

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**  
(государственный университет)

**НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**  
**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

**СОЛОДЯНКИН МАКСИМ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ В**  
**ВЫСОКОНЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ С**  
**НЕПРЕРЫВНОЙ НАКАЧКОЙ ОТ ВОЛОКОННЫХ**  
**ИСТОЧНИКОВ**

Специальность 01.04.21 -лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре волоконной оптики МФТИ в Научном Центре Волоконной Оптики Российской Академии Наук

Научный руководитель: ДИАНОВ Евгений Михайлович  
доктор физико-математических наук,  
академик

Официальные оппоненты: Курков Андрей Семенович  
доктор физико-математических наук

Кулевский Лев Александрович  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ведущая организация: Физический Институт им. Н.П.Лебедева  
Российской академии наук

Защита состоится 6 декабря 2006 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д212.156.01 в Московском физико-техническом институте, комната 204 НК по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НЦВО РАН и МФТИ.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Батурин А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Окно прозрачности кварцевых световодов значительно шире используемой в настоящий момент спектральной полосы для передачи сигнала и простирается от 1 мкм до 1.8 мкм (по уровню потерь  $<1$  дБ/км). В то же время современные волоконно-оптические линии связи используют для передачи сигнала, как правило, только диапазон 1.53-1.56 мкм. В области 1.5 мкм потери в кварцевых волокнах минимальны и, в то же время, именно в этой области работают эрбиевые усилители. Несмотря на то, что в настоящее время линии связи с использованием полосы в 30 нм остаются незагруженными, потребность в обмене информации постоянно увеличивается. Растет и объём данных, передаваемых по системам связи. По прогнозу аналитиков через несколько лет даже при максимально возможных темпах строительства и ввода новых линий может возникнуть острый дефицит пропускной способности линий оптической связи, если качественно процесс передачи останется на том же уровне. Один из способов избежать «информационного» голода — это попытаться эффективнее использовать уже проложенные линии оптической связи, и в частности использовать более широкую спектральную полосу для передачи сигнала. Для расширения спектральной полосы передачи сигнала необходимо разработать широкополосные оптические усилители.

Волоконные параметрические усилители являются альтернативой широко используемым в телекоммуникациях эрбиевым волоконным усилителям, ширина полосы которых ограничена спектром усиления ионов эрбия и жестко привязана к длине волны. Если добиться широкополосного фазового синхронизма в волоконном световоде — среде параметрического усиления, то принципиально можно получить усилитель со спектральной полосой усиления, превосходящей типичный спектр усиления эрбиевого усилителя. Кроме того, величина усиления подобных устройств может быть сравнима с усилением волоконных эрбиевых усилителей.

Таким образом, актуальным представляется исследование оптического параметрического усиления в волоконных световодах для создания новых непрерывных волоконных источников и, главное, широкополосных параметрических усилителей с более широкой спектральной полосой усиления, которые можно использовать в качестве альтернативы эрбиевым волоконным усилителям для возможного увеличения эффективности использования существующих и строящихся оптоволоконных линий связи.

### **Цель работы**

Целью настоящей работы является детальное исследование оптического параметрического усиления в одномодовых волоконных световодах и поиск путей увеличения ширины полосы усиления, разработка широкополосных оптических параметрических усилителей и непрерывных параметрических волоконных генераторов с использованием волоконных лазеров в качестве накачки.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие **задачи**:

- Исследование влияния вариаций хроматической дисперсии в реальных световодах на спектр оптического параметрического усиления в одномодовых волоконных световодах.
- Создание установки, позволяющей измерять параметрическое усиление оптического сигнала в волоконных световодах, с использованием волоконного лазера в качестве накачки.
- Экспериментальное исследование параметрического усиления оптического сигнала в разработанных высоконелинейных световодах с непрерывной накачкой волоконным источником.
- Создание непрерывных параметрических волоконных лазеров на основе высоконелинейных световодов и Брэгговских отражающих решеток с отстройкой генерируемого сигнала от накачки на несколько терагерц.

## **Научная новизна и защищаемые положения**

1) Предложена модель процесса параметрического усиления в реальных одномодовых световодах с одиночной накачкой вблизи длины волны нулевой хроматической дисперсии. Модель позволяет рассчитывать спектр параметрического усиления с учетом вариаций диаметра световода, неизбежно возникающих при его изготовлении. Выбран профиль показателя преломления световода, в котором можно получить наиболее широкую полосу усиления при существующих ограничениях технологии изготовления волоконных световодов.

2) Создана установка, позволяющая измерять параметрическое усиление оптического сигнала в высоконелинейных германосиликатных световодах при непрерывной накачке вблизи длины волны нулевой дисперсии. Впервые для этой цели в качестве накачки использован непрерывный перестраиваемый эрбиевый волоконный лазер.

3) С использованием результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработан волоконный световод, при помощи которого достигнуто параметрическое усиление с шириной спектра 60 нм по уровню 10 дБ, вдвое превышающей полосу усиления типичного эрбиевого волоконного усилителя.

4) Реализованы схемы непрерывных параметрических волоконных лазеров с одиночным и двойным резонатором, в которых достигнута величина отстройки накачки от сигнала 5.3 ТГц.

## **Практическая ценность**

Разработанная модель процесса параметрического усиления в волоконных световодах с учетом вариаций дисперсии, вызванных флуктуациями диаметра по длине волокна, открывает возможность на стадии проектирования оптимизировать параметры световода, в котором можно получить наиболее широкую полосу усиления при существующих ограничениях технологии изготовления волоконных световодов.

Показано успешное использование волоконного лазера в качестве накачки непрерывных оптических параметрических волоконных усилителей и генераторов.

Реализованное оптическое параметрическое усиление с полосой усиления, вдвое превосходящей полосу усиления типичных эрбиевых усилителей, позволяет увеличить спектральную область передачи данных и, таким образом, повысить эффективность использования существующих и строящихся телекоммуникационных волоконных линий связи.

Показана возможность создания новых типов волоконных источников, основанных на параметрической генерации в высоконелинейных волоконных световодах с непрерывной накачкой.

### **Апробация работы**

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались на Европейской конференции по оптической связи (European Conference on Optical Communications 2005), межрегиональной научной школе для студентов и аспирантов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2004), а также на научных семинарах НЦВО РАН.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены в 5-и опубликованных работах, список которых приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 1 таблицу. Список литературы содержит 76 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность данной работы, сформулированы основные цели исследования. Кратко изложено основное содержание материала по главам.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором показано современное состояние проблемы получения широкополосного параметрического усиления в волоконных одномодовых световодах с накачкой вблизи длины волны нулевой дисперсии. В частности, в первой главе указано, что:

- Несмотря на большое количество работ, посвященных параметрическому усилению в одномодовых волоконных световодах, не был проведен анализ влияния вариаций диаметра световода на ширину полосы параметрического усиления. Также не выполнялась оптимизация профиля показателя преломления световода для достижения широкого параметрического усиления с учетом паразитных вариаций дисперсии.
- Ранее в публикациях никак не освещалась проблема использования волоконных лазеров в качестве источников накачки параметрических усилителей.
- Существующие работы по созданию непрерывных волоконных параметрических генераторов не показывают возможность получения новых источников излучения с большой (несколько терагерц) отстройкой генерируемого сигнала от накачки.

Рассмотрено влияние фазового синхронизма и нелинейности световода на ширину полосы и величину параметрического усиления. Указываются причины, ограничивающие полосу параметрического усиления. Величина коэффициента параметрического усиления зависит от величины нелинейной восприимчивости третьего порядка самой среды, от плотности мощности излучения и от фазовой расстройки волновых векторов. Ширина спектральной полосы параметрического усиления в одномодовом световоде зависит, в

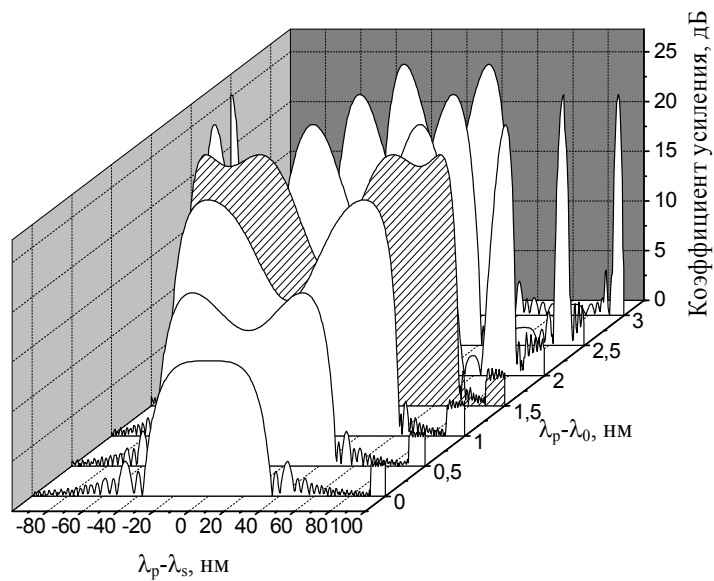
первую очередь, от ширины фазового синхронизма на всей длине волокна усилителя. В свою очередь, ширина синхронизма зависит от дисперсии световода (при этом необходимо учитывать вклад нелинейного преломления) и от выбора спектральной области накачки. Максимально широкая спектральная полоса параметрического усиления в одномодовом световоде может быть достигнута при накачке излучением с длиной волны вблизи длины волны нулевой дисперсии.

Дано обоснование выбора типа световодов для получения широкополосного усиления по результатам анализа литературы. В качестве среды оптического параметрического усиления выбраны одномодовые световоды с высоким содержанием окиси германия в качестве легирующей примеси сердцевины со сдвинутой хроматической дисперсией, нулевое значение которой находится в спектральной области 1.55 мкм.

Вторая глава диссертации посвящена моделированию процесса параметрического усиления в реальных одномодовых световодах, в которых существуют технологически неизбежные вариации диаметра по длине, значительно сужающие полосу усиления.

Описывается модель оптического параметрического усиления в одномодовом волокне с одиночной накачкой вблизи нулевой дисперсии световода, которая позволяет численно анализировать зависимость спектра усиления от дисперсионных параметров световода. Моделирование оптического параметрического усиления в волокне показало, что ширина полосы параметрического усиления очень чувствительна к отстройке длины волны накачки  $\lambda_p$  от длины волны нулевой дисперсии  $\lambda_0$ . На рис. 1 представлены смоделированные спектры усиления в волокне (100 метров, градиентный профиль, коэффициент нелинейности  $\gamma=11$  (Вт\*км)<sup>-1</sup>) с накачкой 2 Вт при разных отстройках  $\lambda_p$  от  $\lambda_0$  с шагом отстройки 0.5 нм.





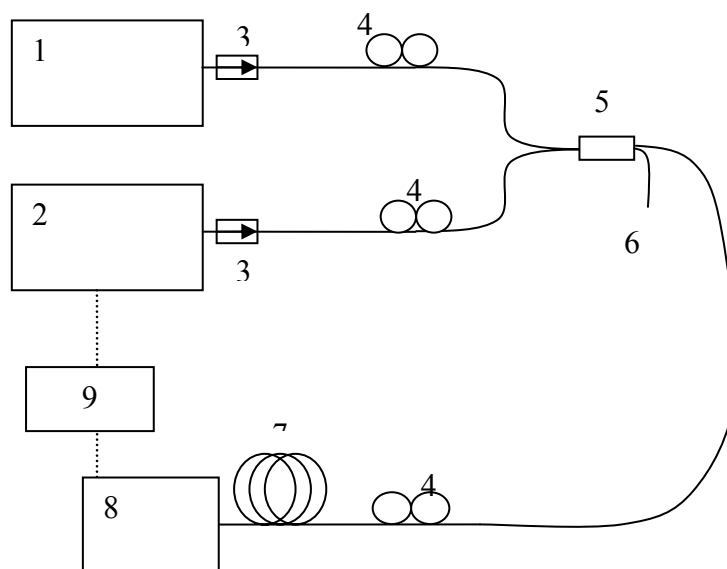
**Рис. 1.** Смоделированные спектры усиления в 100 м. световода с  $\gamma=11 \text{ (Вт*км)}^{-1}$  и мощностью накачки 2 Вт при разных отстройках  $\lambda_p-\lambda_0$  с шагом 0.5 нм. Самый широкий спектр заштрихован.

Кроме того, исходя из результатов моделирования, определены требования к параметрам источника накачки параметрического усиления. Так как спектр усиления сильно зависит от отстройки накачки от длины волны нулевой дисперсии волокна, источник должен быть перестраиваемым и узкополосным.

Впервые предложено использовать в моделировании параметрического усиления данные о вариациях внешнего диаметра световода, записанные при изготовлении световода. Вариации дисперсии вследствие колебаний внешнего диаметра волокна значительно сужают ширину синхронизма параметрического усиления. Моделирование показало, что в высоконелинейном световоде, в 100-метровом отрезке которого в идеальном случае ширина синхронизма превышает 120 нм, при вариациях внешнего диаметра 0.2 мкм ширина синхронизма сужается более чем в 2.5 раза. Следовательно, необходимо учитывать вариации диаметра волокна при моделировании усиления.

При помощи численного моделирования были проведены оценки потенциального спектра усиления при типичных вариациях диаметра световода в зависимости от формы профиля показателя преломления волокна. Выбран градиентный профиль высоколегированной заготовки с  $\Delta n \approx 0.035$ , световод из которой должен иметь значение нулевой дисперсии близкое к 1.55 мкм, длину волны отсечки короче 1.45 мкм и в котором потенциально можно получить наиболее широкую полосу усиления.

Третья глава посвящена описанию схемы установки (рис. 2), позволяющей измерять параметрическое усиление оптического сигнала в одномодовых световодах при непрерывной накачке в области длин волн 1.5-1.6 мкм оптического сигнала.



*Рис. 2. Схема установки по измерению параметрического усиления: 1) лазер накачки - Er волоконный перестраиваемый лазер непрерывного излучения 1544-1570 нм, выходная мощность до 2.5 Вт, 2) источник сигнала - перестраиваемый полупроводниковый лазер 1480-1580 нм, мощность до 5 мВт, 3) оптический изолятор, 4) контроллер поляризации, 5) волоконный ответвитель 99/1, 6) дополнительный контрольный выход для контроля входных параметров накачки и сигнала, 7) тестируемый световод, 8) оптический спектроанализатор, измеритель оптической мощности, 9) ЭВМ.*

Обсуждается выбор параметров источника накачки. Описывается используемый в качестве оптической накачки непрерывный перестраиваемый эрбиевый волоконный лазер. Источник накачки состоит из задающего узкополосного перестраиваемого эрбиевого волоконного лазера непрерывного излучения и двухкаскадного волоконного эрбиевого усилителя. Выходная мощность такой лазерной системы может достигать 2.5 Вт; имеется возможность плавной перестройки длины волны генерации в диапазоне 1545-1570 нм; ширина линии выходного излучения не превышает 0.012 нм; отношение уровня выходного сигнала к уровню спектральных шумов усиленной спонтанной люминесценции составляет около 60 дБ.

В данной установке имеется возможность находить оптимальное значение длины волны накачки конкретного образца исследуемого световода, при котором достигается максимально широкая спектральная полоса параметрического усиления посредством перестройки длины волны накачки и, как следствие, изменения отстройки длины волны накачки от длины волны нулевой дисперсии.

В четвертой главе представлены параметры световодов, используемых в качестве среды параметрического усиления, и результаты измерений ширины полосы параметрического усиления оптического сигнала в исследуемых волокнах.

По анализу результатов измерений хроматической дисперсии серии высоконелинейных германосиликатных световодов, изготовленных из одной заготовки, продемонстрирована высокая чувствительность дисперсии высоконелинейных волокон к изменению внешнего диаметра световода. Изменение формы профиля показателя преломления волокна в процессе вытяжки, которое зависит от температуры и скорости вытяжки волокна, также приводит к изменению дисперсии. Таким образом, для повторяемости изготовления световодов с одинаковыми дисперсионными характеристиками требуется не только идентичность профиля заготовки и размера внешнего диаметра световода, но и использование аналогичных параметров при вытяжке световода.

Самый широкий спектр параметрического усиления удалось получить в световоде с градиентным профилем, изготовленном из заготовки при

температуре 1940<sup>0</sup>С и скорости вытяжки 60 м/мин. Эффективная площадь моды этого волокна 10.5 мкм<sup>2</sup>, коэффициент нелинейности  $\gamma$  12 (Вт км)<sup>-1</sup> и наклон кривой дисперсии в нулевом ее значении (в  $\lambda_0$ ) +0.0197 пс/(нм<sup>2</sup> км).

При накачке отрезка 820 м этого световода непрерывным излучением 540 мВт на длине волны 1553.9 нм удалось получить профиль спектра параметрического усиления с шириной 50 нм по уровню 10 дБ (рис. 3а).

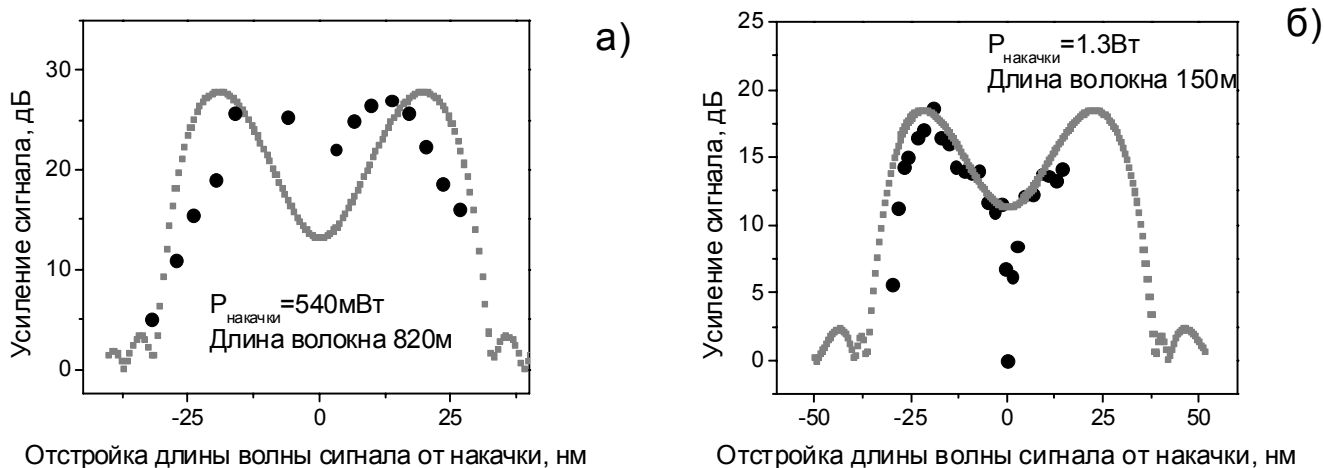


Рис. 3. Спектр параметрического усиления сигнала в отрезке световода длиной 820 м с накачкой 540 мВт (рис. а) и в отрезке длиной 150 м с накачкой 1.3 Вт (рис. б). Черные круглые точки – измеренное усиление сигнала, серые квадратные точки – моделированный спектр усиления.

После укорачивания длины световода до 150 м и соответствующего поднятия мощности оптической накачки до 1.3 Вт с целью обеспечения величины усиления не менее 10 дБ ширина спектра достигла более 60 нм. Соответствующий профиль усиления представлен на рисунке 3б.

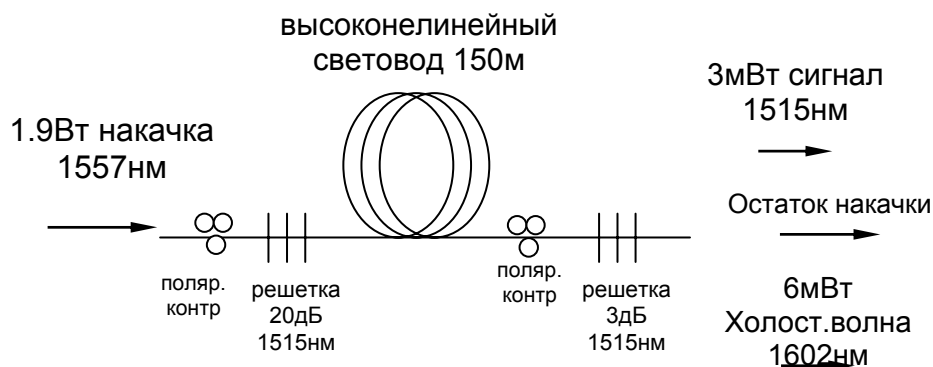
Достигнутая полоса параметрического усиления оптического сигнала вдвое превосходит типичную полосу усиления эрбиевого усилителя.

Показано успешное использование в качестве накачки для оптического параметрического усиления перестраиваемого эрбиевого волоконного лазера непрерывного излучения.

Пятая глава посвящена параметрической генерации. Представлены оригинальные одно- и двухрезонаторный параметрические лазеры непрерывной генерации со следующими особенностями:

- в качестве среды усиления используется высоконелинейное германосиликатное волокно со сдвинутой хроматической дисперсией, в котором достижимо эффективное четырехволновое смешение при накачке вблизи длины волны нулевой дисперсии;
- линейный резонатор формируется Брэгговскими отражательными решетками;
- источником накачки является эрбиевый волоконный лазер непрерывного излучения.

На рис. 4 приведена схема однорезонаторного параметрического лазера, в котором используется высоконелинейный германосиликатный световод длиной 150 м с записанными непосредственно на его концах Брэгговскими отражательными решетками без предварительного наводораживания. Резонатор на длине волны 1515 нм сформирован глухой ( $>20$  дБ) и полупрозрачной (коэффициент отражения 3 дБ) решетками. Излучение накачки используется в однопроходном режиме. Оно вводится в резонатор со стороны глухой решетки. Выходное излучение параметрического лазера представляет собой совокупность сигнального излучения с длиной волны 1515 нм, холостой волны с длиной волны 1602 нм и остаточного излучения накачки. Спектр выходного излучения представлен на рис. 6а. При оптической мощности накачки внутри высоконелинейного волокна 1.9 Вт на выходе было получено 3 мВт на длине волны 1515 нм и 6 мВт на 1602 нм.



*Рис. 4. Схема волоконного однорезонаторного параметрического лазера.*

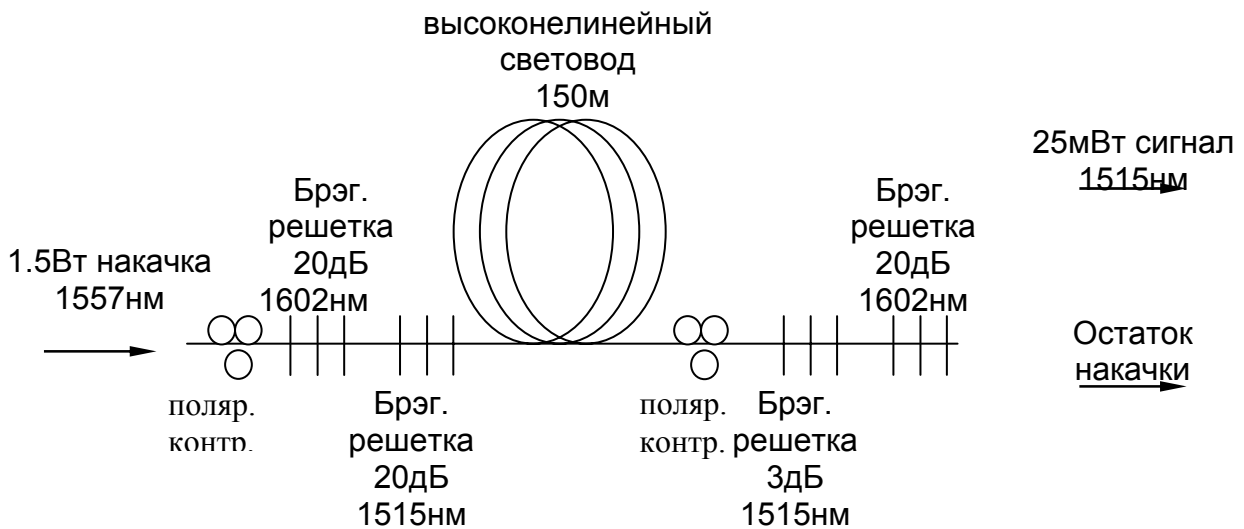


Рис. 5. Схема волоконного двухрезонаторного параметрического лазера.

С целью поднятия эффективности генерации выходного сигнала на 1515 нм была реализована схема, изображенная на рис. 5. К схеме однорезонаторного двухволнового параметрического лазера был добавлен второй глухой резонатор, который запирает холостую волну на 1602 нм в резонаторе. Спектр выходного излучения двухрезонаторного параметрического лазера приведен на рис. 6б.

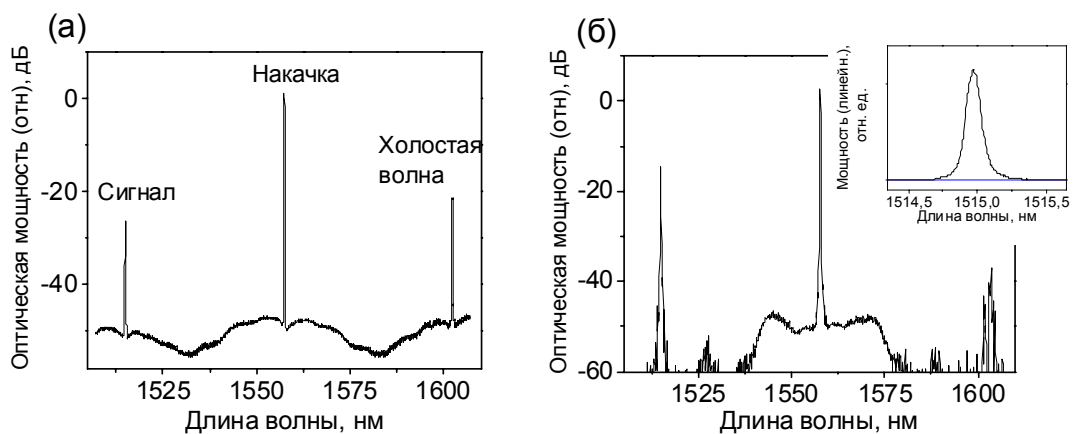


Рис. 6. Оптический спектр интегрального выходного излучения однорезонаторного параметрического лазера (а) и двухрезонаторного параметрического лазера (б). Вставка в правом верхнем углу рис. (б) – форма спектра линии генерации в линейном масштабе.

Ширина спектральной линии сигнала совпадает с шириной линии глухой Брэгговской решетки и составляет около 0.1 нм. В двухрезонаторной схеме параметрического лазера удалось получить на выходе 25 мВт на длине волны 1515 нм при накачке непрерывным излучением с мощностью 1.5 Вт на длине волны 1557 нм, наклон кривой эффективности генерации составляет 8%.

Таким образом, показана возможность создания нового типа волоконных лазеров непрерывного излучения с длиной волны генерации как короче, так и длиннее волны излучения накачки в любой спектральной области, в которой можно обеспечить фазовый синхронизм оптического параметрического усиления посредством проектирования структуры световода с требуемой дисперсией.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1) Предложена модель процесса оптического параметрического усиления, с помощью которой рассчитывается спектр профиля усиления в реальных одномодовых световодах с одиночной накачкой вблизи длины волны нулевой дисперсии. Модель позволяет учесть вариации внешнего диаметра по длине световода, неизбежно возникающие при его изготовлении. Показано, что указанные вариации необходимо учитывать, так как они приводят к существенному сужению спектра параметрического усиления. Выбран профиль показателя преломления световода, в котором можно получить наиболее широкую полосу усиления при существующих ограничениях технологии изготовления волокна.

2) Создана установка, позволяющая измерять параметрическое усиление оптического сигнала в высоконелинейных германосиликатных световодах при непрерывной накачке вблизи длины волны нулевой дисперсии. Впервые в такой установке в качестве источника накачки использован непрерывный перестраиваемый эрбиевый волоконный лазер. Особенностью этого лазера в указанном приложении являются следующие параметры: широкий диапазон перестройки (1545-1570 нм), относительно узкая

спектральная линия (0.012 нм), большое отношение величины сигнала к уровню спонтанного шума (60 дБ) и большая мощность (до 2.5 Вт).

3) С использованием результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработан одномодовый волоконный световод, с помощью которого достигнуто рекордное значение ширины спектра параметрического усиления. Ширина спектра усиления по уровню 10 дБ при мощности оптической накачки 1.3 Вт составила 60 нм при длине световода 150 м.

4) Реализованы схемы непрерывных параметрических волоконных лазеров с одиночным и двойным резонатором, сформированным Брэгговскими волоконными решетками. В однорезонаторной схеме параметрического лазера при мощности накачки 1.9 Вт получено 3 мВт сигнальной волны и 6 мВт холостой волны с отстройкой между ними 10.6 ТГц; в двухрезонаторной схеме при накачке 1.5 Вт получено 25 мВт сигнальной волны на 1515 нм с отстройкой от накачки на 5.3 ТГц в коротковолновую область спектра. Таким образом, показана возможность создания новых типов непрерывных волоконных источников, основанных на параметрической генерации в высоконелинейных волоконных световодах с большой отстройкой длины волны сигнала от накачки.



## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. О. Е. Наний, Н. А. Поликтова, М. А. Солодянкин, «Ширина полосы усиления волоконно-оптического параметрического усилителя», Электросвязь, № 12, стр. 43-45, 2005.
2. Н. А. Казанцева, О. Е. Наний, М. А. Солодянкин, «Усовершенствование модели волоконно-оптического параметрического усилителя», стр. 138, Сборник трудов межрегиональной научной школы для студентов и аспирантов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение», Саранск, издательство мордовского университета, 2004.
3. О.Е. Наний, Н.А.Казанцева, М.А. Солодянкин, «Оптимизация модели параметрического усилителя», Вестник Московского Университета, Серия Физика. Астрономия, № 6, стр. 34-36, 2006.
4. M. A. Solodyankin, A. N. Guryanov, N. A. Kazantseva, V. F. Khopin, M. M. Bubnov, M. E. Likhachev, E. M. Dianov, "Continuous-wave broadband fiber optical parametric amplifier based on 150 m of HNLf pumped with fiber laser", Laser Physics Letters, vol. 2, № 4, pp. 190-193, 2005.
5. M. A. Solodyankin, O. I. Medvedkov, E. M. Dianov, "Double and Single Cavity CW All-fiber Optical Parametric Oscillators at 1515 nm with Pump at 1557 nm.", ECOC '05, Glasgow, UK, Mo 3.4.6, Conference Proc. vol. 1, pp. 47-48, 2005.