

На правах рукописи

Злобина Екатерина Алексеевна

Непрерывная параметрическая генерация в  
двулучепреломляющих волоконных световодах с накачкой  
иттербиевым волоконным лазером

01.04.05 «Оптика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель: **Каблуков Сергей Иванович**  
кандидат физико-математических наук, старший  
научный сотрудник

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

**Пивцов Виктор Сергеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт лазерной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Научный центр волоконной  
оптики Российской академии наук (Москва)

Защита диссертации состоится "6" марта 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО  
РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан "19" декабря 2013 г.

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

Ильичев Л. В.

# Общая характеристика работы

## Актуальность

В настоящее время большой интерес представляет задача получения новых длин волн генерации с помощью нелинейных оптических эффектов в волоконных световодах. Для преобразования в низкочастотную область спектра часто используется процесс вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [1]. Для увеличения оптической частоты и расширения диапазона перестройки применяют процесс вырожденного по частоте накачки параметрического четырёхволнового смешения (ЧВС), при котором две волны накачки с частотой  $\omega_p$  генерируют две новые волны с частотами  $\omega_p - \Omega$  (стоксова компонента) и  $\omega_p + \Omega$  (антистоксова компонента), где  $\Omega$  – параметрическая отстройка [2]. С каждым годом увеличивается количество статей, посвященных волоконно-оптическим параметрическим генераторам (ВОПГ), основанным на эффекте ЧВС [3].

Эффективный параметрический процесс требует согласования фаз, при котором величина усиления экспоненциально растет с нормированной мощностью  $\xi = \gamma P_p L$  при  $\xi \gg 1$  ( $P_p$  – мощность накачки,  $L$ ,  $\gamma$  – длина и коэффициент нелинейности световода) [2]. В импульсных ВОПГ  $\xi \gg 1$  из-за большой пиковой мощности накачки. Например, в работе [4] средняя мощность генерируемого излучения при параметрических отстройках 27 ТГц достигает  $\sim 2$  Вт ( $\xi = 7,5$ ). В непрерывных ВОПГ значения  $\xi = 6 - 10$  получают при использовании световодов длиной несколько сотен метров [5, 6]. Однако в длинных световодах их неоднородность сильно уменьшает величину параметрического усиления при больших параметрических отстройках. Так, величина отстроек в непрерывных ВОПГ ограничивалась значением 15 ТГц, которое сравнимо со сдвигом частоты в процессе ВКР. Поэтому мощность стоксовой компоненты увеличивалась за счет совместного комбинационного и параметрического усиления и достигала значений  $\sim 1$  Вт [6]. Несмотря на большое усиление, мощность излучения антистоксовой компоненты не превышала 100 мВт из-за больших потерь для сигнальной волны внутри резонатора [5, 6]. Таким образом, увеличение эффективности генерации и спектрального диапазона непрерывных ВОПГ является актуальной задачей.

Импульсные ВОПГ реализованы для разных длин волн в диапазоне от 0,6 до 1,9 мкм, в то время как непрерывные ВОПГ – только вблизи 1,5 мкм [5 - 7]. В

связи с этим актуальной является задача реализации непрерывных ВОПГ в новых спектральных диапазонах для расширения круга их применений. Для перехода в коротковолновую область спектра (1 мкм и менее) необходимо учитывать несколько важных моментов. Во-первых, возрастают оптические потери внутри световода. Во-вторых, в этой области используются специальные фотонно-кристаллические волоконные световоды (ФКВС), которые характеризуются довольно большой неоднородностью по длине. Из-за этих факторов и сравнительно небольшой мощности накачки  $\sim 0,2$  Вт в первых экспериментах эффективность преобразования непрерывного ЧВС в однопроходной схеме не превышала 1% [8, 9]. Таким образом, для реализации эффективного ВОПГ вблизи 1 мкм в непрерывном режиме необходимо использовать короткие световоды, плотный резонатор и большую мощность накачки. Использование в качестве источника накачки доступного и достаточного простого иттербиевого волоконного лазера (ИВЛ) с высокой мощностью генерации и большой областью перестройки (1 – 1,1 мкм) позволяет решить сразу две проблемы – перейти в новую спектральную область и увеличить эффективность генерации в полностью волоконной схеме ВОПГ.

### **Цель работы**

Исходя из вышесказанного, целью данной работы являлся переход в новый спектральный диапазон и увеличение эффективности генерации непрерывного ВОПГ за счёт использования двулучепреломляющих волоконных световодов и иттербиевого волоконного лазера в качестве источника накачки вблизи 1 мкм.

### **Задачи работы**

Основные задачи, которые необходимо было решить для достижения цели:

1. Поиск подходящих волоконных световодов и выбор параметров ИВЛ для получения непрерывной параметрической генерации в широком спектральном диапазоне.
2. Исследование параметрического процесса в однопроходной схеме с сигнальной затравкой при скалярном и векторном фазовом синхронизме в двулучепреломляющих волоконных световодах, как стандартных, так и фотонно-кристаллических.

3. Разработка эффективного непрерывного волоконно-оптического параметрического генератора с накачкой ИВЛ, исследование и оптимизация его характеристик.

### **Научная новизна**

Впервые в двулучепреломляющем волоконном световоде получена непрерывная параметрическая генерация с векторным согласованием фаз излучения накачки и сигнальной волны (до этого был реализован только импульсный режим). Экспериментально продемонстрировано, что эффективность преобразования в коротковолновую область спектра может достигать нескольких процентов при использовании в качестве лазера накачки непрерывного ИВЛ с длиной волны генерации  $\lambda \approx 1,05$  мкм. Впервые реализован непрерывный ВОПГ с векторным согласованием фаз и получена мощность генерации 100 мВт.

Впервые численно и экспериментально исследованы диаграммы фазового синхронизма коммерчески доступного двулучепреломляющего фотонно-кристаллического волоконного световода (ФКВС) LMA5-PM, разработанного для передачи одномодового излучения в диапазоне 0,4 – 2 мкм. Экспериментально показано, что с помощью ЧВС в таком световоде возможно преобразовывать непрерывное излучение ИВЛ с отстройками частоты до 100 ТГц вверх и вниз (от 0,75 до 1,5 мкм). Получено новое аналитическое решение для параметрических отстроек векторного ЧВС, которое хорошо согласуется с экспериментом при накачке вблизи длины волны нулевой дисперсии (ДНВД) световода в отличие от решения, представленного в работе [10].

Впервые реализован непрерывный полностью волоконный параметрический генератор с длиной волны выходного излучения менее 1 мкм. Использование кольцевой схемы резонатора с двумя селективными ответвителями позволило уменьшить потери для сигнальной волны. В итоге при относительно небольшой величине нормированной мощности  $\xi = 1,8$  получено мощное непрерывное излучение с параметрическими отстройками до 38 ТГц. Продемонстрированная мощность 460 мВт для антистоксовой волны и величина параметрических отстроек являются наибольшими среди представленных к настоящему времени непрерывных ВОПГ. Кроме того, режим больших отстроек позволил исключить влияние комбинационного

усиления на параметрический процесс. Также впервые экспериментально исследовано влияние ширины линии накачки на эффективность ВОПГ.

### **Практическая значимость**

Волоконно-оптический параметрический преобразователь частоты на основе ФКВС LMA5-PM с накачкой ИВЛ можно использовать для перестройки длины волны непрерывного излучения в широком спектральном диапазоне (от 0,75 до 1,5 мкм), что открывает новые возможности его применений в спектроскопии, биомедицине, оптической томографии. Полученное в работе аналитическое решение для параметрических отстроек векторного ЧВС позволяет рассчитывать диаграммы фазового синхронизма при накачке вблизи ДВНД световода, что упрощает расчет выходных характеристик ВОПГ.

На основе световода LMA5-PM экспериментально реализованы полностью волоконные параметрические генераторы с диапазоном перестройки непрерывного излучения 0,92 – 1 мкм и мощностью несколько сотен мВт. Указанные генераторы могут служить компактной и недорогой альтернативой перестраиваемым оптическим источникам в этом диапазоне, например, титан-сапфировому лазеру или одномодовым лазерным диодам.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертации представлялись автором лично устными и стендовыми докладами на международной конференции ICONO/LAT 2010 и 2013 (23-26 августа 2010 г., Казань; 18-22 июня 2013 г., Москва); международной научной студенческой конференции МНСК 2011 (16-20 апреля 2011 г., Новосибирск); 3-ей Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО 2011 (12-14 октября 2011 г., Пермь); 5-го Российского семинара по волоконным лазерам 2012 (27-30 марта 2012 г., Новосибирск); международной конференции SPIE Photonics Europe 2012 (16-19 апреля 2012 г., Брюссель, Бельгия); международном зимнем оптическом колледже Winter College on Optics: Trends in Laser Development and Multidisciplinary Applications to Science and Industry (4-15 февраля 2013 г., Триест, Италия); международной конференции CLEO Europe – IQEC 2013 (12-16 мая 2013 г., Мюнхен, Германия). Результаты также докладывались на научных семинарах Института автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск (23 декабря 2010 г., 27 июня 2013 г., 10 октября 2013 г.).

## **Защищаемые положения**

1. Непрерывный волоконно-оптический параметрический генератор с векторным согласованием фаз возможно реализовать, используя в качестве источника излучения накачки иттербиевый волоконный лазер и двулучепреломляющий волоконный световод со ступенчатым профилем показателя преломления и длиной волны нулевой дисперсии 1,3 – 1,5 мкм.
2. Двулучепреломляющие фотонно-кристаллические волоконные световоды с длиной волны нулевой дисперсии около 1,05 мкм позволяют преобразовать излучение непрерывных иттербиевых волоконных лазеров с отстройкой частоты порядка 100 ТГц при использовании процесса четырехволнового смешения с сигнальной затравочной волной в полностью волоконной схеме.
3. Волоконно-оптический параметрический генератор на базе двулучепреломляющего фотонно-кристаллического волоконного световода позволяет получить непрерывную перестраиваемую генерацию в спектральном диапазоне 0,92 - 1 мкм в полностью волоконной схеме с накачкой иттербиевым волоконным лазером без использования затравочного излучения.
4. Оптимизация ширины линии накачки требует одновременного учета влияния процесса вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, проявляющегося при ее уменьшении, и уширения контура параметрического усиления при ее увеличении.

## **Личный вклад автора**

Основные результаты получены автором лично. В ходе выполнения работ автор принимал активное участие в выборе направления исследований и постановке задач, теоретическом анализе и проведении экспериментов, обработке результатов и их обсуждении, подготовке статей для публикации.

## **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах [A1 – A5], определенных Высшей аттестационной комиссией.

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 129 страницах, содержит 65 рисунков и 2 таблицы. Список литературы состоит из 126 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** описывается область исследований, обосновывается актуальность, определяются цели и задачи, формулируется новизна работы. Кроме того, дается обзор публикаций, посвященных разработке импульсных и непрерывных ВОПГ. Далее приводится изложение основного содержания работы по главам. В конце приводится список публикаций и формулируются защищаемые положения.

**В первой главе** описывается теоретический базис процесса вырожденного по частоте накачки параметрического четырехволнового смешения (ЧВС) в оптических волоконных световодах. Глава состоит из трех разделов.

В первом разделе приводятся аналитические решения для мощности генерации и величины параметрического усиления в приближении неистощенной накачки и небольших параметрических отстроек. Усиление максимально, когда выполняется условие фазового синхронизма.

Во втором разделе подробно рассматриваются два способа согласования фаз в двулучепреломляющих световодах – скалярный (все волны имеют одну поляризацию) и векторный (волны распространяются в разных поляризационных модах). Здесь подчеркивается, что скалярное ЧВС накладывает ограничение на длину волны накачки, так как оно осуществляется при накачке вблизи длины волны нулевой дисперсии (ДВНД) световода  $\lambda_0$ . Для векторного ЧВС такого ограничения нет. Приводятся формулы для параметрических отстроек, и оценивается необходимая мощность накачки для получения параметрического усиления на уровне 10% в коммерчески доступном волоконном световоде LMA5-PM. Для скалярного ЧВС проводится оценка ширины фазового синхронизма, на основании которой делается вывод: эффективность параметрического преобразования может уменьшаться при увеличении частотных отстроек из-за сужения области фазового синхронизма.

Третий раздел обобщает результаты первой главы.

**Вторая глава** посвящена иттербиевому волоконному лазеру как перспективному источнику накачки для параметрической генерации в области менее 1 мкм. Глава состоит из трех разделов.

Первый раздел описывает общие принципы работы ИВЛ. Подчеркивается, что широкий спектр люминесценции Yb в кварцевом стекле позволяет получать генерацию в одномодовом режиме в широком диапазоне длин волн. Далее дается описание двух схем непрерывных ИВЛ, используемых в эксперименте - с линейным и кольцевым резонатором. Рассматриваются характеристики отдельных компонентов схем - лазерных диодов накачки, волоконных объединителей накачки, стационарных и перестраиваемых волоконных брэгговских решеток, активных иттербиевых световодов, волоконных ответвителей. В эксперименте использовались варианты ИВЛ с суммарным диапазоном длин волн неполяризованного излучения 1,01- 1,1 мкм мощностью от 0,5 до 14 Вт. Кроме того, применялась система иттербиевого волоконного задающего генератора-усилителя с линейной поляризацией излучения.

Известно, что эффективность параметрического преобразования критично зависит от спектральных характеристик излучения накачки, поэтому второй раздел посвящен исследованию уширения спектра генерации ИВЛ. В качестве модели уширения линии генерации рассматривается модель фазовой самомодуляции большого числа продольных мод излучения внутри резонатора. Аналитическое решение для ширины спектра генерации показывает, что в приближении неистощенной накачки и  $\xi < 1$  ширина линии генерации линейно зависит от выходной мощности, при этом форма спектра описывается функцией гиперболического секанса. Теория хорошо согласуется с экспериментом при мощности  $\geq 1$  Вт, когда устанавливается непрерывный режим генерации.

В третьем разделе обобщаются результаты второй главы.

**Третья глава** посвящена исследованию непрерывной параметрической генерации в однопроходной схеме с сигнальной затравкой при накачке ИВЛ. Глава состоит из трех разделов.

В первом разделе описывается параметрический процесс с векторным согласованием фаз в стандартном двулучепреломляющем волоконном световоде PM980-XP с  $\lambda_0 \sim 1,4$  мкм. Следует отметить, что исследования других групп проводились с импульсной накачкой, поэтому представленные в разделе

результаты полностью оригинальны. Вначале приводятся характеристики световода PM980-XP, затем теоретически оцениваются возможная мощность генерации и ширина фазового синхронизма векторного ЧВС. Здесь и далее в тексте под векторным согласованием фаз будет подразумеваться процесс, при котором излучение накачки имеет компоненты поляризации вдоль каждой из осей двулучепреломляющего волоконного световода, а параметрические волны (сигнальная и генерируемая – холостая) поляризованы вдоль разных осей. Показывается, что мощность генерации  $P_i$  в случае слабой нелинейности квадратично зависит от мощности накачки  $P_p$  и линейно от мощности сигнальной затравки  $P_s$ . Далее приводятся экспериментальные результаты по непрерывной параметрической генерации в световоде PM-980XP длиной 35 и 85 м с накачкой ИВЛ. Контур фазового синхронизма в эксперименте оказывается в два раза шире расчетного из-за влияния аппаратной функции используемого спектроанализатора и уширения спектра многомодового излучения лазеров накачки и сигнала. На рис. 1 показано сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (линии) зависимостей мощности генерируемой холостой волны от мощности сигнальной затравки для световода PM-980XP длиной 85 (а) и 35 м (б) при двух значениях мощности накачки.

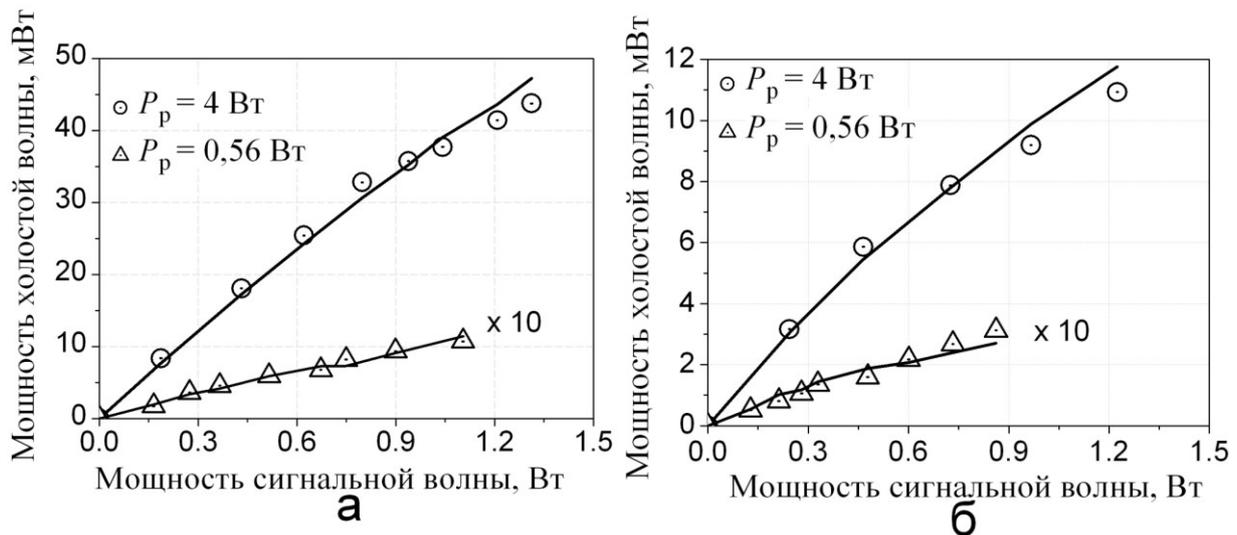


Рис. 1. Экспериментальная (точки) и теоретическая (сплошные линии) зависимость мощности холостой волны от мощности сигнальной волны для волоконного световода длиной 85 (а) и 35 (б) м.

Зависимость  $P_i(P_s)$  имеет линейный характер на начальном участке, что соответствует теории. Однако при больших  $P_s$  она насыщается, возможно, из-за уширения спектров генерации волоконных лазеров за пределы области

фазового синхронизма. Мощность параметрической генерации  $P_i$  и эффективность преобразования  $P_i/P_s$  для световода длиной 85 м при  $P_p = 4$  Вт достигают 40 мВт и 3,3%, соответственно. На основании полученных данных рассчитывается коэффициент нелинейности волоконного световода  $\gamma = 3,9 \text{ Вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$ . Векторный ЧВС с накачкой вдали от ДВНД световода позволяет получать только небольшие частотные отстройки ( $\sim 10$  ТГц). Для их увеличения в следующем разделе используется фотонно-кристаллический волоконный световод с ДВНД, находящейся в спектральном диапазоне генерации ИВЛ.

Второй раздел посвящен исследованию непрерывной параметрической генерации в двулучепреломляющем ФКВС LMA5-PM с накачкой непрерывным перестраиваемым ИВЛ ( $\lambda = 1,01 - 1,1$  мкм) и сигнальной затравкой. ДВНД данного световода находится вблизи 1,05 мкм, что позволяет перестраивать накачку из области положительной в область отрицательной дисперсии световода. В разделе численно и экспериментально исследуется диапазон возможных параметрических отстроек в ФКВС при скалярном и векторном согласовании фаз. Полученные диаграммы фазового синхронизма (зависимость длины волны параметрической генерации от длины волны накачки при выполнении условия фазового синхронизма, когда волновая расстройка  $\Delta\beta = 0$ ) представлены на рис. 2. Точками обозначены экспериментальные данные, линии – численный расчет.

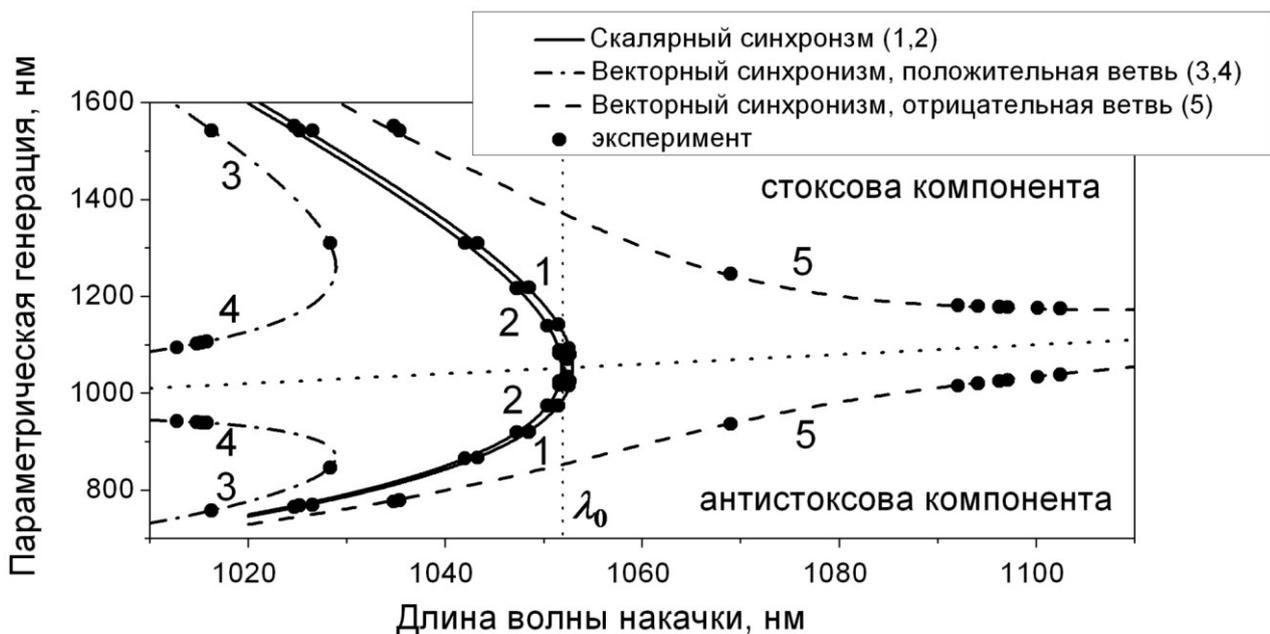


Рис. 2. Возможные параметрические отстройки в световоде LMA5-PM при накачке непрерывным ИВЛ: точки - экспериментальные результаты, линии – численный расчет.

Из рисунка видно, что в двулучепреломляющем световоде существуют две ветви скалярного (1, 2) и три ветви векторного (3, 4, 5) фазового синхронизма, соответствующие разным поляризациям четырех волн. Экспериментальные параметрические отстройки достигают 100 ТГц для двух методов согласования фаз, при этом минимальная длина волны генерации доходит до  $\sim 760$  нм. На рис. 2 наблюдается хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими графиками.

Далее выводится аналитическое решение условия фазового синхронизма для параметрических отстроек в двулучепреломляющем световоде. Волновая расстройка  $\Delta\beta$  раскладывается в ряд Тейлора до 4-го порядка вблизи  $\lambda_0$ , при этом получается кубическое уравнение на частоту параметрической отстройки  $\Omega$ :  $\Omega^3 + p\Omega + q = 0$ , где коэффициенты  $p$  и  $q$  зависят от высших порядков дисперсии и величины двулучепреломления световода, а также от частоты накачки. Данное уравнение решается по формуле Кордано и в зависимости от знака дискриминанта  $Q$  имеет от одного до трех вещественных корней. В работе показано, что полученные аналитические решения хорошо согласуются с численными расчетами при отстройках до 60 ТГц в отличие от аналитического решения из работы [10], которое уходит в бесконечность при накачке вблизи ДВНД световода (для вывода решения авторы использовали меньше членов разложения в ряд Тейлора).

Далее экспериментально исследуется ширина фазового синхронизма и эффективность параметрического преобразования в ФКВС LMA5-PM. Для исключения влияния неоднородности световода на экспериментальные результаты использовалось скалярное ЧВС с накачкой вблизи  $\lambda_0$ . Показано, что для световода длиной 1 м контуры синхронизма для двух поляризаций перекрываются, и вся мощность неполяризованной накачки участвует в ЧВС. Для световода длиной 18 м спектральный контур синхронизма сужается и расщепляется на две компоненты, в итоге только часть излучения накачки с определенной поляризацией участвует в преобразовании. Мощность холостой волны на  $\lambda \approx 996$  нм в световоде длиной 18 м достигает 75 мВт, что соответствует эффективности параметрического преобразования  $P_i(L)/P_s(0) = 15\%$  при  $P_p = 4$  Вт. Такой величины достаточно для реализации схемы полностью волоконного параметрического генератора без сигнальной затравки.

Третий раздел обобщает результаты главы.

**В четвертой главе** представлены результаты по созданию первого непрерывного ВОПГ с накачкой ИВЛ. Глава состоит из трех разделов.

В первом разделе рассматривается возможность разработки ВОПГ с использованием векторного ЧВС в стандартном двулучепреломляющем световоде PM980-XP. Линейный резонатор генератора формируется высокоотражающими ВБР на  $\lambda = 1115$  нм и позволяет усиливать излучение на стоксовой длине волны за счет совместных эффектов параметрического и комбинационного усиления. Далее экспериментально исследуются зависимости мощности генерируемой волны от мощности накачки и длины световода. Максимальная мощность генерации (эффективность преобразования) в световоде длиной 85 м составила 100 мВт на длине волны 1042 нм.

Во втором разделе описывается непрерывный ВОПГ на основе ФКВС LMA5-PM длиной 18 м со скалярным согласованием фаз. Схема ВОПГ представлена на рис. 3. В кольцевом резонаторе, сформированном селективными ответвителями WDM1 и WDM2, усиливается стоксова компонента ЧВС. В работе разработаны две схемы ВОПГ, оптимизированные на максимальную мощность антистоксова излучения с длинами волн 975 и 930 нм, соответственно. Потери для сигнальной волны внутри резонатора  $\sim 30\%$ , из них 20% - потери в местах сварки ФКВС со стандартными световодами.

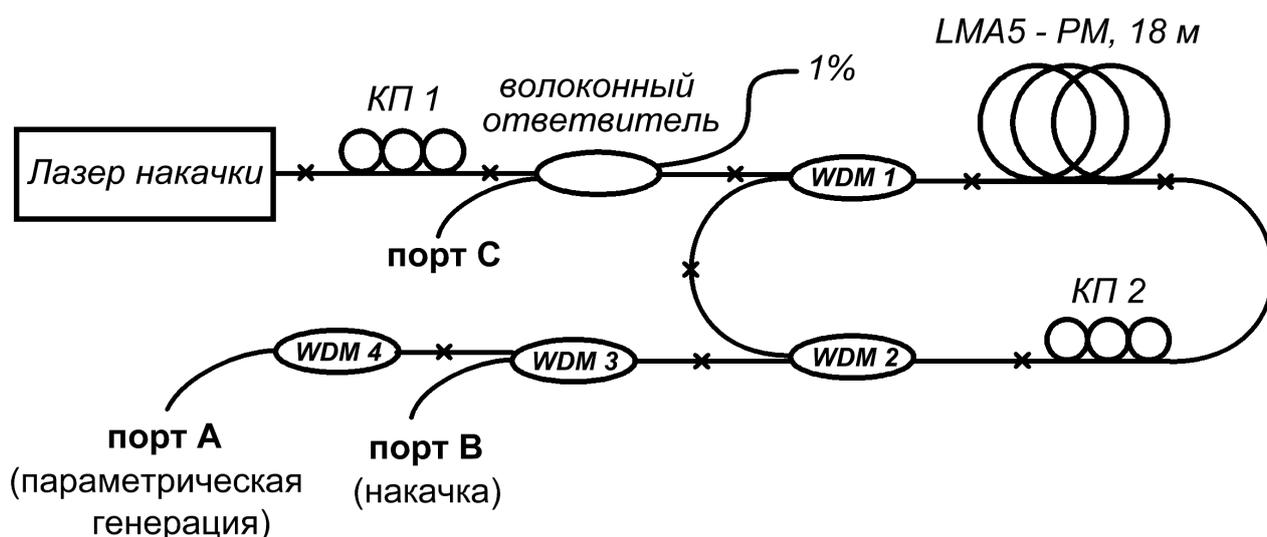


Рис. 3. Схема непрерывного ВОПГ: WDM – волоконный селективный ответвитель, КП – контроллер поляризации.

Перестройка ВОПГ осуществляется за счёт отстройки длины волны накачки  $\lambda_p$  в область положительной дисперсии световода. Из рис. 4 видно, что для ВОПГ на 975 нм область перестройки простирается от 960 до 1010 нм (а), для ВОПГ на 930 нм – от 923 до 1005 нм (б). В коротковолновой области перестройка ограничена из-за увеличения потерь для стоксовской волны за счет спектральных характеристик резонатора и уменьшения параметрического усиления из-за неоднородности волоконного световода по длине. Ширина линии генерации зависит от ширины фазового синхронизма и изменяется с 0,7 до 5 нм при перестройке длины волны генерации с 923 до 1005 нм. Излучение с длиной волны более 1005 нм в работе не рассматривается, так как ширина спектра генерации в этом случае превышает 5 нм.

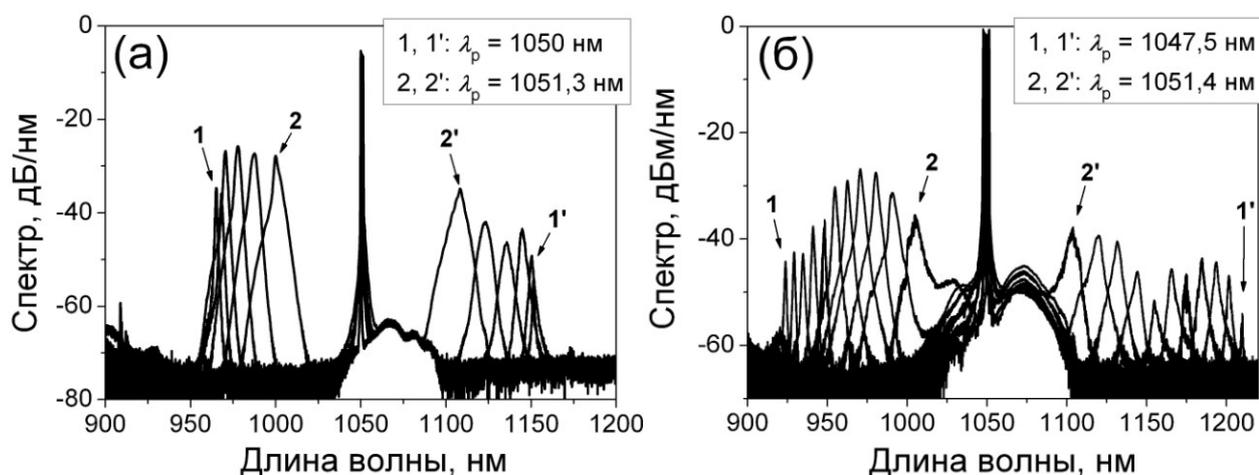


Рис. 4. Спектры ВОПГ на 975 нм (а) и 930 нм (б) при перестройке длины волны накачки  $\lambda_p$  (порт В).

Изменение длины волны накачки приводит к смещению контура параметрического усиления. Контур усиления, возникающие для отдельных спектральных компонент в пределах ширины линии накачки  $\Delta\lambda_p$ , уширяют область интегрального параметрического усиления. Поэтому амплитуда усиления уменьшается, увеличивая порог ВОПГ. Отметим, что влияние  $\Delta\lambda_p$  особенно заметно для больших параметрических отстроек, когда ширина фазового синхронизма мала. На рис. 5а,б показана экспериментальная зависимость выходной мощности на длинах волн 972 и 931 нм от мощности накачки для разных значений ширины линии  $\Delta\lambda_p$ . С одной стороны, уширение линии накачки приводит к увеличению порога ВОПГ (рис. 5б). С другой стороны, есть область параметров  $\Delta\lambda_p$ , для которых амплитуда контура усиления и порог ВОПГ не меняются (рис. 5а). Таким образом, не обязательно

использовать одночастотное излучение накачки, чтобы повысить эффективность генерации. В работе также экспериментально показано, что пороговую мощность ВОПГ можно снизить, используя линейно поляризованное излучение накачки и уменьшая величину параметрических отстроек. Несмотря на небольшую нормированную мощность  $\xi = 1,8$ , за счет оптимизации потерь в резонаторе ВОПГ были получены рекордные значения мощности (460 мВт на  $\lambda = 972$  нм и 320 мВт на  $\lambda = 931$  нм) и частотной отстройки (38 ТГц) для непрерывного ВОПГ с преобразованием частоты вверх. Дифференциальная эффективность достигала 9,4% и 15% на длинах волн 972 и 931 нм, соответственно.

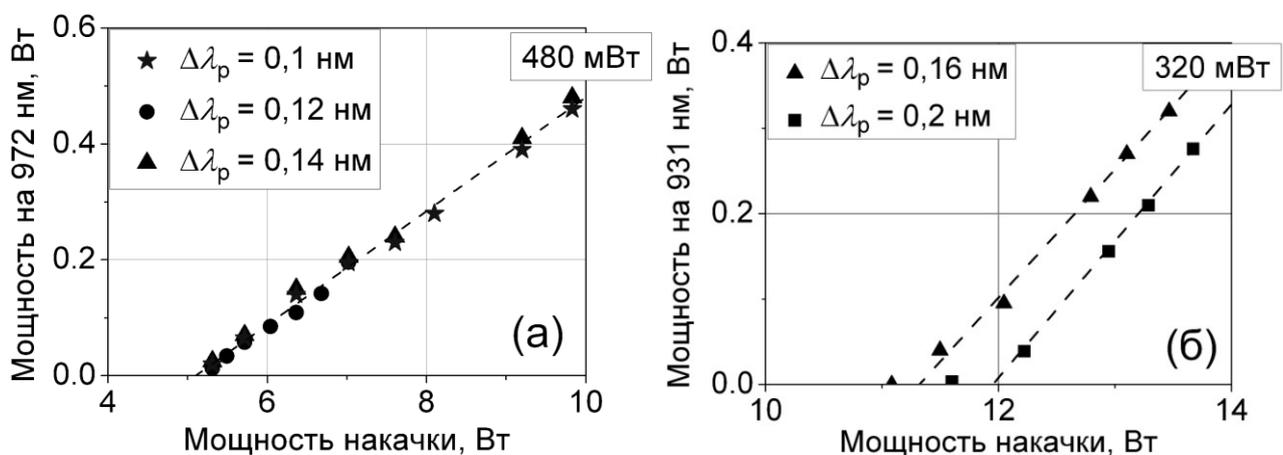


Рис. 5. Зависимость мощности генерации на длинах волн 972 нм (а) и 931 нм (б) от мощности накачки для разных значений ширины линии накачки  $\Delta\lambda_p$ .

В разделе также рассматривается влияние конкурирующих нелинейных эффектов – ВКР и вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ) на эффективность параметрического преобразования. Показано, что ВРМБ начинает появляться при сужении линии накачки до 40 пм. Если при этом возникает обратная связь на лазер накачки, излучение накачки модулируется с периодом 48 нс, соответствующим обходу резонатора ИВЛ. Увеличение пиковой мощности накачки приводит к увеличению дифференциальной эффективности (мощности генерации) до 25% (1,1 Вт) на длине волны 974 нм. Если обратная связь подавлена (за счёт применения изоляторов на выходе лазера накачки), мощность параметрической генерации уменьшается из-за временной нестабильности излучения накачки в кольцевом резонаторе.

В третьем разделе обобщаются результаты четвертой главы, и рассматриваются перспективы создания перестраиваемого непрерывного ВОПГ с длиной волны генерации вблизи 750 нм.

**Заключение** содержит формулировку результатов данной работы.

## **Основные результаты**

1. Впервые экспериментально продемонстрирована непрерывная параметрическая генерация с векторным согласованием фаз в стандартном двулучепреломляющем волоконном световоде. Эффективность преобразования сигнального излучения (1080 нм) в холостую волну (1017 нм) в однопроходной схеме достигает 3,3% при накачке иттербиевым волоконным лазером (ИВЛ). Мощность генерации составляет 40 мВт. Впервые продемонстрирован непрерывный волоконно-оптический параметрический генератор (ВОПГ) с преобразованием частоты вверх при векторном согласовании фаз, выходная мощность которого достигает 100 мВт (1042 нм).
2. Численно и экспериментально показано, что в двулучепреломляющем фотонно-кристаллическом волоконном световоде (ФКВС) LMA5-PM с накачкой ИВЛ, перестраиваемым вблизи длины волны нулевой дисперсии (ДНВД) в диапазоне 1,01-1,1 мкм, использование сигнальной затравки позволяет получить непрерывную параметрическую генерацию в диапазоне от 0,75 до 1,55 мкм, что соответствует параметрическим отстройкам частоты до 100 ТГц как для векторного, так и для скалярного фазового синхронизма. Получено аналитическое решение для параметрических отстроек векторного фазового синхронизма с накачкой вблизи ДНВД волоконного световода, согласующееся с численным расчетом для параметрических отстроек до 60 ТГц.
3. Впервые реализован непрерывный полностью волоконный оптический параметрический генератор на основе двулучепреломляющего ФКВС с накачкой ИВЛ вблизи 1,05 мкм, генерирующий излучение с длиной волны менее 1 мкм. Частотные отстройки достигают 38 ТГц, а диапазон перестройки ВОПГ ограничен в коротковолновой области длиной волны 923 нм, определяющейся спектральными характеристиками используемого резонатора и шириной линии накачки. Дифференциальная эффективность

(мощность) генерации при накачке неполяризованным излучением достигает 9,6% (460 мВт) на длине волны 972 нм и 15% (320 мВт) на длине волны 931 нм.

4. Экспериментально показано, что ширина линии накачки имеет оптимум: её увеличение приводит к снижению максимума параметрического усиления и росту порога ВОПГ, а уменьшение - к переходу в импульсный режим параметрической генерации из-за влияния процесса вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

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

- A1. Злобина Е.А., Каблуков С.И., Бабин С.А. Непрерывная параметрическая генерация в волоконном световоде с сохранением поляризации // *Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41, № 9. – С. 794 – 800.
- A2. Zlobina E.A., Kablukov S.I., Babin S.A. Phase matching for parametric generation in polarization maintaining photonic crystal fiber pumped by tunable Yb-doped fiber laser // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2012. – Vol. 29, no.8. – Pp. 1959–1967.
- A3. Kablukov S.I., Zlobina E.A., Podivilov E.V., and Babin S.A. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37, no. 13. – Pp. 2508–2510.
- A4. Zlobina E.A., Kablukov S.I., Babin S.A. Tunable CW all-fiber optical parametric oscillator operating below 1  $\mu\text{m}$  // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, no. 6. – Pp. 6777 – 6782.
- A5. Злобина Е.А., Каблуков С.И. Оптические параметрические генераторы на основе волоконных световодов // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 53–78.

### **Список цитируемых работ**

- [1] Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // *Квантовая электроника*. – 2004. – том 34, № 10. – стр. 881 – 900.
- [2] Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир – 1996.
- [3] Marhic M. E. *Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices*. New York: Cambridge University Press – 2008.
- [4] Xu Y.Q., Mak K.F., Murdoch S.G. Multiwatt level output powers from a tunable fiber optical parametric oscillator // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36, no. 11. – Pp. 1966 – 1968.

- [5] Xu Y.Q., Murdoch S.G., Leonhardt R., and Harvey J.D. Raman-assisted continuous-wave tunable all-fiber optical parametric oscillator // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2009. – Vol. 26, no. 7. – Pp. 1351 – 1356.
- [6] Malik R., Marhic M.E. Tunable continuous-wave fiber optical parametric oscillator with 1-W output power // in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (OSA, 2010)*, paper JWA18.
- [7] Sharping J.E. Microstructure fiber based optical parametric oscillators // *J. Lightwave Tech.* – 2008. – Vol. 26, no. 14. – Pp. 2184 – 2191.
- [8] Andersen T., Hilligsøe K., Nielsen C. et al. Continuous-wave wavelength conversion in a photonic crystal fiber with two zero-dispersion wavelengths // *Opt. Express.* – 2004. – Vol. 12, no 14. – Pp. 4113 – 4122.
- [9] Яценко Ю.П., Левченко А.Е., Прямиков А.Д., и др. Четырехволновое смешение в двухслойных микроструктурированных световодах // *Квант. электроника.* – 2005. – том 35, №8. – стр. 715 – 719.
- [10] Jain R.K., Stenersen K. Phase-matched four-photon mixing processes in birefringent fibers // *Appl. Phys. B.* – 1984. – Vol. 35, no. 2. – Pp. 49 – 57.