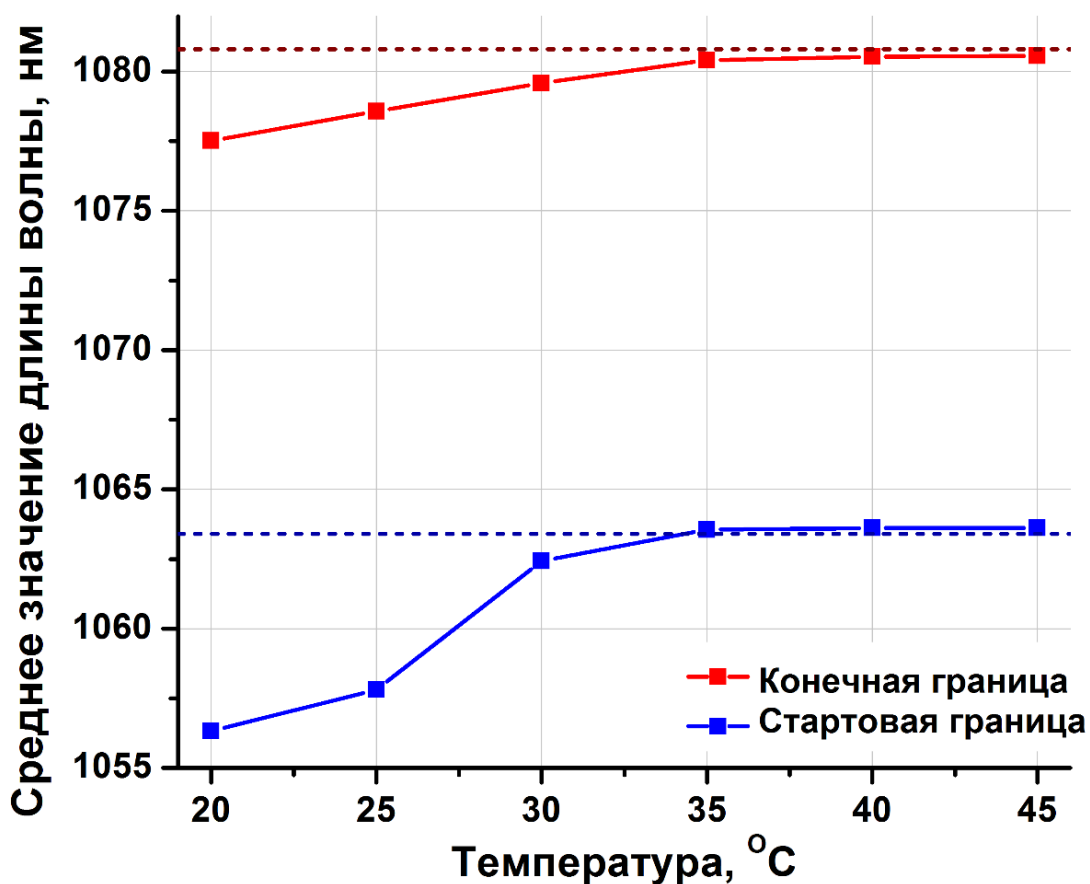


Рисунок 28 – Температурная зависимость стартовой (квадраты) и конечной (круги) границы диапазона сканирования при использовании только одной ВБР<sub>кон</sub> ( $\lambda=1080,8$  нм и  $R\sim 34\%$ ) или ВБР<sub>старт</sub> ( $\lambda=1064$  нм и  $R\sim 27\%$ ) соответственно. Штриховыми линиями показаны значения центральных длин волн отражения ВБР.

Также было замечено, что процесс стабилизация зависит от коэффициента отражения ВБР. В частности, стабилизация конечной границы не наблюдалась для ВБР с коэффициентом отражения  $R\sim 8\%$  во всём диапазоне температуры активного световода от 20 до 45 °C в отличие от ВБР с  $R\sim 24$  и 34%. Таким образом, можно предположить, что для стабилизации необходима ВБР, коэффициент отражения которой превышает некоторое пороговое значение. Для определения более точного значения коэффициента отражения ВБР, требуемого для стабилизации, измерялся сигнал, прошедший через ВКЗ с помощью быстрого фотоприемника. Полученные результаты представлены на рисунке 29.

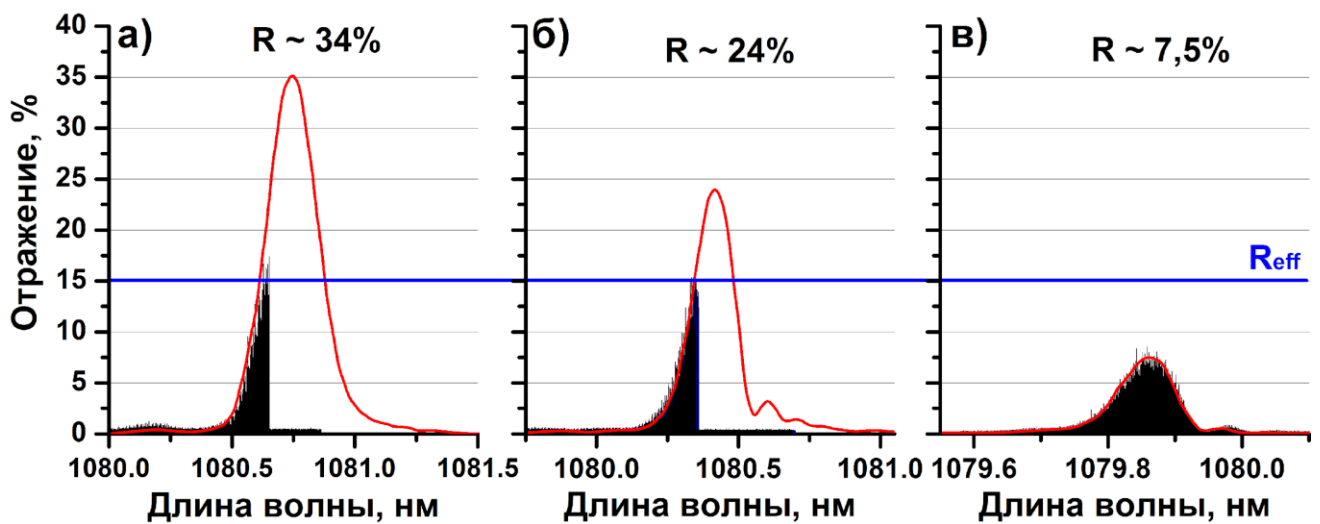


Рисунок 29 – Спектр отражения ВБР (красный) и сигнал, прошедший через ВКЗ с ВБР (черный) в процессе сканирования, для коэффициентов отражения ВБР  $R =$  а) 34 %, б) 24 %, в) 7.5 % при температуре активного волокна 45 °С.

В соответствии с работой [95] форма огибающей спектра пропускания ВКЗ с ВБР совпадает с формой спектра отражения ВБР. Таким образом, зная временной сигнал интенсивности, прошедшей через ВКЗ, и динамику длины волны лазера, можно восстановить спектр отражения используемой ВБР. Такие сигналы были измерены для ВБР с коэффициентами отражения  $R \sim 8, 24, 34$  % (Рис.29). Можно заметить, что зависимости, представленные для ВБР с  $R \sim 34$  и 24 % (Рис. 29-а и б соответственно), имеют резкие длинноволновые границы. Это свидетельствует как о том, что сканирование обрывается, не пройдя весь спектр отражения ВБР, так и о стабилизации конечной границы. В то же время отсутствие резкой границы в прошедшем сигнале для ВБР с  $R \sim 8$  % свидетельствует об отсутствии стабилизации. Полные оптические спектры отражения ВБР были измерены с помощью анализатора оптических спектров Yokogawa AQ6370 (красные линии на рисунке 29). Сопоставление прошедшего через ВКЗ с ВБР сигнала и спектра отражения ВБР показывает, что обрыв сканирования происходит при коэффициенте отражения порядка 15 % (Рис. 29). Однако стоит отметить, что измерения проводились при температуре активного волокна 45 °С, а значение коэффициента отражения может зависеть также и от температуры волокна.

#### **б) Стабилизация стартовой границы сканирования**

Для стабилизации стартовой границы сканирования необходимо селективно создать область с увеличенным коэффициентом отражения, поэтому было решено

поместить ВБР с длиной волны, соответствующей стартовой границе сканирования, непосредственно перед ВКЗ (Рис. 26), формируя тем самым вложенный в резонатор интерферометр Фабри-Перо. Для проведения экспериментов была выбрана ВБР с длиной волны 1064 нм и коэффициентом отражения  $R \sim 27\%$ . Полученные данные представлены на рисунке 30.

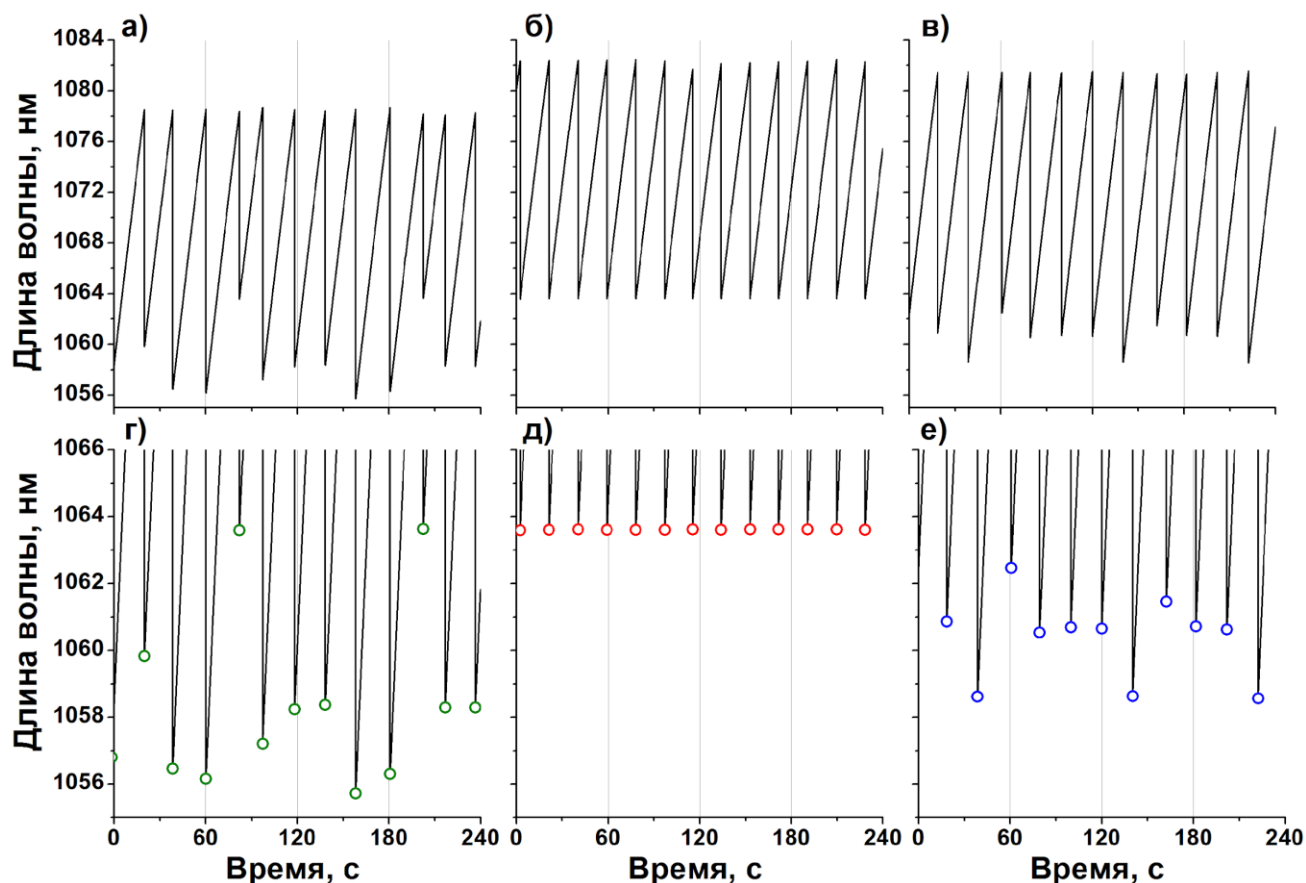


Рисунок 30 – Временная динамика длины волны излучения лазера: а) с ВБР ( $\lambda=1064$  нм и  $R \sim 27\%$ ) при  $25^\circ\text{C}$ ; б) с ВБР ( $\lambda=1064$  нм и  $R \sim 27\%$ ) при  $45^\circ\text{C}$ ; в) без ВБР при  $45^\circ\text{C}$ . На рисунках г, д, е) показаны более подробно те же зависимости вблизи нижней границы сканирования.

Как и в случае с конечной границей, при температуре активного волокна  $25^\circ\text{C}$  влияния ВБР на процесс сканирования не наблюдалось (Рис. 30-а,г). Временная динамика длины волны была аналогична динамике в отсутствие ВБР, когда стартовая граница сканирования имеет большие флуктуации  $\sim 1.8$  нм. Для смещения области сканирования проводился нагрев активного волокна, при этом смещение стартовой границы сканирования показано синими квадратиками на рисунке 28. Можно увидеть (Рис. 28), что до температуры активного волокна  $35^\circ\text{C}$  происходит рост значения стартовой границы. Однако, при температуре свыше  $35^\circ\text{C}$  рост прекращается, когда стартовая граница достигает длины волны



отражения ВБР, что свидетельствует о привязке границы к ВБР (Рисунок 30-б,д). При этом флуктуации конечной границы уменьшаются до  $\sim 15$  пм. Для сравнения (на рисунке 30-в,е) представлена динамика длины волны лазера при температуре  $45^\circ\text{C}$  без добавления ВБР. Как видно, стартовая граница также имеет большие флуктуации, достигающие  $\sim 1.5$  нм. Стоит отметить, что в отличие от стабилизации конечной границы для стартовой границы наблюдалось стабилизация при всех использованных в экспериментах коэффициентах отражения ВБР (от 27 до 85 %).

### с) Одновременная стабилизация стартовой и конечной длин волн сканирования

Как можно заметить из рисунка 28, использованные ВБР позволяют стабилизировать границы в одинаковом диапазоне температур от  $35$  до  $45^\circ\text{C}$ . Этот факт позволяет использовать две ВБР для одновременной стабилизации двух границ. Для этого в схему лазера было вставлено одновременно ВБР с  $\lambda=1064$  нм,  $R\sim 27\%$  и ВБР  $\lambda=1080.8$  нм,  $R\sim 34\%$  (Рис. 31).

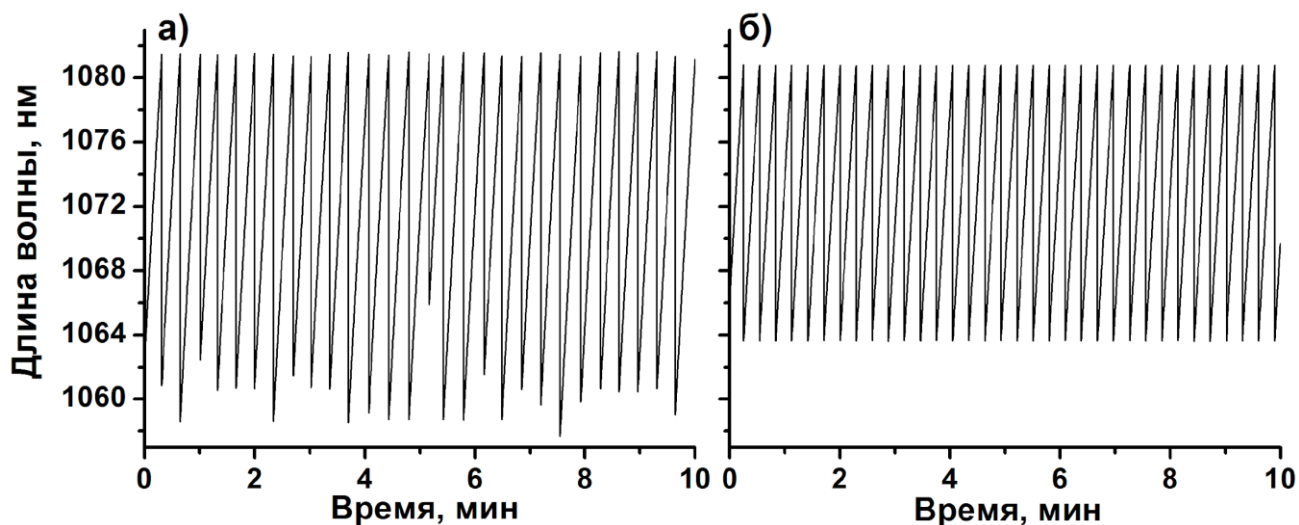


Рисунок 31 – Временная динамика самосканирующего лазера: а) без ВБР, б) с двумя ВБР.

На рисунке 31 представлено сравнение временных динамик длины волны лазера в конфигурациях без и с двумя ВБР. Можно отметить, что в отсутствии каких-либо селекторов (Рис. 31-а) конечная граница сканирования имеет флуктуации порядка 100 пм, а стартовая граница сканирования имеет флуктуации порядка 1500 пм. При одновременном добавлении двух ВБР флуктуации конечной

и стартовой границ уменьшаются до 9 пм и 6 пм соответственно (Рис. 31-б). Итоговые результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения флуктуаций границ диапазона сканирования до и после добавления ВБР

Граница диапазона самосканирования	Величина флуктуаций без использования схемы стабилизации на основе ВБР	Величина флуктуаций с использованием схемы стабилизации на основе ВБР
Стартовая	1500 пм	6 пм
Конечная	100 пм	9 пм

### 2.3 Механизм стабилизации границ сканирования

Основываясь на полученных результатах, можно объяснить процесс стабилизации границ сканирования следующей качественной моделью (схематичное изображение представлено на рисунке 32). Перестройка частоты происходит в волоконных лазерах с самосканированием частоты благодаря формированию динамической обратной связи в активной среде [3]. Важным моментом при формировании границ сканирования является момент скачкообразного перехода длины волны с конца в начало диапазона сканирования. В случае отсутствия каких-либо селекторов в резонаторе этот переход определяется конкуренцией двух максимумов, образующих контур усиления-потерь: широкополосного контура усиления итербия и узкополосного пика отражения динамической решетки [96]. Профиль общего коэффициента усиления и потерь достигает насыщения на нулевом уровне в логарифмической шкале, что соответствует условию равенства усиления и потерь (Рис. 32-а). В это время стоячая волна формирует динамическую решетку показателя преломления, вызывающую отражение с шириной линии порядка 50 МГц, которая является единственным селективным элементом в резонаторе. Пик, индуцированный узкополосной динамической решеткой, преобладает над широкополосным контуром усиления-потерь во время процесса самосканирования (Рис. 32-а). В процессе сканирования происходит смещение узкополосного пика с широкополосного максимума усиления итербия, и величина усиления в

максимумах этих пиков начинает выравниваться. В тот момент, когда усиление в широкополосном максимуме становится больше, чем в узкополосном, происходит резкое изменение длины волны, и процесс начинается заново. При смене длины волны лазер начинает генерировать излучение на длине волны, которая имеет наибольшую разность между усилением и потерями. Как правило, флуктуации границ диапазона самосканирования имеют величину порядка 1 нм, что связано с большой шириной контура усиления и его температурными флуктуациями.

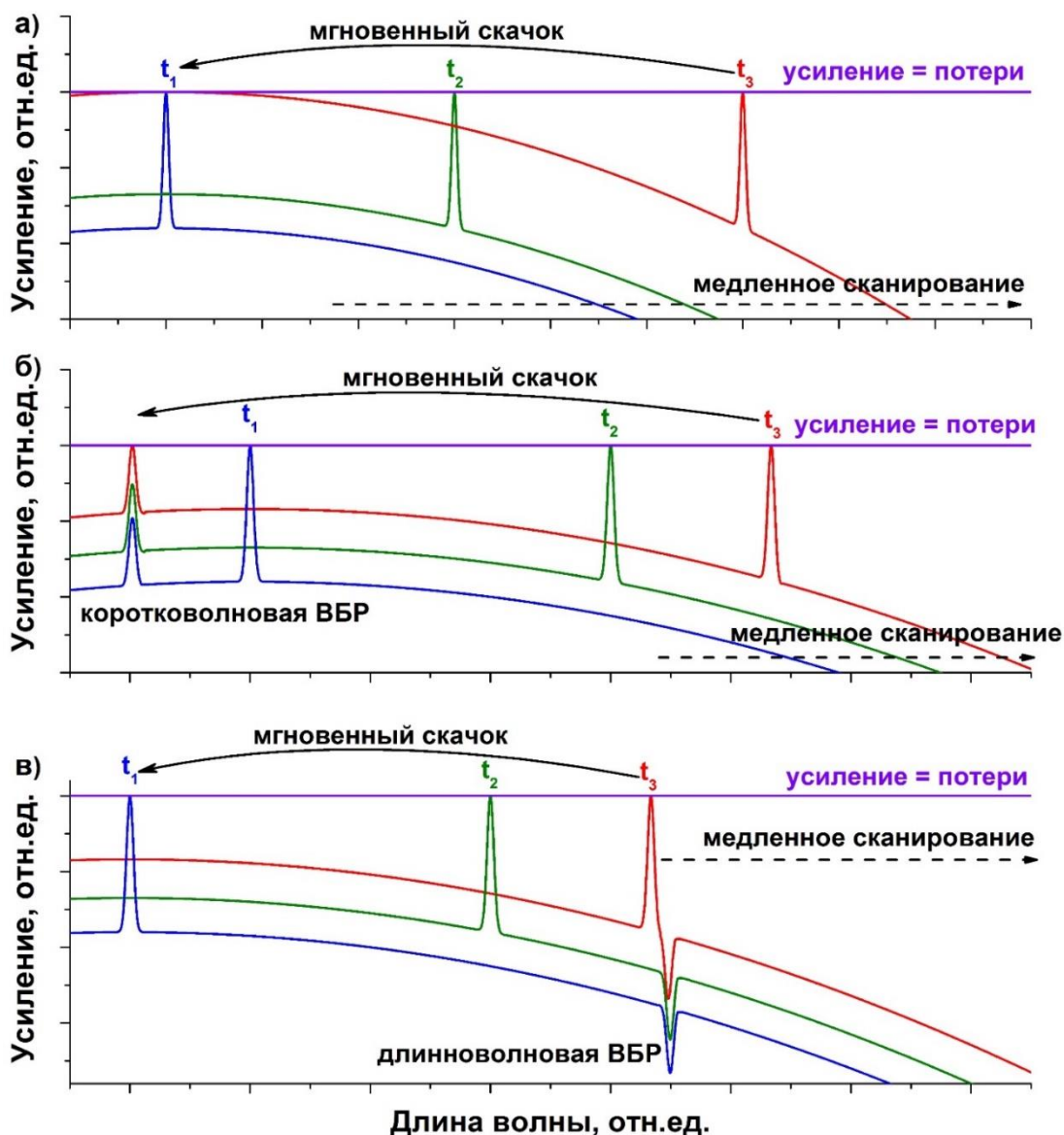


Рисунок 32 – Качественная динамика контура усиление-потери в процессе самосканирования: а) без дополнительных ВБР; б) с коротковолновой ВБР, расположенной между плотным широкополосным зеркалом и объединителем накачки, в) с длинноволновой ВБР, расположенной внутри плотного широкополосного зеркала. Верхняя линия на рисунках соответствует условию равенства усиления и потерь. Длина волны лазера со временем увеличивается от короткой (синяя линия) до длинной (красная линия).

Стабилизация стартового и конечного значений длины волны сканирования определяется как длиной волны узкополосного селектора, так и его расположением относительно плотного зеркала. В частности, добавление ВБР в высокоотражающее волоконное кольцевое зеркало (ВКЗ) приводит к селективным потерям, что помогает стабилизировать конечную границу сканирования. Добавление ВБР перед ВКЗ приводит к небольшому селективному увеличению коэффициента отражения, что отражается на стабилизации стартовой длины волны. Добавление коротковолновой ВБР между широкополосным зеркалом и объединителем накачки приводит к появлению узкого пика, соответствующего увеличению усиления в узкой области на фоне широкополосного контура усиления (Рис. 32-б). Очевидно, что при перескоке длины волны в коротковолновую область, начальное значение будет задаваться длиной волны селектора. В случае применения в качестве селектора ВБР, спектральная ширина которого существенно меньше ширины контура усиления, то и разброс стартовой длины волны уменьшится.

В случае длинноволновой ВБР происходит стабилизация конечной длины, но механизм несколько отличается от случая коротковолновой ВБР. При добавлении ВБР внутри широкополосного зеркала приводит к селективному увеличению потерь, и соответствующему уменьшению отражения в узкой области. При этом на фоне широкополосного контура усиления образуется узкий провал (Рис. 32-в). В процессе сканирования узкополосный пик динамической решетки достигает провала и этот момент, когда усиление в широкополосном максимуме иттербия становится больше, чем в узкополосном провале, происходит мгновенный скачок, и процесс сканирования начинается заново. При этом конечное значение длины волны будет задаваться длиной волны селектора. ВБР, установленная внутри ВКЗ, приводит к дополнительным селективным потерям, что способствует инициации перескока длины волны (завершению цикла сканирования).

Для подтверждения механизма стабилизации границ сканирования был измерен спектр пропускания использованного отражателя, состоящего из ВКЗ и двух ВБР, показанный на рисунке 33. Из спектра можно увидеть, что добавление ВБР непосредственно перед ВКЗ приводит к уменьшению пропускания (т.е. увеличению отражения), а добавление ВБР внутрь ВКЗ приводит к увеличению пропускания (т.е. к уменьшению отражения). Следует отметить, что разрешение

используемого в измерениях анализатора оптических спектров Yokogawa AQ6370 (0.02 нм) не позволяет увидеть модуляцию спектров пропускания, связанную с формированием вложенных интерферометров, а представленные спектры являются результатом усреднения. Кроме того, в измерениях пропускания составного зеркала использовалась ВБР с  $\lambda=1064$  нм и коэффициентом отражения  $R\sim 85\%$ , а в эксперименте по стабилизации обеих границ использовалась ВБР с меньшим коэффициентом отражения  $R\sim 27\%$ . На стабилизацию границы сканирования уменьшение коэффициента отражения не оказывает влияния, а в усреднённом спектре пропускания составного зеркала провал в пропускании на длине волны 1064 нм становится сравним с уровнем шумов.

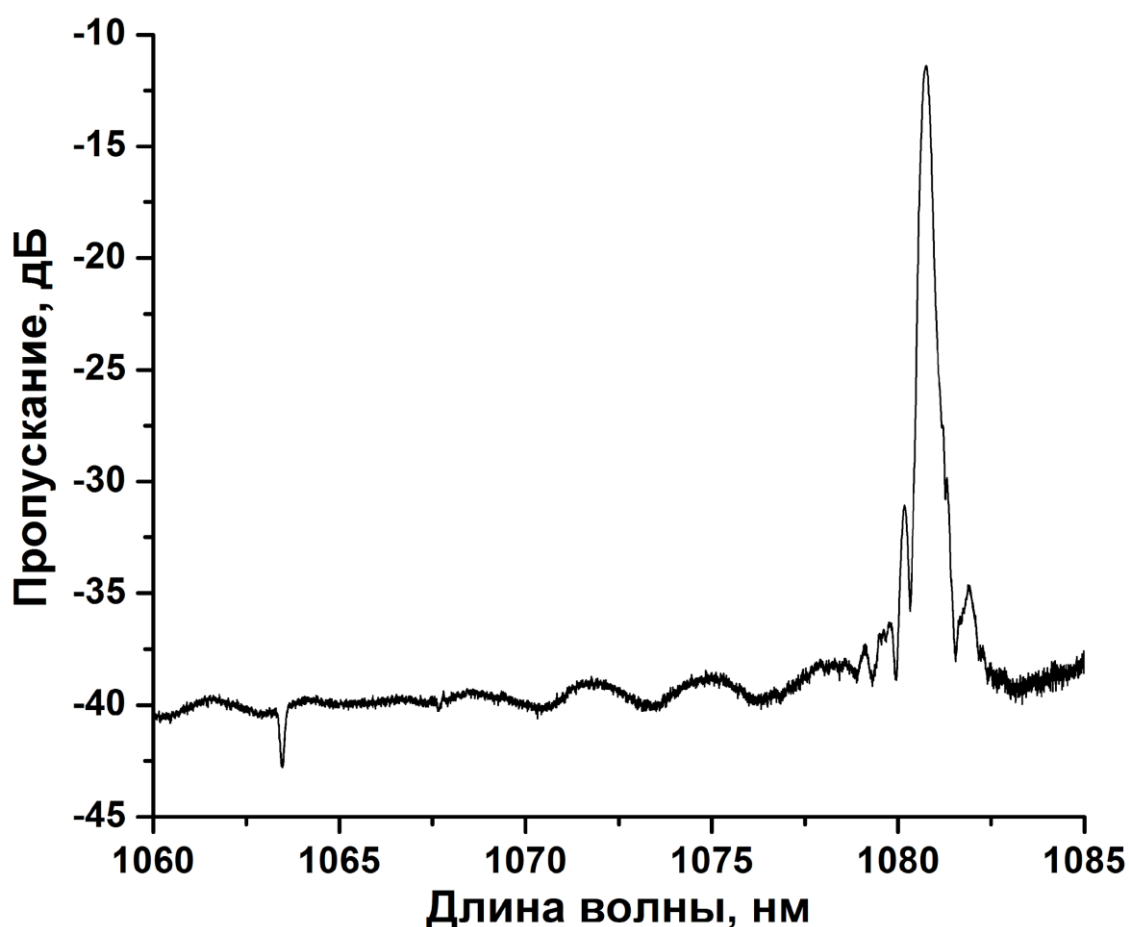


Рисунок 33 – Спектр пропускания ВКЗ с двумя ВБР  $\lambda=1064$  нм и  $\lambda=1080.8$  нм.

В случае добавления коротковолновой и длинноволновой ВБР на выходе лазера также наблюдается стабилизация соответствующей границы сканирования. В момент перескока в коротковолновую область, начальное значение также будет задаваться длиной волны селектора. Однако в случае длинноволновой ВБР механизм стабилизации несколько отличается от случая ВБР в ВКЗ. В этом случае,

важным условием для стабилизации является согласование модовых структур связанных резонаторов – самосканирующего лазера и интерферометра Майкельсона. Генерация всегда начинается в области наибольшего превышения над порогом. Для селективного уменьшения превышения над порогом (то есть уменьшения коэффициента отражения выходного селектора) можно использовать ВБР. При этом важно рассогласовать моды составного резонатора. То есть, стабилизация конечной длины волны наблюдается, если после мгновенного скачкообразного изменения длины волны, все последующие соседние лазерные моды, расположенные вблизи максимума пика отражения динамической решетки показателя преломления, совпадают с минимумами отражения интерферометра Майкельсона. В этом случае даже небольшое уменьшение отражательной способности может вызвать скачок от конечной длины волны к начальной.

## **Заключение к главе 2**

В главе 2 предложены методы стабилизации границ диапазона сканирования, которые позволяют повысить предсказуемость перестройки длины волны генерации волоконных самосканирующих лазеров, что очень важно для их практических применений.

Предложен метод стабилизации границ с помощью слабой селективной обратной связи, образованной парой ВБР. Подбор коэффициента отражения селектора позволяет уменьшить флуктуации границ сканирования с 1100 до 13 пм для нижней границы и со 110 до 7 пм для верхней границы. Однако существует ограничения, связанные с малыми коэффициентами отражения (~ 0.01-0.1%) узкополосного селектора, что делает невозможным использование стандартных ВБР и существенно увеличивает потери в выходном сигнале.

Второй метод стабилизации основан на применении спектральных селекторов в виде высокоотражающих ВБР, расположенных со стороны плотного зеркала лазера. Этот метод позволяет 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. Также данный подход имеет неоспоримое преимущество, поскольку не накладывает ограничения на используемые ВБР.

### 3. Системы опроса ВБР на основе самосканирующего лазера

В предыдущих разделах были оптимизированы параметры самосканирующего лазера (раздел 1) и проведена стабилизация границ диапазона сканирования с помощью ВБР (раздел 2). Это позволило качественно улучшить характеристики самосканирующего лазера. Как следствие подобные лазеры могут быть использованы в практических задачах. В настоящей главе представлены результаты по демонстрации применения самосканирующих лазеров для задач опроса ВОД на основе ВБР.

#### 3.1 Обработка данных с самосканирующего волоконного лазера.

Важной частью практических применений самосканирующего лазера является процедура обработки полученных данных. Известно, что такие лазеры работают в импульсном режиме с генерацией микросекундных импульсов. В экспериментах использовался лазер с квазирегулярными одночастотными импульсами (Рис. 15а). В этом случае один импульс соответствует одной продольной моде, а оптическая частота меняется от одного импульса на одну ОСД  $\sim 5.5$  МГц. Импульсы имеют спектральную ширину не более  $\sim 1$  МГц. В этом случае длину когерентности излучения лазера можно оценить как  $\sim 200$  метров. Таким образом, для используемого лазера с самосканированием частоты один импульс во временной области соответствует одной определенной оптической частоте в спектральной области. Поскольку процесс самосканирования является самоиндуцированным, то импульсы имеют флуктуации мощности. Для устранения влияния флуктуаций мощности входного излучения необходимо проводить процедуру поимпульсной нормировки полезного сигнала на опорный, схема представлена на рисунке 34.

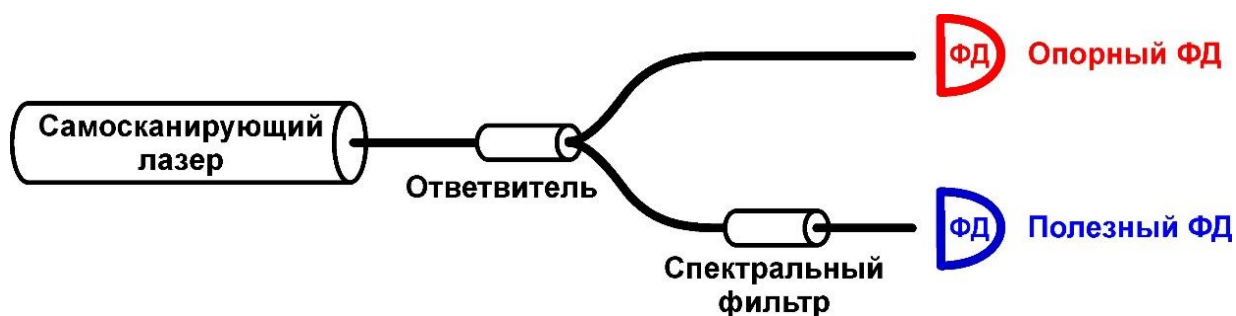


Рисунок 34 – Схема поимпульсной нормировки полезного сигнала на опорный сигнал.

В сигнале опорного канала осуществлялся поиск положений импульсов и пиковых значений для каждого импульса (Рис. 35-а). Далее, по соответствующим положениям вершин импульсов в полезном сигнале также вычислялись пиковые значения импульсов (Рис. 35-б). Для каждого импульса в двух сигналах вычислялся интеграл вблизи вершины импульса, т.е. по сути, вычислялась энергия импульсов. После этого производилось поимпульсное деление значений полезного сигнала на опорный сигнал. В результате описанной процедуры получается зависимость нормированной амплитуды сигналов от времени (Рис. 35-в). Основная проблема самосканирующего лазера это неопределённость длины волны во времени, т.е. нельзя заранее с высокой точностью предсказать длину волны, т.к. она меняется за счет внутренних процессов. По этой причине, для практических задач требуется постоянное измерение длины волны во времени. Перевод времени в частотную область может осуществляться двумя подходами: с помощью внешнего интерферометра и с использованием свойств самосканирующего лазера. В последнем случае интерферометром выступает, по сути, резонатор самого лазера. Каждый из этих подходов был проверен в устройствах опроса.

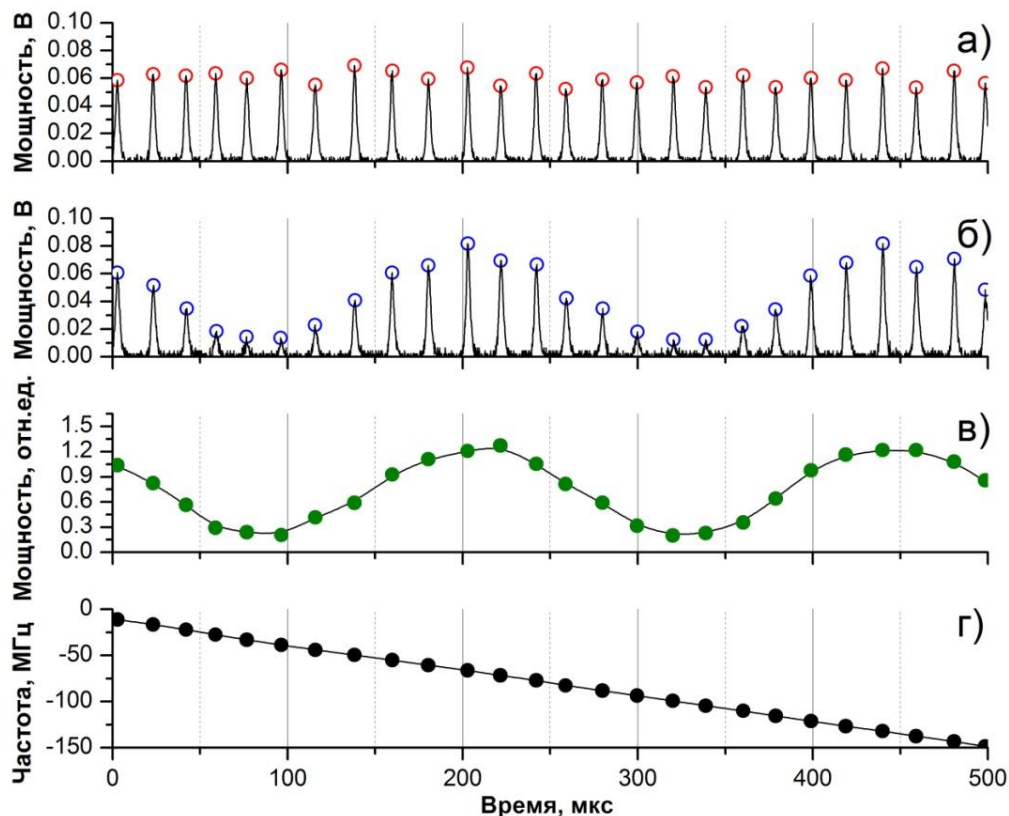


Рисунок 35 – Качественная демонстрация процесса обработки сигналов в самосканирующем лазере.



### 3.2 Устройство опроса ВБР со спектральным разделением каналов

В устройстве опроса ВБР со спектральным разделением каналов изменения длины волны измерялось с помощью волоконного интерферометра Маха-Цендера. Привязка к абсолютной длине волны осуществлялась с помощью узкополосного селектора в виде ВБР с известной длиной волны отражения (далее будем называть ее реперной ВБР). Функциональная схема устройства опроса представлена на рисунке 36 [97].

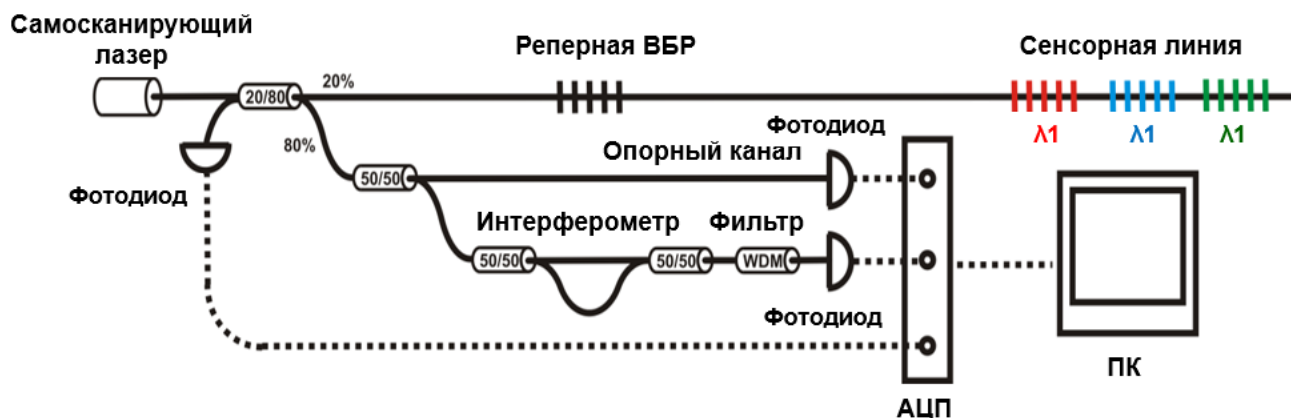


Рисунок 36 – Функциональная схема устройство опроса ВБР со спектральным разделением каналов на основе самосканирующего лазера.

Оптический сигнал от самосканирующего лазера проходит через разветвитель 20/80, и 20 % мощности подается в оптический канал, содержащий реперную ВБР и сенсорную линию; 80 % мощности излучения также делится вторым разветвителем 50/50. Далее часть излучения проходит через волоконный ИМЦ с ОСД ~600 МГц (Рисунок 37-в,г) и через спектрально-селективный фильтр 1045/1095 нм. Спектрально-селективный фильтр дополнительно вносит амплитудную модуляцию с целью определения момента скачка длины волны в сигнале. Третья часть излучения проходит без каких-либо изменений и служит опорным сигналом (Рисунок 37-а, б).

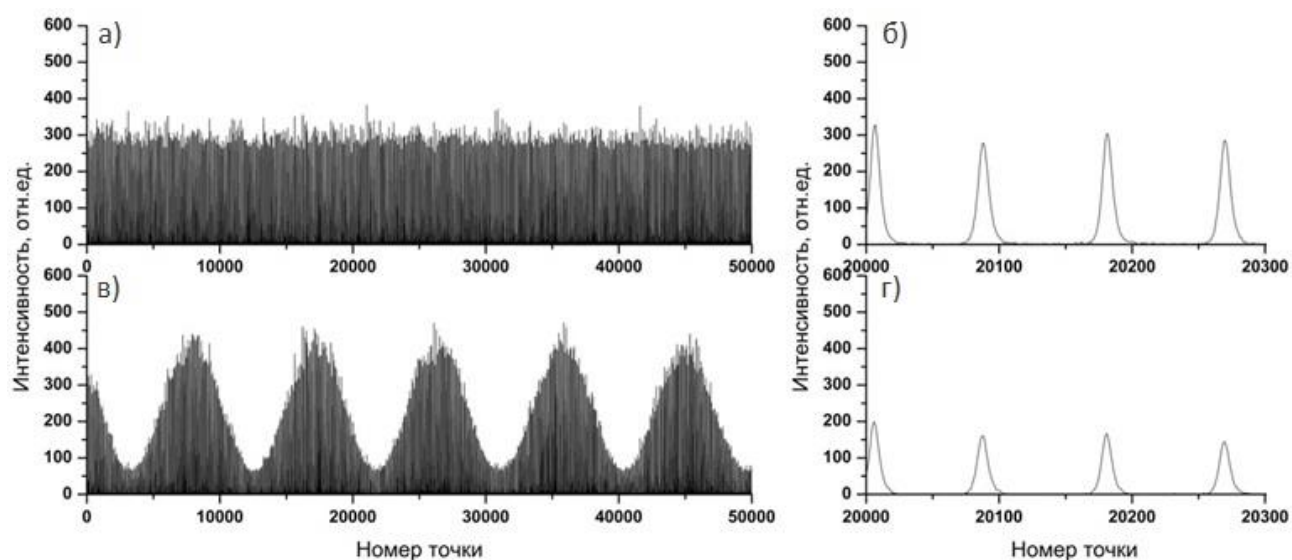


Рисунок 37 – Сигналы в схеме устройства опроса : а) опорный сигнал источника б) увеличенный масштаб; в) сигнал после ИМЦ с областью свободной дисперсии ~600 МГц; г) увеличенный масштаб.

Сигнал, отраженный от сенсорной линии и прошедший через интерферометр, и опорный сигнал регистрируются тремя быстрыми InGaAs фотодетекторами (полоса ~1 ГГц). Далее сигналы с фотодетекторов оцифровываются АЦП с общей полосой 10 МГц (E20-10, LCard), поступают в режиме реального времени на персональный компьютер через интерфейс USB2.0 и проходят процедуру обработки, описанную в пункте 3.1. В итоге получалось два нормированных сигнала: 1) отраженный от линии с ВБР и 2) прошедший через интерферометр.

Сигнал, прошедший через интерферометр и , и сигнал, отраженный от реперной ВБР, позволяли восстановить временную динамику длины волны, т.е. зависимость длины волны от времени. Эта зависимость использовалась для перевода временной шкалы в длину волны в сигнале, отраженном от ВБР. Как результат восстанавливался спектр отражения сенсорной линии.

Исходя из типичных значений сдвига длины волны, диапазона сканирования лазера и требуемого диапазона температур (от -100°C до 100°C) было рассчитано, что каждый ВБР-сенсор должен иметь запас  $\pm 1$  нм. Для апробации устройства опроса была реализована сенсорная линия из 6 ВБР на длинах волн 1060, 1062, 1064, 1068, 1072, 1074 нм, попадающих в область сканирования лазера. В качестве реперной была выбрана ВБР с длиной волны 1066 нм. Характерный спектр отражения, полученный с помощью предложенной схемы опроса, представлен на

рисунке 38. Для демонстрации воспроизведения данных на рисунке наложено 4 реализации.

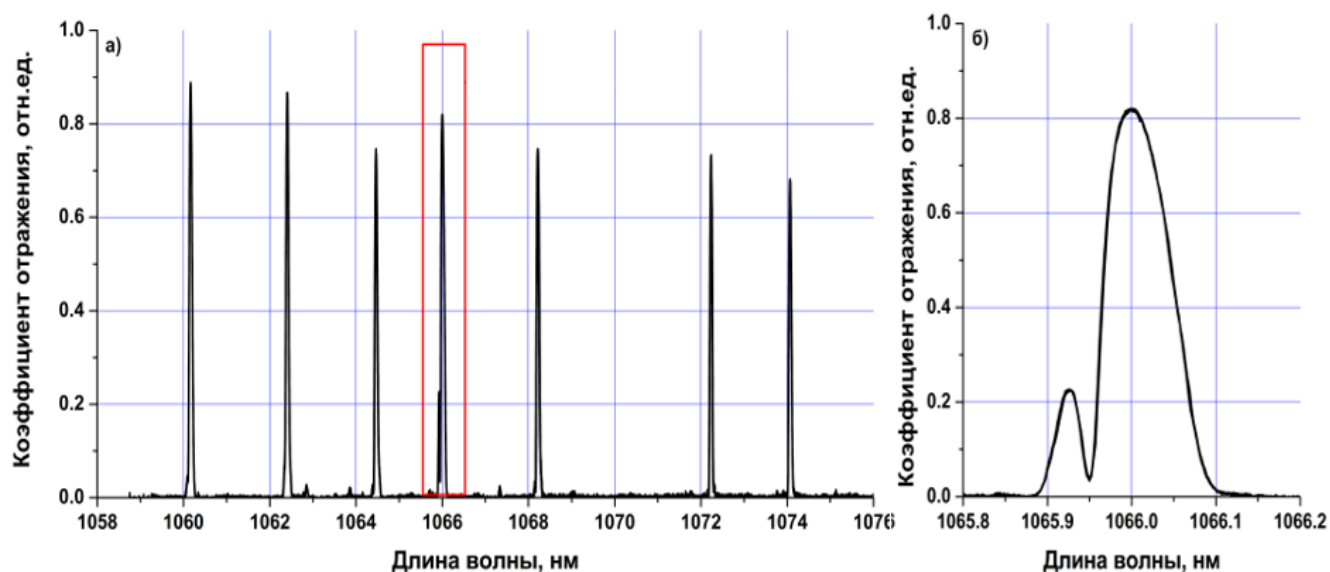
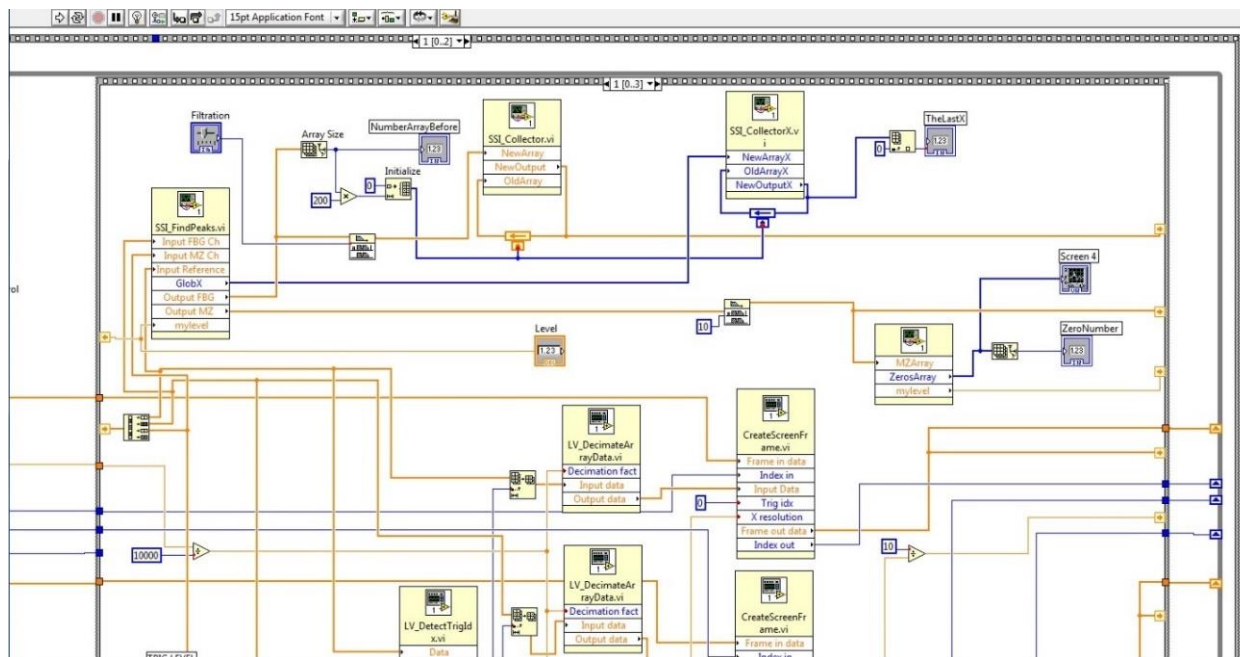


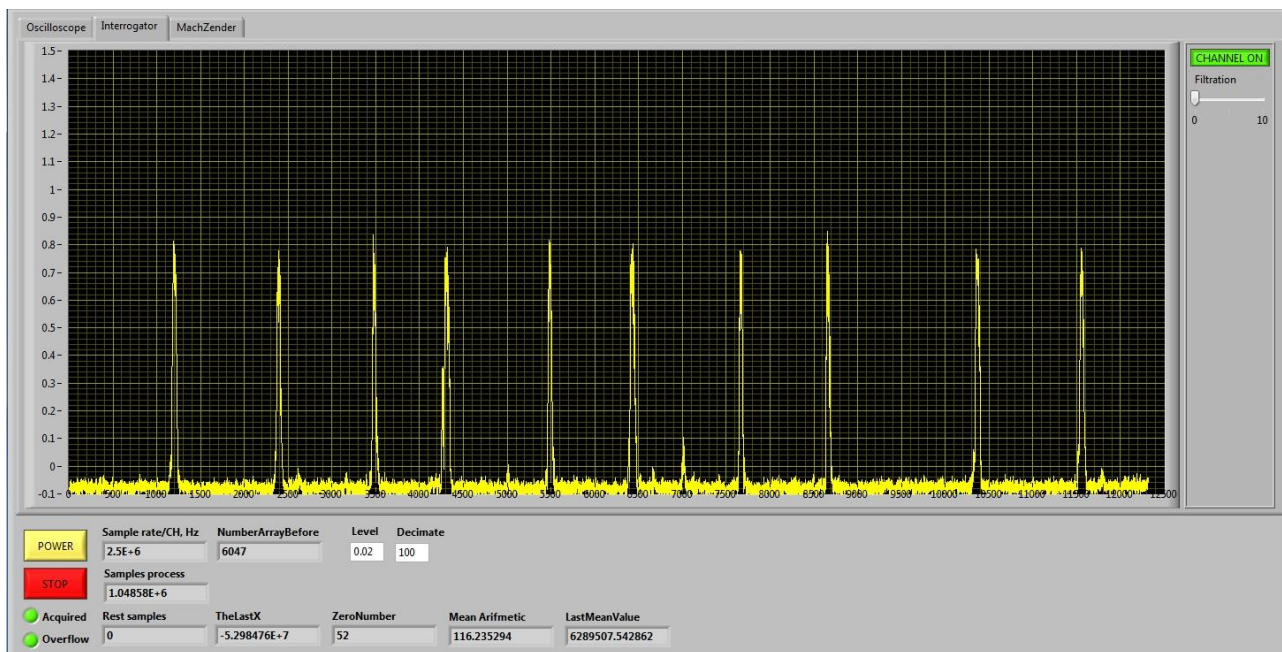
Рисунок 38 – а) Спектры отражения сенсорной линии, измеренные с помощью разработанного устройства опроса, на рисунке наложено 4 реализации; б) Спектр отражения реперной ВБР, измеренные с помощью разработанного устройства опроса, на рисунке наложено 4 реализации.

Обработка получаемых с АЦП данных была реализована в среде разработки с графическим языком программирования LabVIEW. Программа в LabVIEW состоит из блочной диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора (Рисунок 39-а), и лицевой панели, описывающей внешний интерфейс виртуального прибора (Рисунок 39-б). Блочная диаграмма содержит встроенные функциональные узлы, которые являются источниками, приёмниками или средствами обработки данных. Также в качестве компонент блочной диаграммы могут быть текстовые структуры, являющиеся аналогами таких элементов текстовых языков программирования, как условный оператор «IF», операторы цикла «FOR» и «WHILE» и др. между собой функциональные элементы диаграммы объединены в единую схему линиями связей. К преимуществам такой реализации обработки можно отнести доступность и простоту реализации. Также, LabVIEW основан на архитектуре потоков данных, что значит, что последовательность выполнения операторов определяется не порядком их следования, а наличием данных на входах этих операторов. Поэтому, операторы, не связанные по данным, выполняются параллельно в произвольном порядке. К недостаткам можно отнести ограниченность встроенных функциональных узлов,

что приводит к необходимости использования текстовых элементов и снижению скорости выполнения программы.



а)



б)

Рисунок 39 – Программа в LabVIEW а) блочная диаграмма программы, б) внешний интерфейс виртуального прибора.

Для апробации устройства опроса одна ВБР с длиной волны отражения вблизи 1074 нм была помещена в термостат, который позволяет нагревать волокно

до 90 °С. Нагрев приводил к смещению спектра длины волны отражения ВОД в длинноволновую область спектра. Было проведено сравнение полученной температурной зависимости датчика с аналогичной зависимостью, полученной с помощью анализатора оптических спектров (AQ6370 Yokogawa). Полученные результаты, представленные на рисунке 40, показывают, что измерения, сделанные с помощью устройства опроса и коммерческого спектроанализатора, находятся в хорошем согласии между собой.

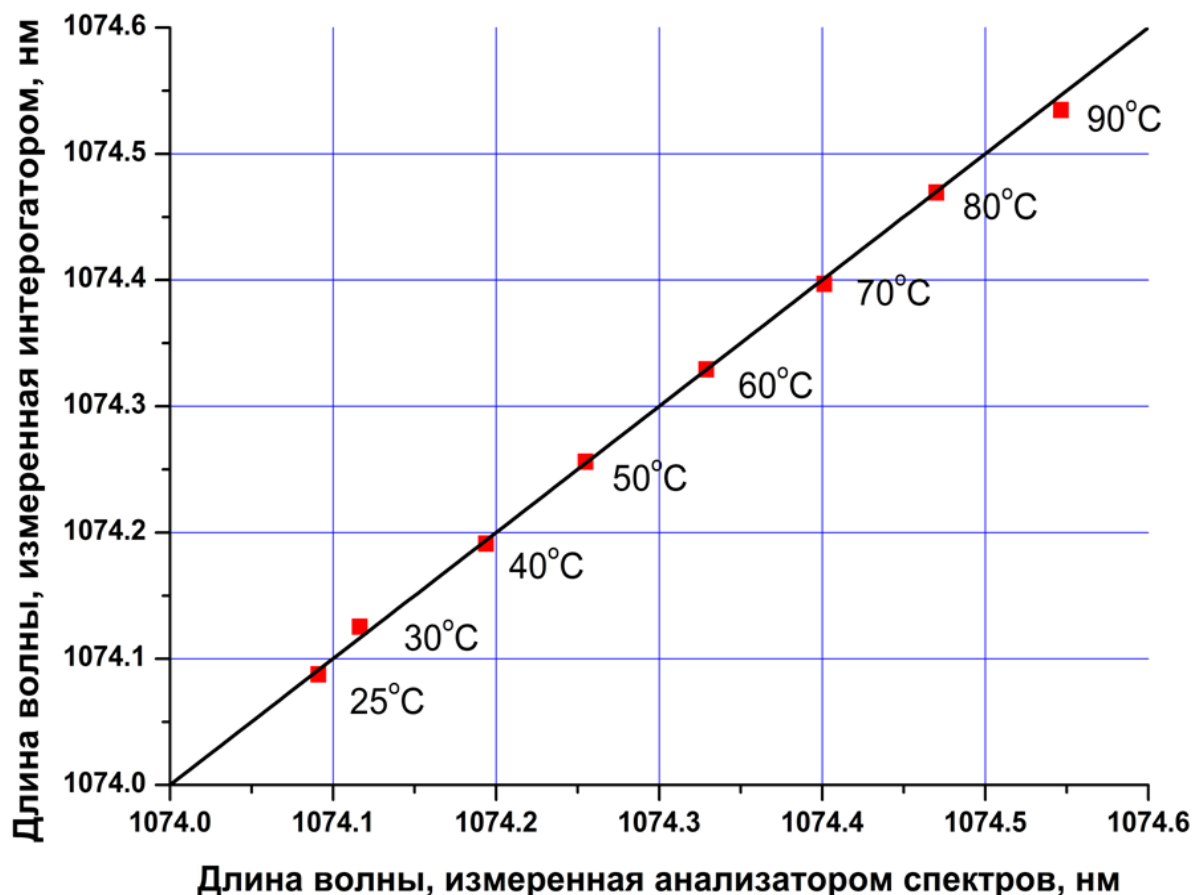


Рисунок 40 – Сравнение измерений длин волны отражения точечного датчика, произведенных с помощью разработанного устройства опроса и анализатора оптических спектров при разных температурах ВБР-датчика.

Поскольку каждая точка в спектре отражения соответствует одной оптической частоте, устройство опроса позволяет прописывать спектры отражения ВБР-датчиков с дискретностью порядка 5.5 МГц (~20 фм), что определяется скачком частоты между импульсами. С помощью данной величины можно дать оценку спектральному разрешению схемы. Стоит отметить, что спектральное разрешение коммерческих спектроанализаторов составляет ~10 пм, это на три порядка больше, чем в реализованном устройстве опроса. Точность

определения длины волны максимума отражения решетки определяется как областью свободной дисперсии интерферометра  $\sim 2$  пм ( $\sim 600$  МГц), так и спектральными ширинами ВБР ( $\sim 30$  ГГц). Несмотря на то, что ширины спектров отражения репера и сенсоров достаточно велики, точность определения положения максимума была сравнима с областью свободной дисперсии интерферометра. Это было обеспечено применением алгоритма поиска максимума отражения с аппроксимацией квадратичным полиномом. Это означает, что устройство позволяет определять температуру ВБР датчиков с точностью  $\sim 0.3$  °С. Скорость опроса датчиков составила  $\sim 0.05$  Гц, что определяется скоростью сканирования и диапазоном сканирования. Полученный диапазон сканирования  $\sim 18$  нм позволяет измерять до 9 датчиков в одноканальном режиме при спектральном расстоянии между датчиками 2 нм [3]. На рисунке 41 представлена фотографии реализованного устройства опроса.



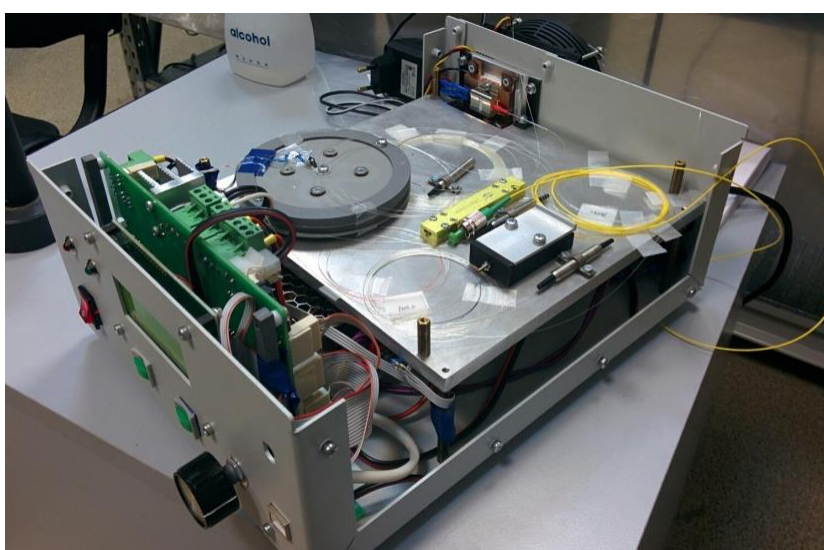
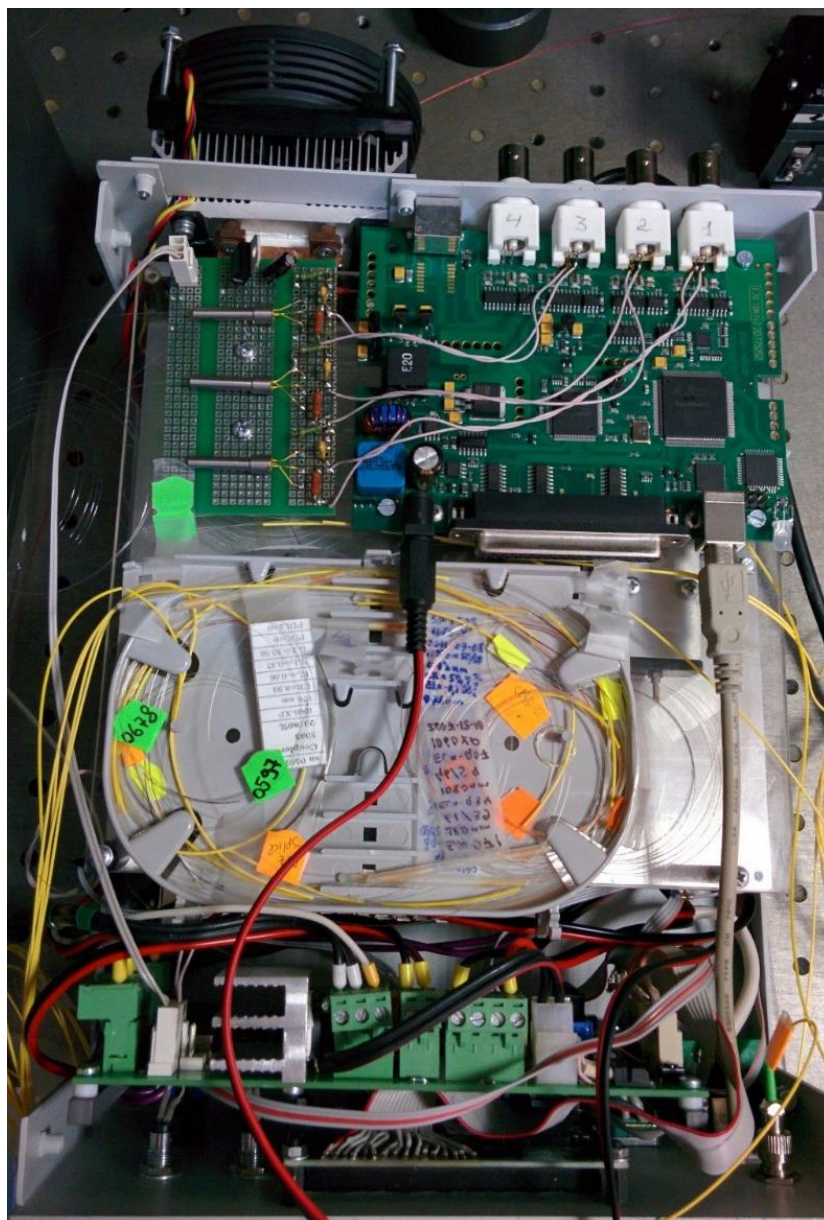


Рисунок 41 – Фотографии реализованного устройства опроса на основе самоканирующего лазера.

## Заключение к разделу 3.2

Устройство опроса на основе самосканирующего лазера было апробировано на сенсорной линии, состоящей из 6 ВБР-датчиков. Точность определения длины волны отражения датчиков оценена как  $\sim 2$  пм, что сравнимо с имеющимися коммерческими аналогами. При этом спектральное разрешение реализованного устройства опроса на порядки превосходит аналоги. К недостаткам можно отнести ограниченное количество ВБР, обусловленное диапазоном перестройки самосканирующего лазера. Однако, относительно большая пиковая мощность излучения (более 400 мВт) позволяет использовать устройство для одновременного опроса множества сенсорных линий.

Также существуют возможности улучшения характеристик данной схемы. Скорость сканирования может быть увеличена с помощью повышения частоты повторения импульсов (до 200 кГц в [98]) и/или скачка частоты между импульсами (до 12 МГц в [76]). Таким образом, можно ожидать увеличения скорости сканирования до  $\sim 10$  нм/с. К недостаткам устройства опроса можно отнести неоптимальность спектральной области сканирования, так как значительная часть коммерчески доступных ВБР-датчиков работает в области прозрачности оптического волокна  $\sim 1.5$  мкм. К сожалению, на данный момент область самосканирования лазера с генерацией в области 1.5 мкм составляет несколько нм [77, 81], что делает его малоприменимым для практических приложений. Альтернативой могут служить лазеры на основе висмутовой активной среды. В работе [80] была продемонстрирована работа висмутового лазера с самосканированием частоты, с диапазоном сканирования более 10 нм в области 1.46 мкм, что достаточно близко к окну прозрачности оптоволокна. Дальнейшее смещение может быть достигнуто за счет подбора состава волокна и длины волны накачки.

К недостаткам данной системы можно отнести проблемы с работой АЦП, а именно переполнение буфера и потери части данных при длительных измерениях в режиме реального времени. Эту проблему удалось устранить (описано в разделе 3.3), используя отладочную плату с микроконтроллером со встроенным АЦП. В этом случае оцифровка и процедура поимпульсной нормировки сигналов происходит непосредственно на микроконтроллере.



### 3.3 Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе самосканирующего лазера для опроса ВБР

Реализованная выше схема устройства опроса ВБР со спектральным разделением каналов обладает рядом недостатков: 1) ограниченность числа используемых датчиков в линии из-за области сканирования, 2) необходимость использования внешнего интерферометра для измерения длины волны источника, 3) обработка результатов осуществлялась на внешнем компьютере, что требовало передачу больших потоков данных. Все эти недостатки были учтены при демонстрации когерентного оптического частотного рефлектометра (КОЧР) на основе самосканирующего лазера для устройства опроса ВБР с гибридным разделением каналов. Для реализации пространственного разрешения была применена техника оптической частотной рефлектометрии [17]. Для исключения интерферометра для измерения длины волны источника использовалась особенность лазера – оптическая частота меняется дискретным образом между импульсами. А вся основная обработка сигналов была перенесена на микроконтроллер. Функциональная схема устройства опроса представлена на рисунке 42. Качественное объяснение принципа работы КОЧР было представлено во введении.

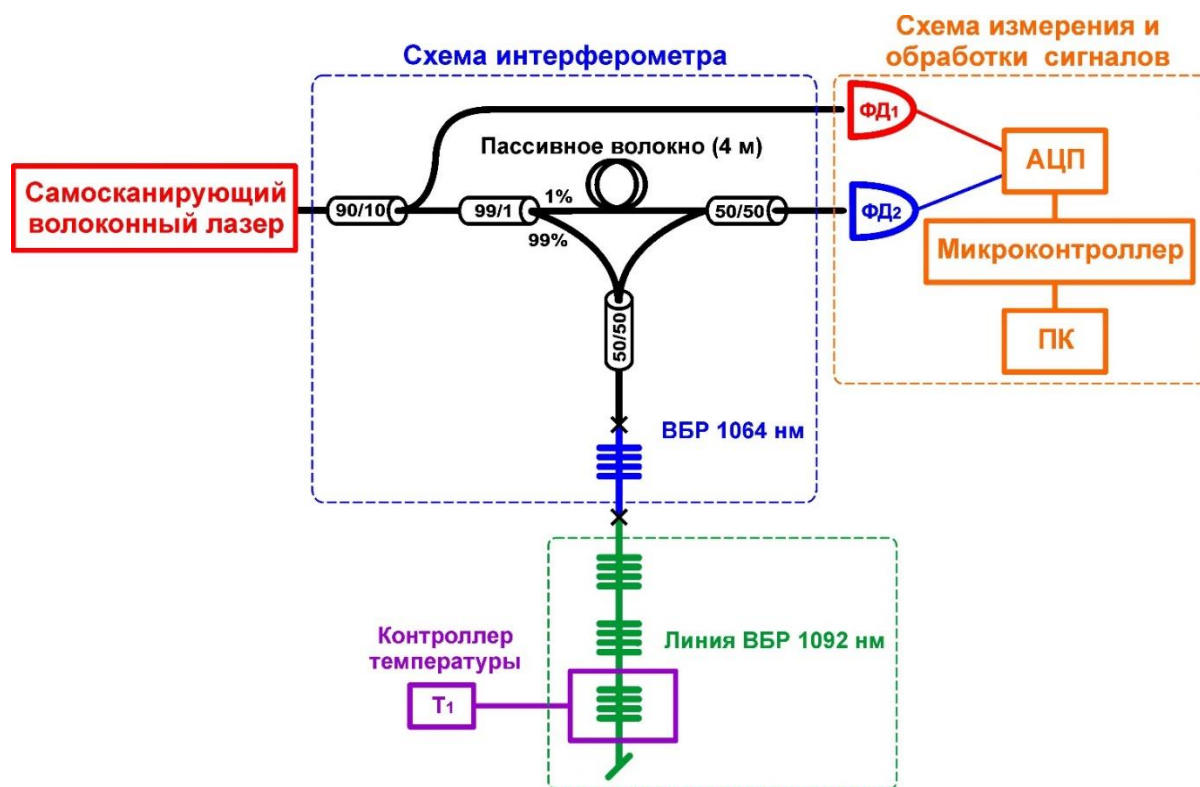


Рисунок 42 – Схема КОЧР на основе волоконного лазера с самосканированием частоты.

Ключевым элементом схемы когерентного оптического рефлектометра, представленной на рисунке 42, является волоконный лазер с самосканированием частоты (Рисунок 14), используемый в предыдущей схеме устройства опроса. Следует отметить, что благодаря тому, что вся схема КОЧР реализована на волокнах и компонентах с сохранением поляризации, нет необходимости дополнительно подстраивать поляризацию сигналов в предложенной схеме частотного рефлектометра по сравнению со схемой, описанной в разделе 3.2. 80 % излучения лазера мощностью 25 мВт поступает в измерительную схему через изолятор. Далее 10 % всей выходной мощности излучения отводилось через разветвитель 10/90 для формирования опорного канала. Излучение лазера с самосканированием частоты пропускается через ИМЦ, одно плечо которого содержит тестируемую волоконную линию (ТВЛ). ИМЦ образован тремя волоконными разветвителями, образующими опорный и измерительный каналы. Первый разветвитель 99/1 делит лазерное излучение между измерительным и опорным каналами в соответствующей пропорции. Отрезок пассивного волокна длиной 4 метра добавлен в опорный канал для выравнивания оптических длин в двух плечах. В этом случае начало ТВЛ соответствует точке, при отражении от которой плечи формируемого интерферометра оказываются выровненными. В качестве ТВЛ в экспериментах использовались обычное волокно или сенсорная линия, состоящая из массива ВБР. К концу линии был приварен РС/АРС-коннектор для подавления паразитного отражения.

Процедура первичной обработки (поимпульсная нормировка) сигналов аналогична процедуре, описанной в разделе 3.1. Отличие состоит в том, что длина волны восстанавливалась не с помощью внешнего интерферометра, а с использованием внутренних свойств сканирующего лазера. Относительная частота  $\nu$  восстанавливалась простым умножением номера импульса  $i$  на величину ОСД резонатора  $d\nu$ :

$$\nu = d\nu i . \quad (9)$$

Таким образом, после процедуры обработки каждая точка в нормированных сигналах соответствует одной оптической частоте. На рисунке 43 представлены качественные изображения сигналов для линии, состоящей из двух точечных отражателей и различными коэффициентами отражения и находящимися на разном расстоянии от источника. В результате процедуры обработки получался один сигнал интерференции между самим входным сигналом и сигналом,

отраженным от линии (Рис.43-а). Рефлектограмма (Рис. 43-б), т.е. продольное распределение отраженного сигнала вдоль волоконной линии, получалась в результате применения преобразования Фурье к зависимости нормированного сигнала интерференции от оптической частоты (номера импульса).

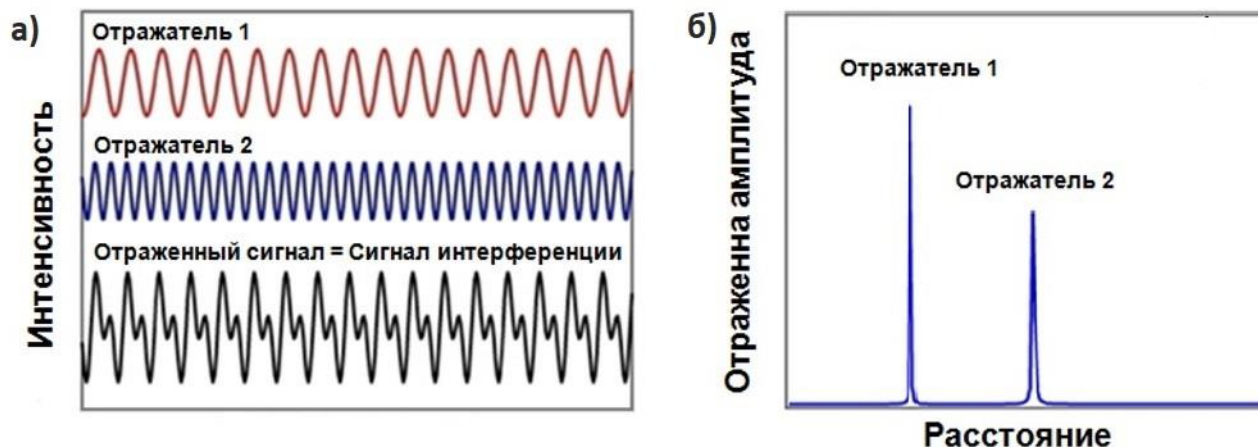


Рисунок 43 — а) сигнал интерференции, б) рефлектограмма.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) позволяет выделить частоты регулярных составляющих сигнала. ДПФ преобразует сигнал во временной области в его аналог в частотной области. Если  $x_n$  - последовательность длины  $N$  (соответствует амплитудам сигнала в частотной области), тогда после ДПФ будет последовательность  $X_k$  (соответствует амплитудам сигнала в пространственной/временной области), заданная формулой:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, \quad (k = 0, \dots, N - 1) \quad , (10)$$

Аналогичное выражение для обратной процедуры:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N}kn}, \quad (n = 0, \dots, N - 1) \quad , (11)$$

где  $N$  - количество значений сигнала, измеренных за период, равный одному сканированию, а также количество компонент разложения;  $x_n$ ,  $n=0, \dots, N-1$ , - измеренные значения сигнала (в дискретных точках частот с номерами  $n=0, \dots, N-1$ ), которые являются входными данными для прямого преобразования и выходными для обратного;  $X_k$ ,  $k=0, \dots, N-1$  - это  $N$  комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, составляющих исходный сигнал; являются выходными данными для прямого преобразования и входными для обратного; поскольку

амплитуды комплексные, то по ним можно вычислить одновременно и амплитуду,  $\frac{|X_k|}{N}$ ; и фазу  $\arg(X_k)$ ;  $k$  - частота  $k$ -го сигнала.

Эффективным способом вычисления ДПФ и уменьшения вычислительной сложности является использование БПФ [100, 101], результат которого содержит частотные данные и результат комплексного преобразования. Процедура БПФ производилась с помощью пакета программ для численного анализа данных Origin8 с помощью встроенной функции FFT (Fast Fourier Transform). Входными данными для функции FFT являлась зависимость нормированной амплитуды интерференционного сигнала от номера импульса (что пропорционально изменению оптической частоты  $\nu = dv i$ ). После FFT получалась зависимость отраженной амплитуды (дБ) от времени  $t$  (сек). Физический смысл этого времени состоит во временной задержке между сигналами в двух плечах ИМЦ. Далее необходимо перевести время в длину линии (м):  $L = t \cdot 2c/n$ , где  $c$  - скорость света,  $n$  – показатель преломления волокна. Коэффициент 2 соответствует двойному обходу по волоконной линии. Как результат получаем распределение отраженной мощности (дБ) от длины линии (м).

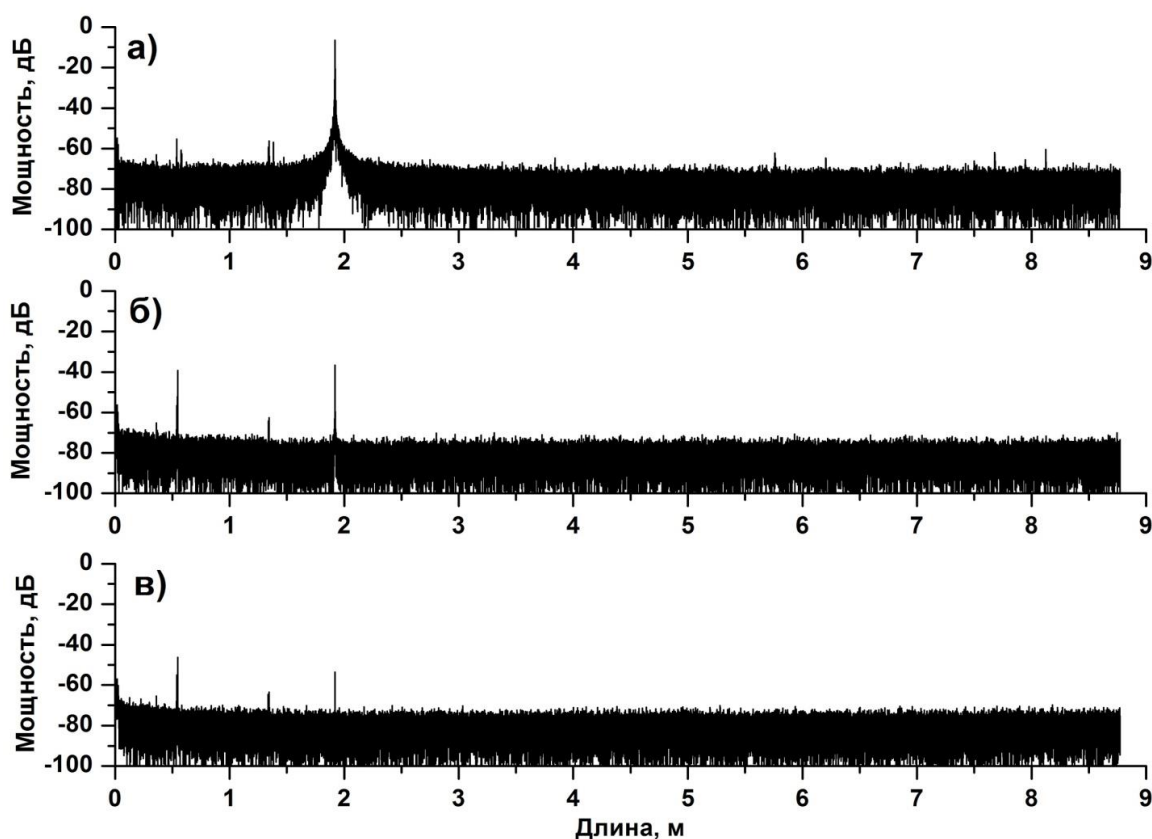


Рисунок 44 – Рефлектограммы ТВЛ длиной 1.92 м для различных степеней ослабления на ослабителе на один проход: (а) 0 дБ (б) -16.7 дБ (в) -25.5 дБ.

### 3.3.1. Определение чувствительности КОЧР

В первом эксперименте в качестве ТВЛ использовалась система, состоящая из волоконного ослабителя и отрезка волокна. Со свободной стороны это волокно скалывалось под прямым углом для формирования отражения Френеля. С помощью переменного ослабителя варьировалась величина эффективного коэффициента отражения. При различных положениях ослабителя, вставленного в тестируемую линию, измерялись рефлектограммы. Для каждого положения ослабителя дополнительно измерялась полная мощность со стороны свободного конца тестируемой линии для контроля степени ослабления. На рисунке 44 приведены примеры рефлектограмм для трех положений ослабителя.

Пространственная дискретизация для сигнала составила  $\sim 200$  мкм. Это значение хорошо согласуется с оценкой пространственного разрешения, согласно формуле (5)  $\delta l = \sim 200$  мкм, где  $\Delta\nu \sim 0,5$  ТГц - диапазон перестройки частоты самосканирующего лазера в течение времени измерения 2 секунды. Следует отметить, что это значение может быть уменьшено до  $\sim 20$  мкм, если для измерений будет использоваться полный диапазон перестройки самосканирующего лазера ( $\sim 7$  ТГц). Можно заметить, что на всех рефлектограммах присутствует интенсивный пик, соответствующий отражению от выходного скола волокна. При этом амплитуда пика уменьшается с увеличением потерь на ослабителе. В случае, когда ослабитель полностью закрыт, т.е. потери максимальны, пик, соответствующий отражению от скола, не наблюдается, поскольку становится меньше уровня шумов. Эффективный коэффициент отражения от прямого скола волокна может быть оценен с учетом потерь, вызванных ослабителем, на основе измерений мощности, выходящей со стороны свободного конца ТВЛ. Прошедшая и отраженная мощности оцениваются как  $P_T = P_0 a (1-R)$  и  $P_R = P_0 a^2 R$  соответственно, где  $P_0$  - входная мощность в ТВЛ,  $a$  - потери в ослабителе, а  $R$  - коэффициент отражения от выходного торца волокна. Таким образом, эффективный коэффициент отражения квадратично зависит от измеряемой со стороны свободного конца тестируемой линии мощности:

$$R_{eff} = a^2 R = R P_T^2 / ((1-R) P_0)^2 \quad (12)$$

Зависимость амплитуды компоненты разложения Фурье, соответствующей отражению от выходного торца ТВЛ, от измеренного по выходной мощности и рассчитанного на основании выражения (11) эффективного отражения  $10 \log(R_{eff})$

показана на рисунке 45. Линейная аппроксимация, построенная в логарифмическом масштабе на рисунке 45, соответствует линейной зависимости амплитуды компоненты Фурье от эффективного коэффициента отражения, оцененного по выражению (12). При этом пересечение линейной аппроксимации с уровнем шумов дает нам оценку минимальной измеряемой величины отражения в ТВЛ порядка  $-79$  дБ, что определяет чувствительность системы. С учетом пространственного разрешения относительный уровень чувствительности можно оценить, как  $\sim -86$  дБ/мм

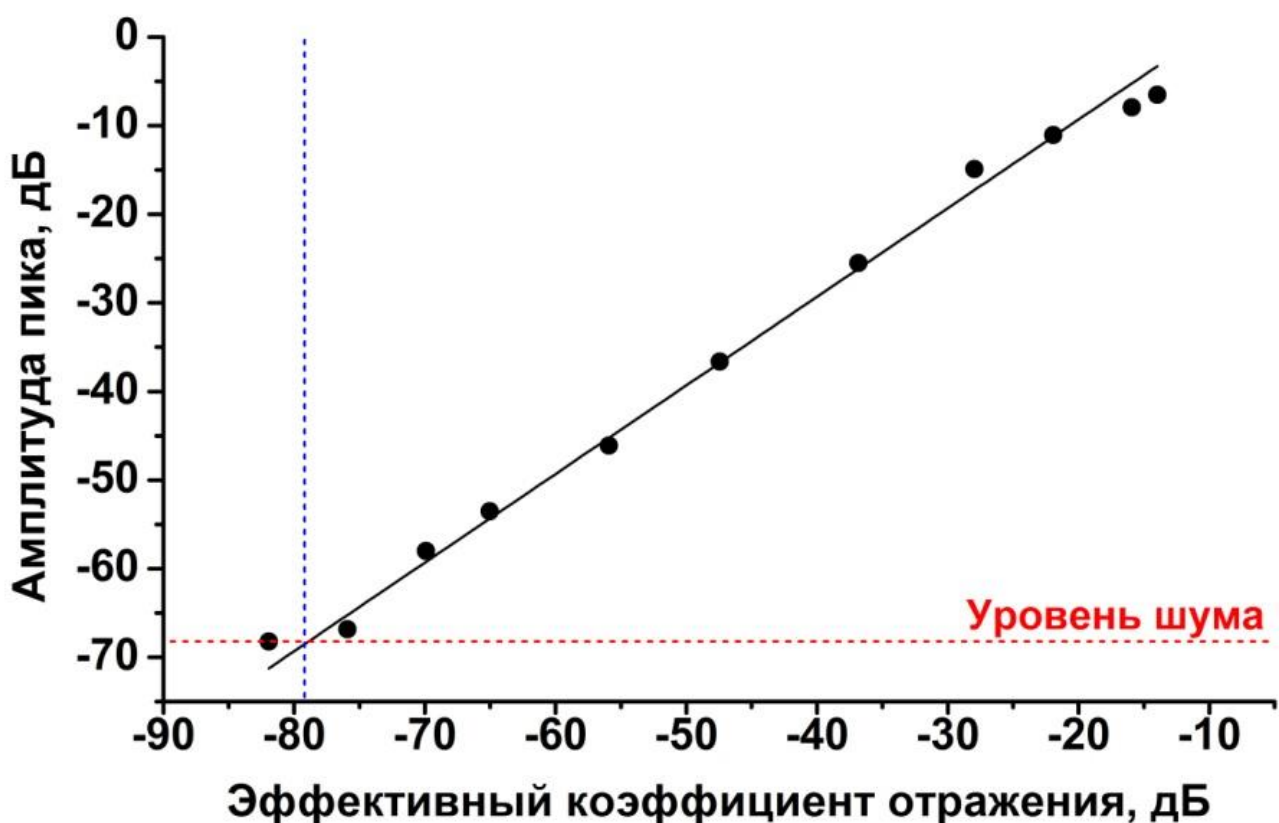


Рисунок 45 – Зависимость амплитуды пика от соответствующего эффективного отражения ослабителя и прямого скола волокна, вычисленная по формуле (11).

### 3.3.2. Опрос массива ВБР с помощью КОЧР

Далее в качестве ТВЛ использовалась сенсорная линия, состоящая из массива ВБР, сформированных в волокне с сохранением поляризации (Fujikura SM98-PS-U25D). Массив ВБР состоял из одной ВБР с пиком отражения вблизи 1064 нм (коэффициент отражения  $\sim 27\%$ ) и набора из 28 ВБР с пиком отражения вблизи 1092 нм. Массив ВБР на с длиной волны отражения 1092 нм записывался голографическим методом с использованием фазовой маски на  $\approx 1092$  нм [99].

Коэффициент отражения ВБР варьировался случайным образом. При этом средний коэффициент отражения решеток составил  $\sim 30\%$ . Длина каждой ВБР была равна  $\approx 40$  мм, а расстояние между их центрами  $\approx 240$  мм. По аналогии с предыдущей схемой ВБР с длиной волны 1064 нм являлась реперной и была помещена в начало линии. Ее спектр отражения в отличие от всех остальных ВБР попадает в область перестройки самосканирующего лазера. По этой причине далее будем разделять ВБР на резонансную (на 1064 нм) и нерезонансные (на 1092 нм).

Стоит отметить, что если спектр отражения ВБР лежит в области частотной перестройки лазера, то частотный рефлектометр, по сути, будет аналогичен обычному устройству опроса из предыдущего раздела за исключением возможности пространственного разделения откликов от ВБР с одинаковыми длинами волн. Однако в рассмотренной схеме могут быть использованы ВБР со одинаковым спектром отражения. Более того, как будет показано ниже, спектр отражения ВБР может лежать вне области сканирования лазера.

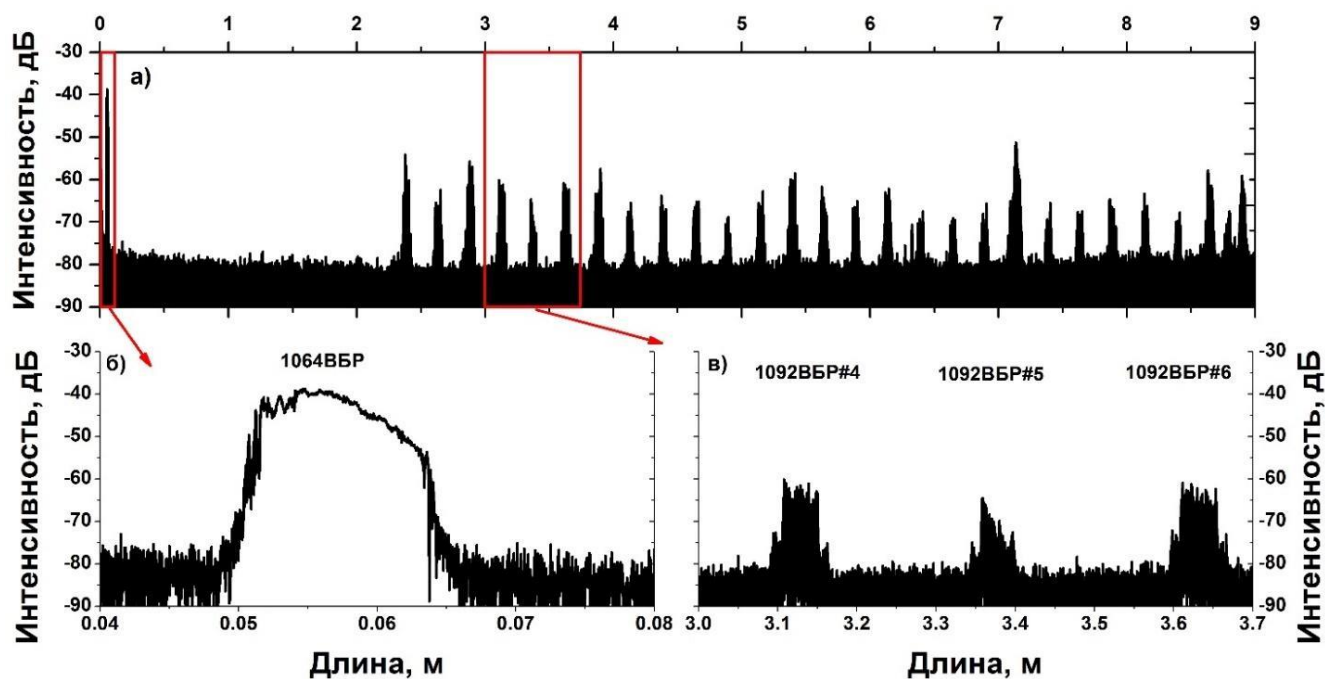


Рисунок 46 – Рефлектограммы изучаемой сенсорной линии: а) общий вид рефлектограммы, б) рефлектограмма для ВБР 1064 нм, в) рефлектограмма для трех ВБР 1093 нм из массива.

Пример рефлектограммы для изучаемой сенсорной линии представлен на рисунке 46. На рисунке 46-а видно, что рефлектограмма состоит из множества пиков. Каждый пик соответствует отдельной ВБР. Из рисунков 46-б и 46-в видно, что амплитуда сигнала отражения резонансной ВБР выше, чем у нерезонансных



ВБР. Это связано с тем, что ВБР 1064 нм попадает в диапазон перестройки самосканирующего лазера, а отражение нерезонансных ВБР сильно подавлено. Также на рефлектограмме можно увидеть, что фактическая длина ВБР 1064 м составляет  $\sim 1$  см, а у ВБР 1092 нм она  $\sim 4$  см, что для нерезонансных ВБР соответствует их реальным условиям записи.

Нормированный интерференционный сигнал соответствует отражению линейки ВБР целиком. Для получения оптического спектра отражения отдельной ВБР в линии необходимо провести обратное преобразования Фурье не для всей рефлектограммы, а только для области, в которой находится интересующая нас ВБР. Это означает, что суммирование в выражении (11) производится не по всем точкам рефлектограммы. На рисунках 47-а и 47-б приведены восстановленные спектры резонансной ВБР (1064 нм) и четвертой нерезонансной ВБР (1092 нм) для двух различных реализаций сканирования соответственно.

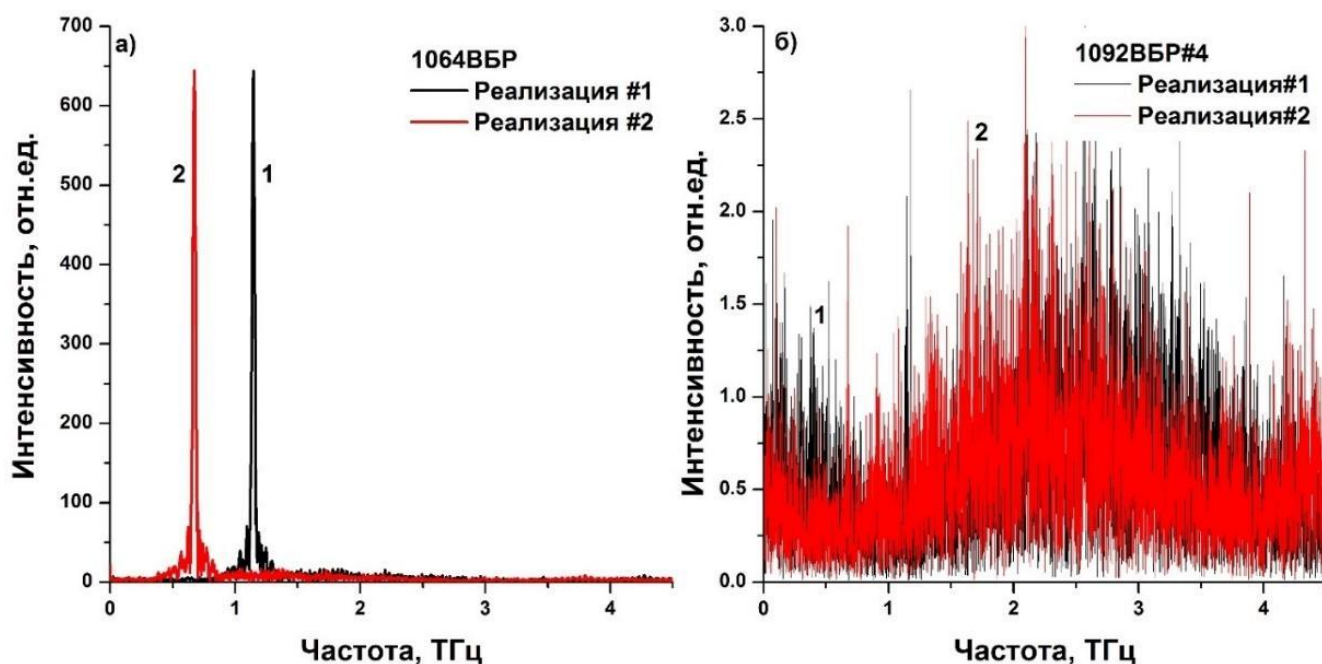


Рисунок 47 – Восстановленные спектры резонансной ВБР (1064 нм) и четвертой нерезонансной ВБР (1092 нм) для двух различных реализаций сканирования.

Пример двух реализаций на рисунке 47-а показывает, что спектры одной и той же ВБР в этом случае могут отличаться с точностью до постоянного сдвига по частоте. Этот относительный сдвиг возникает в результате того, что границы области самосканирования длины волны в лазере флуктуируют во времени (см. Рис. 8). Это смещение границ, а также соответствующее им смещение спектров можно найти, применяя корреляционный анализ к измеренным оптическим



спектрам. Корреляцией называют математическую связь между двумя случайными величинами или сигналами. Коэффициент корреляции двух сигналов  $x_1(k)$  и  $x_2(k)$  (спектров) выражается функцией свертки:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_1(k)x_2(k-n) \quad ,(13)$$

Величина коэффициента корреляции показывает степень сходства между сигналами в зависимости от относительного смещения. Зависимость коэффициента корреляции позволяет определить относительное смещение двух сигналов одинаковой формы. На рисунке 48 показаны корреляционные функции для резонансной и нерезонансной ВБР соответственно. В обоих спектрах наблюдается по одному узкому пику. Его положение в обоих случаях совпадает и соответствует величине смещения оптических спектров. Это означает, что для применения такой системы на практике требуется использовать дополнительный частотный репер, например, термостабилизированную ВБР, как в разделе 2.2 [97], или стабилизировать границы лазера сканирования как было продемонстрировано в разделе 2 [102, 103]. В нашей работе был применен частотный репер.

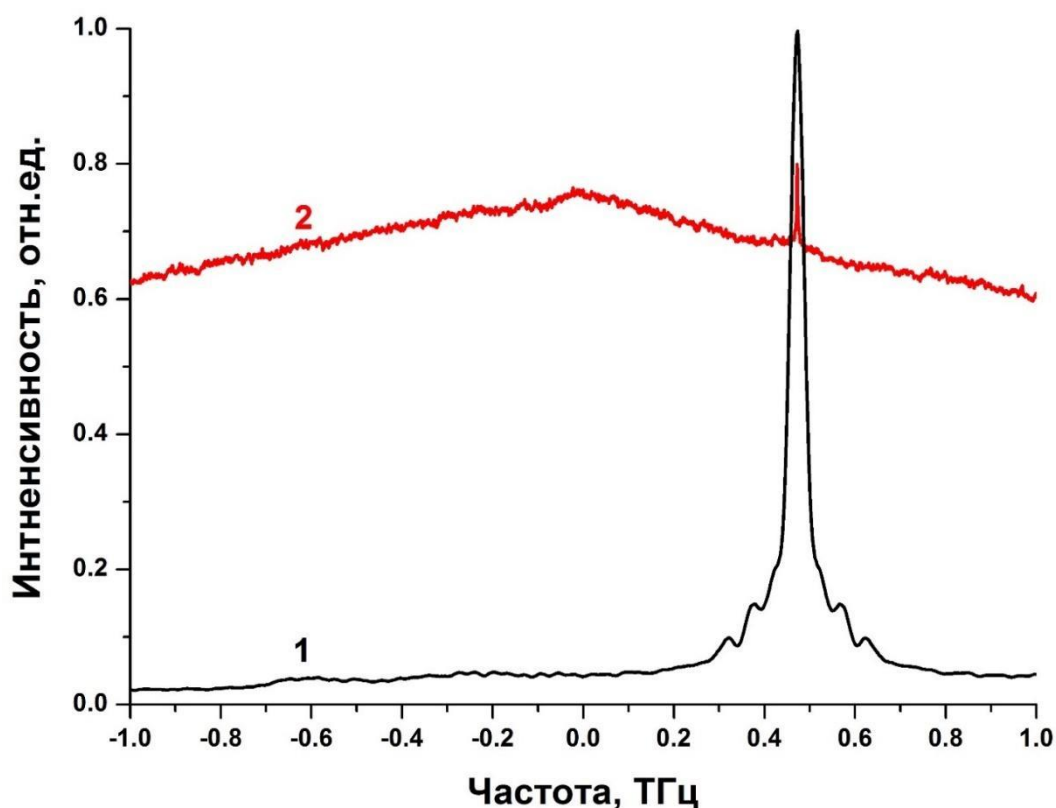


Рисунок 48 – Корреляционные функции спектров для резонансной ВБР (черный) и нерезонансной ВБР (красный).

Оптический спектр нерезонансной ВБР (Рисунок 47-б) имеет более сложную структуру по сравнению с резонансной ВБР и на первый взгляд имеет случайное наполнение. Однако корреляционный анализ показывает наличие узкого корреляционного пика, соответствующего такому же смещению, что и для резонансной ВБР. В частности, это свидетельствует о наличии некоторой фиксированной структуры в спектре отражения ВБР, которая задается модуляцией показателя преломления. Этот факт может быть использован для сенсорных задач. При этом ширина корреляционного пика для нерезонансной ВБР существенно меньше, чем для резонансной, что можно связать с большей физической длиной нерезонансных ВБР. По этой причине было решено использовать в качестве частотного репера одну из нерезонансных ВБР (1092ВБР#5).

Далее на примере сенсорной линии, состоящей из массива ВБР с близкими нерезонансными для сканирующего лазера длинами волн отражения, была показана возможность измерения температуры. Для демонстрации сенсорных задач одна из ВБР (1092ВБР#4) помещалась в термостат, позволяющий проводить нагрев от комнатной температуры до 100°C. В экспериментах анализировалась корреляционная функция спектров отражения ВБР при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии. Смещение пика корреляции может быть связано как с нагревом, так и со случайным началом частотного сканирования лазера. Для исключения последнего вклада проводился учет сдвига по корреляционному пику реперной ВБР, находящейся при комнатной температуре. Для этого корреляционный спектр для тестовой 1092 ВБР#4 смещался по оси частот как целое на величину смещения пика в корреляционном спектре реперной 1092 ВБР#5 (Рис. 48). Для каждой температуры (25, 50, 75, 100 °C) измерялись две реализации спектров. Рисунок 49 показывает смещение корреляционного узкого пика в область меньших частот при нагреве нерезонансной ВБР.

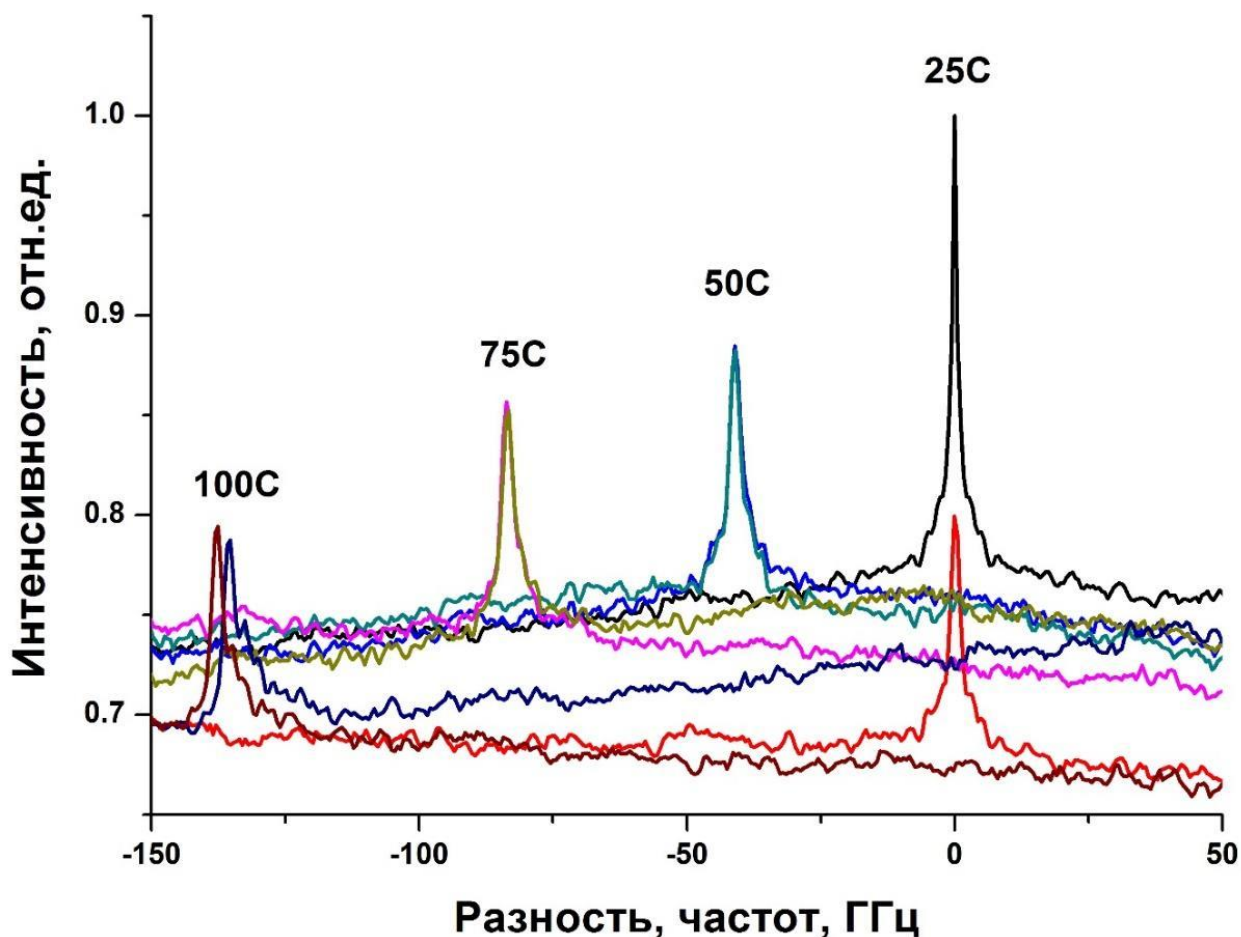


Рисунок 49 – Функции корреляции между спектрами отражения нерезонансной ВБР при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии с учетом компенсации сдвига частоты по дополнительной реперной ВБР, расположенной при комнатной температуре.

Величина смещения корреляционного пика, изображенная на рисунке 50, линейно связана с температурой с наклоном 1.83 ГГц/°C (~ 0.7 нм/100°C), что близко к чувствительности стандартной ВБР в области 1 мкм.

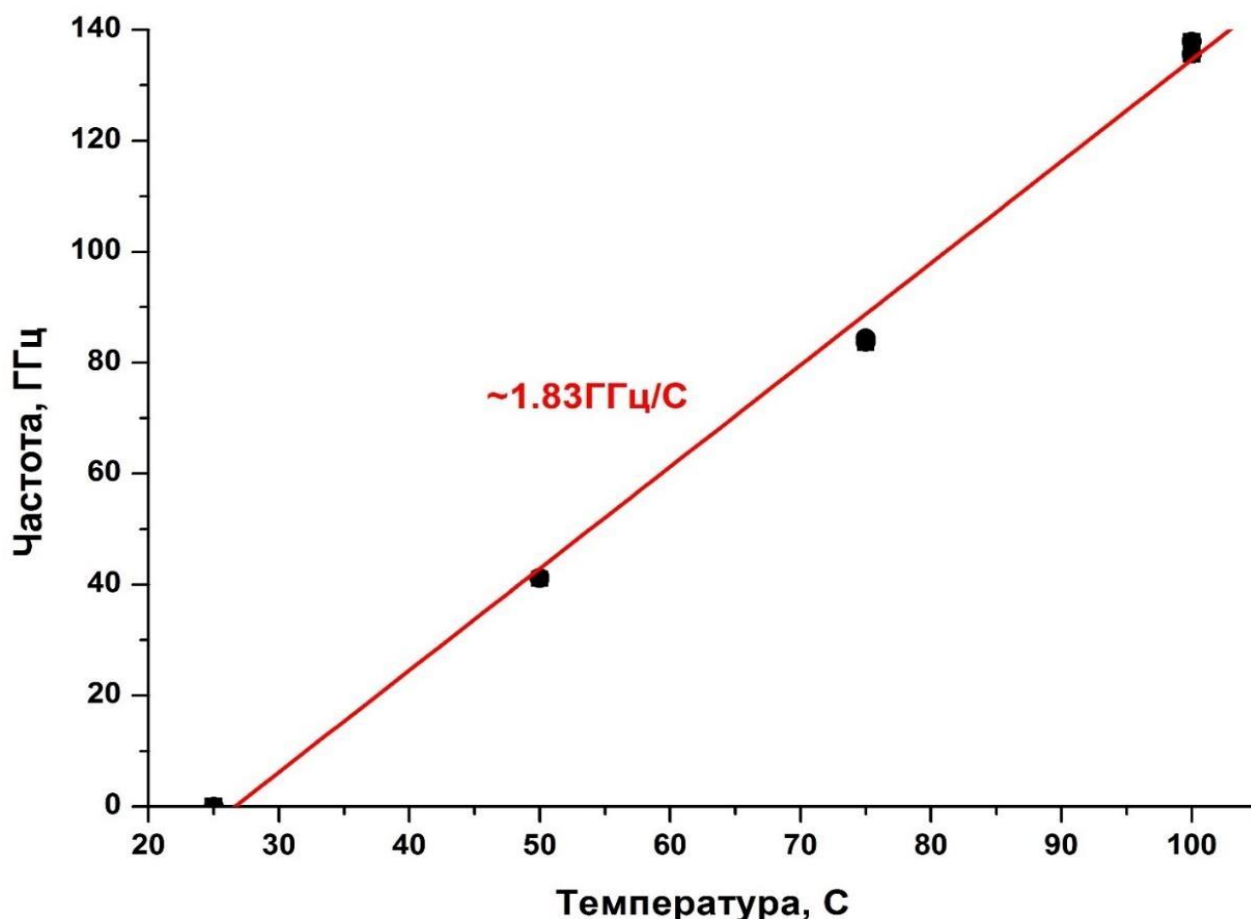


Рисунок 50 – Зависимость частоты смещения корреляционного пика для четвертой нерезонансной ВБР 1093 нм от ее температуры.

### Заключение к разделу 3.3

В данном разделе было продемонстрировано применение разработанного частотного рефлектометра на основе самосканирующего лазера для опроса ТВЛ. С помощью ТВЛ, состоящей из ослабителя и прямого скола, была определена чувствительность схемы порядка -86 дБ/мм. Вторая конфигурация ТВЛ состояла из массива ВБР. При этом в качестве чувствительного элемента могут выступать ВБР, как попадающие, так и не попадающие в область перестройки лазера. В первом случае частотный рефлектометр аналогичен обычному устройству опроса [97], который был описан в разделе 3.1.

Преимуществом устройства опроса на основе КОЧР в отличие от устройства опроса со спектральным разделением является возможность пространственного разделения откликов даже для ВБР, имеющих одинаковые длины волн отражения. Ограничением количества ВОД в этом случае является максимальная

опрашиваемая длина линии, которая определяется скачком частоты в лазере. Это значение может быть уменьшено за счет увеличения длины резонатора. В частности, в работе [80] показана возможность уменьшения скачка частоты до 1 МГц, что для КОЧР потенциально может давать длину линии 50 м. При этом пространственное разрешение системы, определяемое диапазоном перестройки лазера, может достигать субмиллиметровых значений. Это означает, что ВБР в линии могут находиться достаточно плотно друг от друга.

К преимуществам можно отнести высокую чувствительность системы (-86 дБ/мм) к измерению коэффициентов обратного отражения отражателей, что позволяет производить измерения спектров отражения нерезонансных ВБР (т.е. не попадающих в область перестройки лазера). Это в первую очередь связано с интерферометрической схемой измерения и большой длиной когерентности лазера. Можно ожидать, что дальнейшее улучшение чувствительности позволит производить измерения сигналов, отраженных рэлеевским рассеянием (порядка -105 дБ/мм на длине волны 1.55 мкм) [104, 105]. В этом случае необходимость использования ВБР полностью отпадает. В качестве сенсора может выступать обычное одномодовое волокно. Такая возможность была продемонстрирована, например, в работе [45].

К недостаткам представленной системы по сравнению с подходом спектрального разделения является необходимость получения режима одночастотного сканирования. Однако в ранних работах [75] было показано, что помимо одночастотного сканирования, может наблюдаться более сложная модовая структура. В этом случае, более правильно для восстановления спектральной динамики использовать внешний интерферометр, т.к. такой подход в меньшей степени чувствителен к модовой динамике самосканирующего лазера. Также к недостаткам системы можно отнести нестабильность границ сканирования лазера, которое необходимо учитывать с помощью введения дополнительного частотного репера или стабилизации границ сканирования. Сравнительная таблица для двух представленных методов опроса ВБР представлена ниже.

Таблица 5 – Сравнение представленных в работе методов опроса ВБР

Параметр	Устройство опроса со спектральным разделением каналов на	Когерентный оптический частотный рефлектометр
Спектральное разрешение, МГц	~5 МГц	~5 МГц
Пространственное разрешение, мм	>10 (определяется размером ВБР)	~0.2 (определяется диапазоном перестройки лазера)
Количество опрашиваемых ВБР, шт	~10 (определяется спектральным диапазоном между датчиками)	~ 500-1000 (определяется максимальной длиной линии)
Максимальная длина линии, м	~ неограниченно (определяется потерями в линии)	~ 10 (определяется скачком частоты лазера)
Чувствительность к коэффициенту отражения, дБ	~ -30	~ -79

## Заключение

В работе была продемонстрирована возможность применения волоконного лазера с самосканированием частоты в системах опроса ВОД на основе ВБР. В первую очередь было проведено исследование влияния характеристик элементов лазера (длина активного световода и потери на выходном зеркале) на спектральную область сканирования. Экспериментально были определены оптимальные параметры элементов, позволяющие получить максимальный диапазон сканирования. Также исследовано влияние температуры активного световода и температуры лазерного диода на область сканирования и предложены методы управления спектральным положением области сканирования. Было выяснено, что управление спектральными характеристиками с помощью температуры активной среды более предпочтительно по сравнению с температурой лазерного диода, так как получаемый диапазон управления больше.

Также были рассмотрены методы стабилизации границ диапазона сканирования, которые позволяют повысить предсказуемость перестройки длины волны генерации волоконных самосканирующих лазеров, что очень важно для их практических применений. Предложен метод стабилизации границ с помощью слабой селективной обратной связи, образованной парой ВБР и волоконным ослабителем. Подбор коэффициента отражения селектора позволяет уменьшить флуктуации границ сканирования длины волны с 1100 до 13 пм для нижней границы и со 110 до 7 пм для верхней границы. Однако существуют ограничения, связанные с малыми коэффициентами отражения узкополосного селектора порядка 0,01-0,1%, что делает невозможным использование стандартных ВБР и существенно увеличивает потери в выходном сигнале. Второй метод стабилизации основан на применении спектральных селекторов в виде высокоотражающих ВБР со стороны плотного зеркала лазера и позволяет уменьшить флуктуации конечной границы сканирования со 100 пм до 9 пм и стартовой границы сканирования с 1500 пм до 6 пм, что сравнимо с результатами, полученными в предыдущей схеме. Также данный подход имеет неоспоримое преимущество, поскольку не накладывает ограничения на используемые ВБР.

В продолжении работы демонстрируется применение 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.

Устройство опроса ВБР без пространственного разделения датчиков было апробировано на сенсорной линии, состоящей из 6 ВБР-датчиков. Точность определения длины волны отражения датчиков оценена как  $\sim 2$  пм, что сравнимо с имеющимися коммерческими аналогами. При этом спектральное разрешение реализованного устройства опроса на порядки превосходит аналоги. К недостаткам можно отнести ограниченное количество ВБР, обусловленное диапазоном перестройки самосканирующего лазера.

Возможность гибридного разделения ВБР была продемонстрирована в схеме КОЧР. Апробация схемы на ВБР, как попадающих, так и не попадающих в область перестройки лазера. В первом случае частотный рефлектометр аналогичен обычному устройству опроса, который был описан ранее. В случае нерезонансной ВБР также возможно измерение смещения спектра отражения, что позволяет измерять температуру. Преимуществами такой системы является высокая чувствительность к малым коэффициентам отражения ВБР и возможность пространственного разделения откликов даже для ВБР, имеющих одинаковые длины волн отражения.



## Основные результаты

В ходе работы были получены следующие 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 ( $0.2 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ ) и длины волны излучения источника накачки ( $-0.2 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ ).

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  $\sim 5.5 \text{ МГц}$ . 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 публикаций автора по теме диссертационной работы

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *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 литературы

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. *Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н., Неугодников А. П., Поспелов В. И.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. — 2005. — Т. 46, № 6. — С. 128-140.
4. *Hartog A.H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. — Boca Raton: CRC Press, 2018. — P.472.
5. *Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M.* A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings // Optics Express. — 2013. — Vol.21, Issue 19. — P. 22799-22807.
6. *Фадеев К. М., Созонов Н. С., Шевцов Д. И.* Волоконно-оптический датчик давления на основе интерферометра Фабри-Перо с температурной компенсацией на основе ВБР // Сборник трудов конференции Физика для пермского края. — 2018. — Выпуск 11. — С. 35-39.
7. *Yin S., Ruffin P. B., Yu F. T. S.* Fiber Optic Sensors, 2nd ed. — Boca Raton: CRC Press, 2019. — P. 496.
8. *Удд, Э.* Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. — Москва: Техносфера, 2008. — С. 520 с.

9. *Glisic B., Badoux M., Jaccoud J.P., Inaudi D.* Monitoring a subterranean structure with the SOFO® system // Proceedings of the 1st International Conference Long Road and Rail Tunnels. — 2000. — Basel, Switzerland. — P. 127-136.
10. *Sumitro S., Okada Y., Saitoh K., Takanashi S., Inaudi D.* Long-gage optical fiber sensors monitoring on deteriorated structure deformational properties // Proceedings of the 1st International conference on structural health monitoring and intelligent infrastructure. — 2003. — Tokyo, Japan. — P. 49-52.
11. *Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г.* Волоконные решетки показателя преломления и их применения. // Квантовая электроника. — 2005. — Т.35, №12. — С. 1085-1103.
12. *Kersey A.D., Davis M. A., Patrick H. J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebel E.J.* Fiber grating sensors // Journal of Lightwave Technology. — 1997. — V.15, №8. — P.1442-1463.
13. *Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennon I.* Point-by-point inscription of sub-micrometer period fiber Bragg gratings // OSA Technical Digest OSA/CLEO/QELS. — 2008. — Paper CTuU2.
14. *Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., Kawasaki B. S.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Applied Physics Letters. — 1978. — V. 32. — № 10. — P. 647-649.
15. *Kawasaki B. S., Hill K. O., Johnson D. C., Fujii Y.* Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers // Optics Letters. — 1978. — V. 3, № 2. — P. 66-68.
16. *Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H.* Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Optics Letters. — 1989. — Vol. 14, № 15. — P. 823-825.

17. *Варжель С. В., Куликов А. В., Асеев В. А., Брунов В. С., Калько В. Г., Артеев В. А.* Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2011. — Т. 75, № 5. — С. 27-30.
18. *M. Becker, S. Bruckner, E. Lindner, M. Rothhardt, S. Unger, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt* Fiber Bragg Grating Inscription with UV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference for Fiber Laser Applications // Proceedings of the SPIE. — 2010. — Vol. 7750. — Id. 775015.
19. *Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А.* Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств. — Москва: Научный центр волоконной оптики при институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2004. — С. 46.
20. *Stam A. M., Idrisov R. F., Gribaev A. I., Varzhel S. V., Konnov K. A., Slozhenikina Yu. I.* Fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer and KrF excimer laser system // Journal of Instrument Engineering. — 2017. — Vol. 60, № 5. — P. 466-473.
21. *Кульчин Ю.Н.* Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. — Москва.: Физматлит, 2004. — С. 272.
22. *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.
23. *Dai Y. B., Liu Y., Leng J., Deng G., Asundi A.* A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring // Optics and Lasers in Engineering. — 2009. — Vol.47, № 10. — P.1028-1033.

24. *Liu Q., Tokunaga T., Mogi K., Matsui H., Wang H. F., Kato T., He Z.* Ultrahigh Resolution Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor for Crustal Strain Monitoring // *IEEE Photonics Journal*. — 2012. — Vol. 4, № 3. — P. 996-1003.
25. *Zhou Z., Graver T. W., Hsu L., Ou J.* Techniques of Advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges // *Pacific Science Review*. — 2003. — V. 5. — P.116-121.
26. *Wang, Q., Huang, J., Liu, Q., Zhou, Z.* Dynamic strain measurement of hydraulic system pipeline using fibre Bragg grating sensors // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2016. — Vol.8, Issue 4. — P. 1-8.
27. *Вольф А. А., Достовалов А. В., Семёнов С. Л., Журавлев С. Г.З, Салганский М. Ю., Егорова О. Н.* Создание однородных и неоднородных ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде методом фемтосекундной поточечной записи // *Прикладная фотоника*. — 2019. — Т. 6, № 1-2. — С. 47-58.
28. *Egorova O.N., Belkin M.E., Klushnik D.A., Zhuravlev S.G., Astapovich M.S., Semojnov S.L.* Microwave signal delay line based on multicore optical fiber // *Physics of Wave Phenomena*. — 2017. — Vol. 25, №. 4. — P. 289–292.
29. *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.
30. *Arce-Diego J. L., Cobo A., Alvarez -Ortego V., Jáuregui C., López -Higuera J.M.* OTDR interrogation of fiber Bragg gratings for quasi-distributed sensing. — *Proceedings SPIE of the Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors*. — 2000. — V. 4185, Paper 418541.

31. *Agrawal G.* Nonlinear Fiber Optics. — Cambridge: Academic Press. — 2012.
32. *Wang Y., Gong J., Dong B., Wang D. Y., Shillig T. J., Wang A.* A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network. // Journal of Lightwave Technology. — 2012. — 30. — P. 2751-2756.
33. *Lloyd G. D., Everall L. A., Sugden K., Bennion I.* Resonant cavity time-division-multiplexed fiber Bragg grating sensor interrogator. // IEEE Photonics Technology Letters. — 2004. — 16(10). — P. 2323–2325.
34. *Cooper D. J., Coroy T., Smith P. W. E.* Time division multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays // Applied Optics. — 2001. — Vol. 40, Issue 16. — P.2643-2654.
35. *Perry M., Orr P., Niewczas P., Johnston M.* High-speed interferometric FBG interrogator with dynamic and absolute wavelength measurement capability. // Journal of Lightwave Technology. — 2013. — Vol. 31, Issue 17. — P. 2897–2903.
36. *Kersey A. D., Berkoff T., Morey W.* Fiber optic Bragg grating sensor with drift-compensated high resolution interferometric wavelength shift detection. // Optics Letters. — 1993. — Vol. 5, Issue 1. — P. 72-74.
37. *Todd M. D., Johnson G. A., Althouse B. L.* A novel Bragg grating sensor interrogation system utilizing a scanning filter, a Mach-Zehnder interferometer and a 3×3 coupler. // Measurement Science and Technology. — 2001. — Vol. 12, № 7. — P.771-777.
38. *Jeong S., Choi S., Pan J.* An implementation of FBG interrogator with a tunable Fabry-Perot filter // Advanced Photonics. — 2017. — OSA Technical Digest. — Paper JTU4A.16.

39. *Бабин С. А., Власов А. А., Каблуков С. И., Шелемба И. С.* Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток. // Вестник НГУ. Серия Физика. — 2007. — № 3. — С. 54–57.
40. *Chung, W. H., Hwa-Yaw Tam, Wai, P. K. A., Khandelwal, A.* Time- and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration. // IEEE Photonics Technology Letters. — 2005. — Vol.17, Issue 12. — P. 2709-2711.
41. *Yu Y., Lui L., Tam H., Chung W.* Fiber-laser-based wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system. // IEEE Photonics Technology Letters. — 2001. — V.13, Issue 7. — P. 702–704.
42. *Johnson G. A., Todd M. D., Althouse B. L., Chang C. C.* Fiber Bragg grating interrogation and multiplexing with a 3×3 coupler and a scanning filter. // Journal of Lightwave Technology. — 2000. — Vol.18, Issue 8. — P. 1101–1105.
43. *Melle S., Liu K., Measures R.* A passive wavelength demodulation system for guided wave Bragg grating strain sensor. // IEEE Photonics Technology Letters. — 1992. — Vol. 4, Issue 5. — P. 516-518.
44. *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.
45. *Soller B. J., Gifford D. K., Wolfe M. S., Froggatt M. E.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. // Optics Express. — 2005. — Vol. 13, Issue 2. — P. 666-674.
46. *Von der Weid J. P., Passy R., Mussi G., Gisin N.* On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry.



- // Journal of Lightwave Technology. — 1997. — Vol. 15, Issue 7. — P.1131-1141.
47. *MacDonald R. I.* Frequency domain optical reflectometer // Applied Optics. — 1981. — V. 20, Issue 10. — P. 1840-1844.
  48. *Oberson P., Huttner B., Guinnard O., Guinnard L., Ribordy G., Gisin N.* Optical frequency domain reflectometry with a narrow linewidth fiber laser // IEEE Photonics Technology Letters. — 2000. — V. 12, Issue 7. — P. 867 – 869.
  49. *Soller B. J., Gifford D. K., Wolfe M. S., Froggatt M. E.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. // Optics Express. — 2005. — Vol. 13, Issue 2. — P. 666-674.
  50. *Kreger S. T., Rahim N. A. A., Garg N., Klute S. M., Metrey D. R., Beaty N., Jeans J. W., Gamber R.* Optical frequency domain reflectometry: principles and applications in fiber optic sensing. // Proceedings of SPIE Fiber Optic Sensors and Applications XIII. — 2016. — Vol. 9852. — Paper 98520T.
  51. *Yüksel K, Wuilpart M, Moeyaert V, Megret P.* Optical frequency-domain reflectometry: a review. // Proceedings of the international conference on transparent optical networks (ICTON). — 2009. — Paper Tu.C2.5.
  52. *Froggatt M., Moore J.* High resolution strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter. // Applied Optics. — 1998. — Vol.37, Issue 10. — P. 1735–1740.
  53. *Zhao M., Tu G., Benli Yu B., Lin J.* The analysis and comparison of cross-correlation and phase demodulation methods in an OFDR system for strain/temperature sensing. // Proceedings SPIE Advanced Sensor Systems and Applications VIII. — 2018. — Vol. 10821. — Paper 1082125.

54. *Froggatt M., Erdogan T., Moore J., Shenk S.* Optical frequency domain characterization (OFDC) of dispersion in optical fiber Bragg gratings. // *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, OSA Trends in Optics and Photonics Series. — 1999. — Vol. 33. — Paper BC2.
55. *Yüksel K., Pala D.* Analytical investigation of a novel interrogation approach of fiber Bragg grating sensors using Optical Frequency Domain Reflectometry. // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2016. — Vol. 81. — P. 119-124.
56. *Kinet D., Yüksel K., Caucheteur C., Garray D., Wuilpart M., Narbonneau F.* Structural health monitoring of composite materials with fibre Bragg gratings interrogated by optical frequency domain reflectometer. // *Proceedings of the European Conference on Composite Materials*. — 2012. — Venice, Italy.
57. *Yüksel K., Mégret P., Wuilpart M.* A quasi-distributed temperature sensor interrogated by optical frequency-domain reflectometer. // *Measurement Science and Technology*. — 2011. — Vol. 22. — P.115204-115212.
58. *Wegmüller M., Oberson P., Guinnard L., Vinegoni C., Legrk M., Gisin N.* Overview of coherent reflectometry techniques: characterization of components and small systems. // *Proceedings of the Symposium on Optical Fiber Measurements (SOFM)*. — Boulder, CO. — 2000. — P. 155-160.
59. *Huttner B., Reecht J., Gisin N., Passy R., Von der Weid J. P.* Local birefringence measurements with optical frequency-domain reflectometry. // *Photonics Technology Letters*. — 1998. — Vol. 10, № 10. — P. 1458-1460.
60. *Froggatt M. E., Gifford D. K., Kreger S., Wolfe M., Soller B. J.* Characterization of Polarization-Maintaining Fiber Using High-Sensitivity Optical-Frequency-Domain Reflectometry. // *Journal of Lightwave Technology*. — 2006. — Vol. 24, № 11. — P. 4149-4154.

61. *Yun S. H., Tearney G. J., de Boer J. F., Iftimia N., Bouma B. E.* High-speed optical frequency-domain imaging // *Optics Express*. — 2003. — Vol. 11, Issue 22. — P. 2953-2963.
62. *Lee E. C. W., de Boer J. F., Mujat M., Lim H., Yun S. H.* In vivo optical frequency domain imaging of human retina and choroid // *Optics Express*. — 2006. — Vol.14, Issue 10. — P.4403-4411.
63. *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.
64. *Park N., Dawson J. W., Vahala K., Miller C.* All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry–Perot filter. // *Applied Physics Letters*. — 1991. — T. 59, № 19. — P. 2369-2371.
65. *Ryu H. Y., Lee W. -K., Moon H. S., Suh H. S.* Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy. // *Optics Communications*. — 2007. — T. 275, № 2. — P. 379-384.
66. *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.
67. *Song Y. W., Havstad S. A., Starodubov D., Xie Y., Willner A. E., Feinberg J.* 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG. // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2001. — V. 13, № 11. — P. 1167-1169.
68. *Yeh C. -H., Chen H. -Z., Chen J. -Y., Chow C. -W.* Use of fiber Bragg grating (FBG) for stable and tunable erbium-doped fiber ring laser with single-

- longitudinal-mode (SLM) output. // *Laser Physics*. — 2015. — V. 25, № 11. — P. 115101-115104.
69. *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.
70. *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.
71. *Childers B. A., Brown T. L., Moore J. P., Wood K. H.* Recent developments in the application of optical frequency domain reflectometry to distributed Bragg grating sensing. // *Proceedings of the SPIE*. — 2002. — V. 4578. — P. 19-31.
72. *Jung E. J., Kim C. -S., Jeong M. Y., Kim M. K., Jeon M. Y., Jung W., Chen Z.* Characterization of FBG sensor interrogation based on a FDML wavelength swept laser. // *Optics Express*. — 2008. — V. 16, Issue 21. — P. 16552- 16560.
73. *Hughes T. P., Young K. M.* Mode sequences in ruby laser emission. // *Nature*. — 1962. — № 196. — P. 332-334.
74. *Kir'yanov A. V., Il'ichev N. N.* Self-induced laser line sweeping in an ytterbium fiber laser with non-resonant Fabry-Perot cavity. // *Laser Physics Letters*. — 2011. — V. 8, Issue 4. — P. 305-312.
75. *Lobach I. A., Babin S. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V.* Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser. // *Optics Express*. — 2011. — V. 19, Issue 18. — P. 17632-17640.

76. *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.
77. *Honzátko P., Vojtíšek P., Navrátil P., Peterka P.* Self-induced laser line sweeping in tunable erbium-doped fiber laser. // *Proceedings 5th EPS-QEOD Europhoton conference, Stockholm, Sweden*. — 2012. — Paper WeP.28.
78. *Lobach I. A., Kablukov S. I.* Application of a self-sweeping Yb-doped fiber laser for high-resolution characterization of phase-shifted FBGs. // *Journal of Lightwave Technology*. — 2013. — V. 31, Issue 18. — P. 2982-2987.
79. *Evtuhov V., Siegman A. E.* A “Twisted-mode” technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity. // *Applied Optics*. — 1965. — Vol. 4, Issue 1. — P. 142-143.
80. *Lobach I. A., Kablukov S. I., Melkumov M. A., Khopin V. F., Babin S. A., Dianov E. M.* Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping. // *Optics Express*. — 2015. — V. 23, Issue 19. — P. 24833-24842.
81. *Kashirina E. K., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Dual-longitudinal-mode CW self-sweeping operation in Er-doped fiber laser. // *Optics Letters*. — 2020. — V. 45, Issue 24. — P. 6659-6662.
82. *Navratil P., Peterka P., Vojtisek P., Kasik I., Aubrecht J., Honzatko P., Kubecek V.* Self-swept erbium fiber laser around 1.56  $\mu\text{m}$ . // *Opto-Electronics Review*. — 2018. — V. 26, Issue 1. — P. 29-34.
83. *Wang X., Zhou P., Wang X., Xiao H., Si L.* Tm-Ho co-doped all-fiber broadband self-sweeping laser around 1.9  $\mu\text{m}$ . // *Optics Express*. — 2013. — V. 21, Issue 14. — P. 16290-16295.

84. *Aubrecht J., Peterka P., Honzatko P., Koška P., Podrazky O., Todorov F., Kasik I.* Self-swept holmium-doped fiber laser near 2100 nm. // OSA Technical Digest, Lasers Congress (ASSL, LSC, LAC) 2016). — Paper JTU2A.7.
85. *Budarnykh A. E., Vladimirskaia A. D., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Broad-range self-sweeping single-frequency linearly polarized Tm-doped fiber laser // Optics Letters. — 2018. — V. 43, Issue 21. — P. 5307-5310.
86. *Paschotta R., Nilsson J., Tropper A.C., Hanna D.C.* Ytterbium-doped fiber amplifiers. // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1997. — V. 33, Issue 7. — P.1049-1056.
87. *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.
88. *Sinha S., Urbanek K. E., Krzywicki A., Byer R. L.* Investigation of the suitability of silicate bonding for facet termination in active fiber devices. // Optics Express. — 2007. — V. 15, Issue 20. — P. 13003-13022.
89. *Navrátil P., Peterka P., Kubeček V.* Effect of pump wavelength on self-induced laser line sweeping in Yb-doped fiber laser // Proceedings SPIE Microstructured and Specialty Optical Fibres II. — 2013. — V. 8775. — Paper 87750D.
90. *Barnard C., Myslinski P., Chrostowski J., Kavehrad M.* Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers. // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1994. — V. 30, Issue 8. — P. 1817–1830.
91. *Mel'kumov M. A., Bufetov I. A., Kravtsov K. S., Shubin A. V., Dianov E. M.* Lasing parameters of ytterbium-doped fibres doped with P2O5 and Al2O3. // Quantum Electronics. — 2004. — V. 34, №9. — P. 843–848.

92. *Grukh D. A., Kurkov A. S., Paramonov V. M., Dianov E. M.* Effect of heating on the optical properties of Yb<sup>3+</sup>-doped fibres and fibre lasers. // *Quantum Electronics*. — 2004. — V. 34, № 6. — P. 579–582.
93. *Kurkov A. S.* Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers // *Laser Physics Letters*. — 2007. — V. 4, № 2. — P. 93-102.
94. *Peterka P., Honzátko P., Koška P., Todorov F., Navratil J., Podrazký O., Kašík I.* // Reflectivity of transient Bragg reflection gratings in fiber laser with laser-wavelength self-sweeping: erratum. // *Optics Express*. — 2016. — V. 24, Issue 14. — P.16222-16223.
95. *Shu X., Yu L., Zhao D., Zhang L., Sugden K., Bennion I.* Transmission characteristics of Sagnac interferometers based on fiber Bragg gratings. // *Optical Society of America Journal B*. —2002. — V. 19, Issue 11. — P. 2770-2780.
96. *Lobach I.A., Drobyshev R. V., Fotiadi A. A., Podivilov E. V., Kablukov S. I., Babin S. A.* Open-cavity fiber laser with distributed feedback based on externally or self-induced dynamic gratings. // *Optics Letters*. — 2017. — V. 42, Issue 20. — P. 4207-4210.
97. *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.
98. *Lobach I. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V., Fotiadi A. A., Babin S. A.* Fourier synthesis with single-mode pulses from a multimode laser. // *Optics Letters*. — 2015. — V. 40, Issue 15. — P. 3671-3674.
99. *Skvortsov M. I., Abdullina S. R., Vlasov A. A., Zlobina E. A., Lobach I. A., Terentyev V. S., Babin S. A.* FBG array-based random distributed feedback

- Raman fibre laser. // *Quantum Electronics*. — 2017. — V. 47, № 8. — P. 696-700.
100. *Elliott D. F.* Handbook of Digital Signal Processing: Engineering Applications. — UK: Academic Press, Inc. (Published by Elsevier Inc.), 1986. — P. 1022.
101. *Smith S. W.* Digital signal processing: A practical guide for engineers and scientists. — Netherlands: Elsevier Science, 2003. — P. 650.
102. *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.
103. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Подвилов 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.
104. *Brinkmeyer E.* Analysis of the backscattering method for single-mode optical fibers. // *Journal of the Optical Society of America*. — 1980. — V. 70, Issue 8. — P. 1010-1012.
105. *Nakazawa M.* Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers. // *Journal of the Optical Society of America*. — 1983. — V. 73, Issue 9. — P. 1175-1180.