

На правах рукописи

Лобач Иван Александрович

**Особенности распространения и генерации лазерного  
излучения в многосердцевинных волоконных световодах**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2012

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

Научный руководитель кандидат физико-математических наук  
Каблуков Сергей Иванович

Официальные оппоненты: Федорук Михаил Петрович  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Новосибирский государственный университет,  
ректор

Чуркин Дмитрий Сергеевич  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт лазерной физики Сибир-  
ского отделения Российской академии наук,  
научный сотрудник

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

Защита состоится «14» декабря 2012 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «12» ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Насыров К.А.

# Общая характеристика работы

## Актуальность

Отличительной особенностью многосердцевидных волоконных световодов (МВС) является наличие связи мод сердцевин. Связь возникает вследствие того, что часть света, распространяющаяся по одной сердцевине, захватывается другой сердцевиной. Благодаря зависимости коэффициента связи между модами от характеристик излучения или внешних условий на основе МВС могут быть реализованы различные волоконно-оптические устройства: спектральные фильтры [1], ультрабыстрые переключатели [2], сенсоры температуры и/или деформаций [3]. Помимо того, что многосердцевидная структура таких волноводов влияет на распространение излучения, она также будет влиять на параметры излучения в лазерных схемах. Первые результаты показывают, что лазеры на основе МВС могут обладать как спектральными (узкий спектр в [4]), так и временными (короткие импульсы в [5]) характеристиками, которые, как правило, не наблюдаются в стандартных волоконных лазерах.

Понимание причин возникновения особенностей в лазерной генерации во многом связано со спецификой распространения излучения в МВС. Несмотря на принципиальную важность, подробных экспериментальных исследований распространения излучения в МВС не проводилось. Основным препятствием здесь является недостаточность методов для изучения и характеристики таких световодов. Как правило, МВС описываются своим пропусканием. Коэффициент пропускания является интегральной величиной всего световода, и он не может полно описать МВС из-за возможных продольных неоднородностей параметров. В то же время знание о продольном распределении мощности (ПРМ) в сердцевинах может помочь выделить основные факторы, влияющие на процессы, которые происходят в МВС. Кроме того, экспериментальное измерение ПРМ могло бы полностью верифицировать существующую теорию связи мод в МВС. Существующие методы исследования МВС являются деструктивными или косвенными. В косвенных методах для восстановления ПРМ измеряется значение мощности только на выходе из световода.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что разработка прямого метода измерения ПРМ позволит улучшить понимание процессов, происходящих в МВС. Задачи по исследованию распространения излучения в МВС

и верификации существующей теории для МВС являются актуальными. Так как МВС могут служить активной средой для высокомошных волоконных лазеров с когерентным сложением пучков [6], то представляет интерес экспериментальное изучение особенностей в генерации лазеров на основе МВС и установление их причин.

## **Цель работы**

Целью данной работы было исследование особенностей распространения и генерации лазерного излучения в многосердцевинных волоконных световодах.

## **Задачи работы**

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка прямого метода исследования продольного распределения мощности в двухсердцевинных волоконных световодах (2ВС).
2. Экспериментальное изучение с помощью предложенного метода влияния кривизны световода и поляризации излучения на связь мод сердцевин в 2ВС.
3. Выявление особенностей в спектре генерации и временной динамике лазеров на основе МВС в различных схемах и установление их причин.

## **Научная новизна**

Предложен новый прямой метод измерения ПРМ внутри МВС, основанный на боковом свечении сердцевин. С помощью предложенного метода впервые экспериментально изучено влияние кривизны волокна и поляризации излучения на связь мод в 2ВС. Показано существенное влияние двулучепреломления сердцевин на распространение излучения в таких световодах.

Продемонстрирован новый механизм связи мод в МВС в случае слабосвязанных мод сердцевин через центральную моду-посредник.

Экспериментально обнаружен и подробно изучен новый эффект в волоконных лазерах — самоиндуцированное сканирование узкополосной частоты линии генерации. Для описания эффекта предложена модель, основанная на пространственном выжигании дыр в усилении и деформации контура усиления активной среды.

## **Практическая значимость**

Прямой метод измерения ПРМ может применяться для экспериментального изучения и характеристики МВС.

С помощью модифицированной поляризационной модели связанных мод, учитывающей двулучепреломление, могут быть проведены разработка МВС и оптимизация их характеристик.

Механизм связи мод сердцевин через центральную моду-посредник может быть использован для синхронизации фаз мод сердцевин в лазере на основе МВС.

На основе эффекта узкополосного самоиндуцированного сканирования частоты реализован полностью волоконный лазер с рекордным диапазоном самосканирования длины волны — 16 нм. Реализованный лазер может служить источником излучения в системе опроса волоконных брэгговских решеток в сенсорной системе.

## **Апробация работы**

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались автором лично на следующих семинарах и конференциях: 13th and 14th Int. Conf. "Laser Optics" (24–27 June 2008; 28 June – 2 July 2010, St. Petersburg, Russia), 3-й и 5-й Российский семинар по волоконным лазерам (31 марта – 2 апреля 2009 г., Уфа; 27-30 марта 2012 г., Новосибирск), 2-я и 3-я Всероссийская конференция по волоконной оптике (8–9 октября 2009 г.; 12–14 октября 2011 г., Пермь), 20th International Laser Physics Workshop LPHYS (11–15 July 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina), SPIE Photonics West (21–26 January 2012, San Francisco, USA). Результаты также докладывались на научных семинарах Института автоматизации и электротехники СО РАН (24 июня 2010 г.; 7 апреля 2011 г.) и университета Астона (16 May 2011, Birmingham, UK).

## **Защищаемые положения**

1. Зависимость степени связи мод в многосердцевинных волоконных световодах от радиуса изгиба световода носит резонансный характер. Эффективная связь мод происходит только тогда, когда разность констант распространения мод, связанная с кривизной волновода, компенсирует технологическую разность.
2. Различие двулучепреломления сердцевин в многосердцевинных волоконных световодах существенно влияет на связь мод сердцевин в нем и приводит к зависимости продольного распределения мощности в световоде от номера сердцевины, в которую вводится излучение.
3. В лазерах на основе одно- или многосердцевинных волоконных световодов в режиме самопульсаций реализуется самоиндуцированное сканирование частоты лазера за счет выжигания пространственных дыр в продольном распределении усиления. При этом мгновенный спектр генерации состоит из небольшого количества (порядка десяти) продольных мод.
4. Вытекающая мода в центральной области оболочки может являться посредником в процессе обмена энергии между модами сердцевин в многосердцевинных волоконных световодах в случае слабой прямой связи.

## **Личный вклад автора**

Основные результаты получены автором лично. И. А. Лобач активно участвовал во всех этапах исследований: от планирования экспериментов до обсуждения результатов, теоретического анализа и подготовки статей.

## **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 23 печатных работах, включая 5 статей, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией [А1–А5].

## Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Диссертация изложена на 118 страницах текста, содержит 55 рисунков. Список литературы содержит 100 наименований.

## Основное содержание работы

**Во введении** описана область, в которой проводились исследования, приведен обзор публикаций, подтверждающий актуальность работы, сформированы цели работы и защищаемые положения. Также изложено основное содержание материала по главам.

**В первой главе** представлен теоретический базис для описания распространения излучения в идеальном многосердцевинном волоконном световоде, основанный на уравнениях связанных мод. В модели не учитывается изгиб волновода и поляризация излучения. Проводится анализ зависимости константы связи мод от длины волны излучения и геометрических характеристик волновода. Глава не содержит результатов оригинальных исследований, выполненных автором.

**Вторая глава** посвящена изучению факторов, влияющих на распространение излучения в двухсердцевинном волоконном световоде (2ВС). Глава состоит из четырех разделов. Первый раздел посвящён описанию оригинальной методики измерения ПРМ в 2ВС с помощью камеры и микрообъектива [А1]. Методика основана на измерении интенсивности бокового свечения сердцевин. В этом разделе подробно описана процедура обработки получаемых изображений для восстановления мощности внутри световода. Погрешность при восстановлении абсолютного значения мощности не превышала 5%. Показано, что предложенная методика может быть расширена на световоды с другой легирующей примесью. Для сравнения приводится описание альтернативных методов для исследования МВС.

Второй раздел посвящён изучению влияния кривизны световода на связь мод сердцевин в 2ВС [А1]. Сначала обсуждаются возможные механизмы влияния кривизны на связь мод: деформация поля моды и изменение разности оптических путей в сердцевинах. Полученные оценки показали, что влияни-

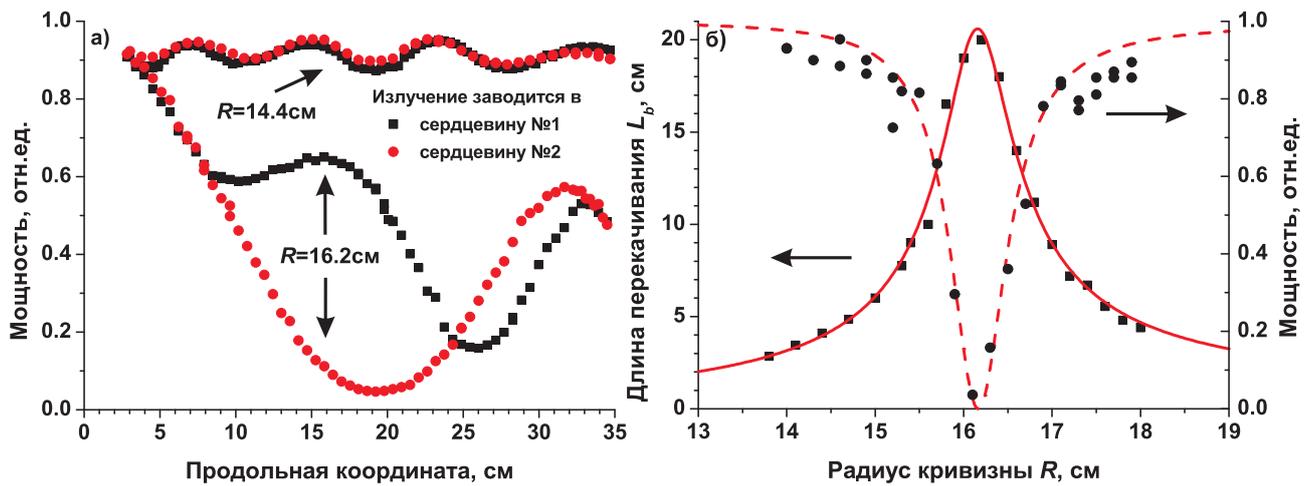


Рис. 1. ПРМ в первой сердцевине, когда излучение заводится в первую сердцевину (квадраты), и во второй сердцевине, когда излучение заводится во вторую сердцевину (кружки), при радиусах изгиба световода 14.4 и 16.2 см (а). Зависимость длины и мощности перекачивания от радиуса кривизны волокна (б).

ем деформации поля моды для достаточно больших радиусов изгиба можно пренебречь. Далее приводятся описание эксперимента и экспериментальные результаты. Для радиусов кривизны от 14 до 18 см в 2ВС длиной 37 см были измерены ПРМ для случаев, когда излучение заводится в первую или во вторую сердцевину. При радиусе изгиба 14.4 см ПРМ представляют собой частые осцилляции с маленькой амплитудой перекачивания (рис. 1(а)). При увеличении радиуса кривизны в ПРМ наблюдалось увеличение коэффициента перекачивания и периода осцилляций. И при резонансном радиусе кривизны 16.2 см наблюдалось практически полное перекачивание мощности (рис. 1(а)). При дальнейшем увеличении радиуса кривизны наблюдалось уменьшение длины и амплитуды перекачивания. Для каждого радиуса кривизны определялись длина и мощность перекачивания (рис. 1(б)). Результаты показывают, что зависимость связи мод от кривизны носит резонансный характер. Это означает, что эффективная связь мод в МВС происходит только тогда, когда технологическая разность показателей преломления между сердцевинами компенсируется посредством фотоупругого эффекта. Из экспериментальных данных для исследуемого образца получены значения технологической разности показателей преломления между сердцевинами  $\delta n = 1.1 \cdot 10^{-4}$  и длины связи  $L_{coup} = 20.6$  см.

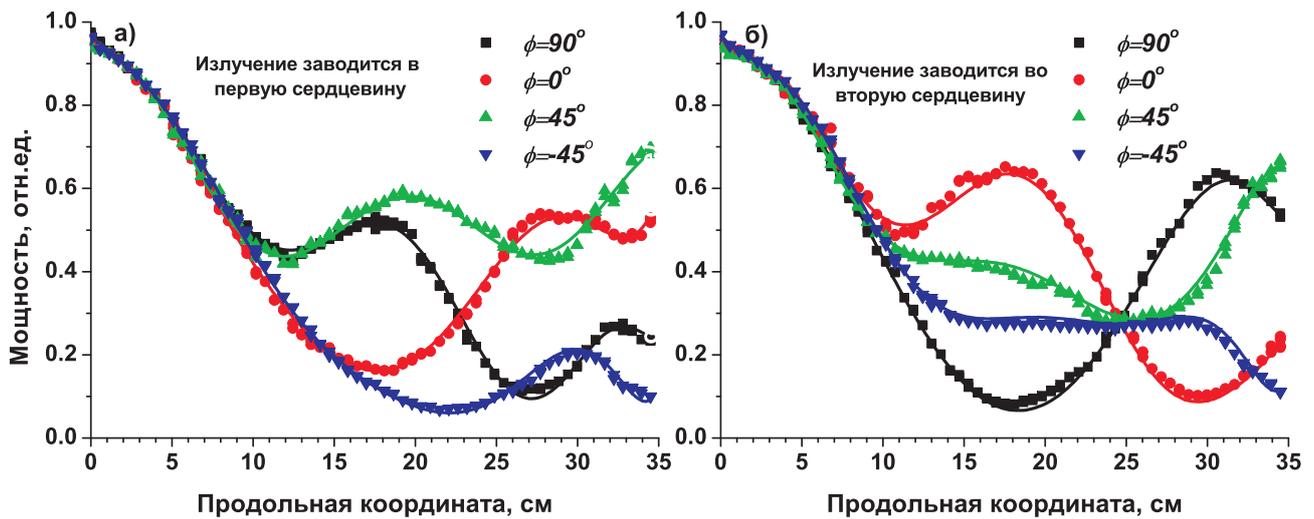


Рис. 2. ПРМ при различных азимутах линейно-поляризованного входного излучения: в первой (а) и во второй (б) сердцевинах. Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошные линии – предложенной модели.

Было предположено, что различие в ПРМ для разных входных условий и отличие ПРМ от гармонических осцилляций обусловлены влиянием поляризации излучения и связаны с разным двулучепреломлением (ДЛП) в сердцевинах. Для проверки этого предположения было изучено влияние поляризации распространяющегося излучения на связь мод сердцевины в том же самом образце 2ВС при резонансном радиусе кривизны [A2]. Этому посвящён третий раздел. Сначала приводятся результаты по измерению ПРМ для различных состояний поляризаций входного излучения (рис. 2). Показано, что связь мод сердцевины существенно зависит как от состояния поляризации входного излучения, так и от того, в какую из сердцевины заводить излучение. Так как стандартная теория не объясняет полученные экспериментальные результаты, то теория связанных мод в 2ВС была модифицирована с учетом поляризации излучения и ДЛП сердцевины. Приводится частное аналитическое решение полученной системы и его анализ. Кроме того, следствия из теории были подтверждены экспериментально: 1) ПРМ зависит от того, куда заводить излучение; 2) ПРМ, усредненное по состояниям поляризации входного излучения, не зависит от того, в какую из сердцевины заводить излучение.

Выводы по измерению ПРМ приводятся в четвертом разделе. Несмотря на качественное согласие между предложенной модифицированной теорией и экспериментальными данными, полного согласия не удалось получить. Это может свидетельствовать о непостоянстве характеристик волокна по длине,

так как в эксперименте технически очень сложно точно обеспечить постоянство радиуса изгиба. Полученные результаты демонстрируют, что при разработке МВС необходимо исключать различие ДЛП в сердцевинах, а при изготовлении обеспечивать постоянство параметров по длине с высокой точностью. Также предлагается дизайн-проект 2ВС, в котором может быть уменьшена чувствительность к поляризации.

**Третья глава** посвящена изучению лазеров на основе иттербиевых многосердцевинных волокон. Глава состоит из пяти разделов. Первый раздел главы посвящён получению режима синхронизации мод (СМ) в волоконном лазере с помощью 2ВС [А2]. Отрезок 2ВС выполнял функцию поляризационного фильтра в схеме с нелинейным вращением состояния поляризации [7]. Пропускание 2ВС составляло от 25 до 50 % в зависимости от поляризации проходящего излучения. В кольцевой схеме лазера удалось получить режим СМ, что проявлялось как во временной динамике — эквидистантные импульсы с длительностью около 50 пс, так и в спектре генерации — спектр с шириной порядка 7 нм. Замена 2ВС на аналогичное односердцевинное пассивное или активное волокно приводила к исчезновению режима, что подтверждает ключевую роль отрезка 2ВС для получения СМ. В итоге были получены импульсы с энергией порядка 3 нДж. С помощью эксперимента с пробным лазером получено оценочное значение для пиковой мощности  $P_{\text{peak}} \approx 13$  кВт, при котором связь мод нелинейно зависит от входной мощности [5].

Второй раздел посвящён изучению лазера на основе иттербиевого 2ВС и одномодовой волоконной брэгговской решетки (ВБР). В качестве активной среды использовался иттербиевый 2ВС. Резонатор лазера образовывался прямым торцом световода, сколотого под прямым углом, и одномодовой ВБР, приставленной к одной из сердцевин. Таким образом, обратная связь была реализована только для одной сердцевины. Оказалось, что временная динамика со стороны ВБР и прямого скола различаются. Со стороны решетки помимо микросекундных самопульсаций наблюдались миллисекундные импульсы, которые отсутствовали со стороны скола. Оказалось, что это является проявлением нового эффекта для волоконных лазеров — узкополосного самоиндуцированного сканирования частоты (ССЧ). Эффект заключается в плавном изменении длины волны генерации во времени. При достижении определенной величины длина волны скачкообразно уменьшается и процесс повторяется снова. Миллисекундные импульсы были связаны с изменением

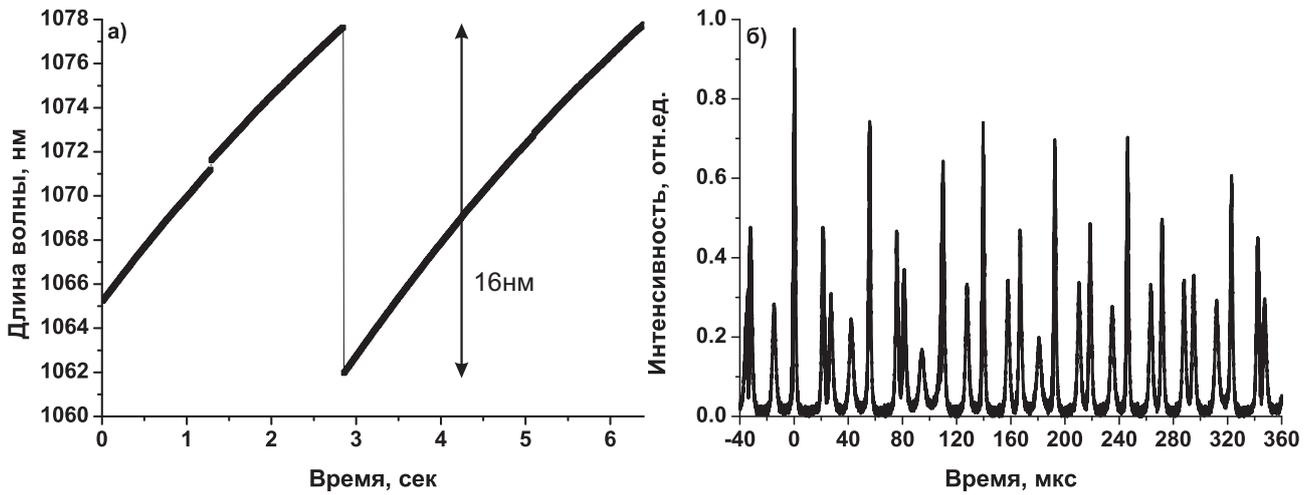


Рис. 3. Временная динамика длины волны (а) и интенсивности (б) в лазере с самоиндуцированным сканированием частоты.

коэффициента пропускания ВБР с длиной волны. Как выяснилось позднее, эффект ССЧ не связан со структурой световода и может наблюдаться в стандартных волоконных лазерах на основе односердцевинных световодов. Изучению эффекта ССЧ в таких лазерах посвящён третий раздел [А3]. Продемонстрирован эффект ССЧ с диапазоном перестройки около 0.1 нм в стандартной схеме волоконного лазера с ВБР и прямым сколом. Замена ВБР на волоконное кольцевое зеркало позволила расширить диапазон перестройки до 16 нм (рис. 3(а)). Эффект ССЧ наблюдался только в присутствии режима самопульсаций (рис. 3(б)). На основании того, что частота самопульсаций и скорость сканирования зависят похожим образом от выходной мощности и длины резонатора (рис. 4), был сделан вывод, что эффект ССЧ связан с эффектом самопульсаций. Также было установлено, что мгновенный спектр генерации имеет ширину  $\sim 100$  МГц. Надо отметить, что эффект ССЧ ранее уже наблюдался в рубиновом лазере [8] и объяснялся пространственным выжиганием дыр (ПВД) в усилении среды. Результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждают идею о ПВД. Однако вопрос о направлении движения лазерной линии оставался открытым. В диссертации было предложено, что направление движения связано со смещением максимума контура усиления иттербия в коротковолновую область при увеличении инверсии населенности в лазере. На основании предложенной модели приводятся оценки по сдвигу лазерной частоты между импульсами  $\delta\nu = 3c/8nl$ , где  $c$  — скорость света,  $n$  — показатель преломления кварцевого стекла,  $l$  — длина активной

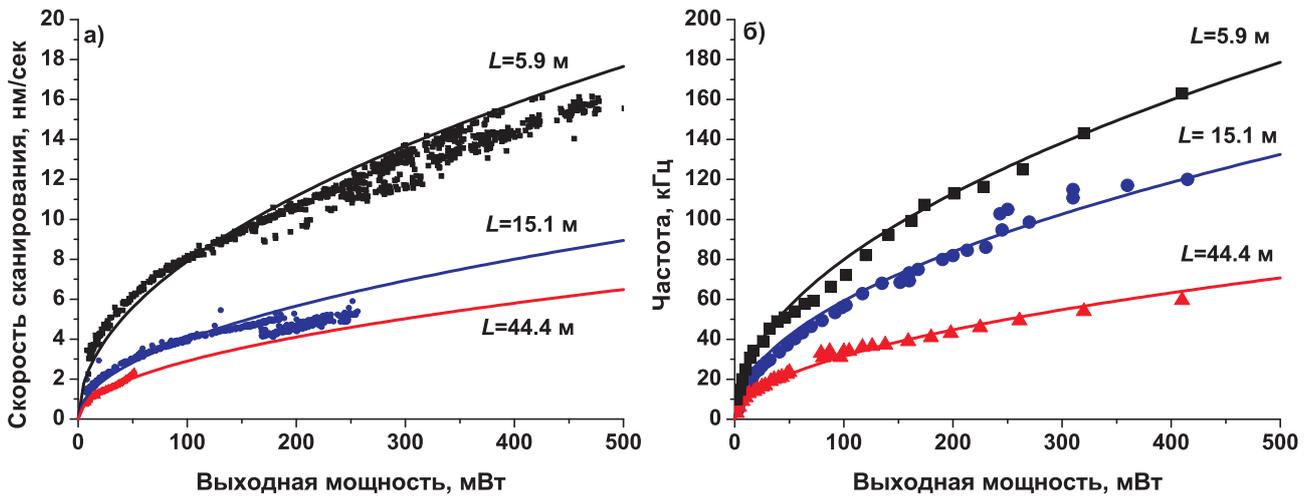


Рис. 4. Зависимость скорости самосканирования (а) и частоты самопульсаций (б) от выходной мощности при различных длинах резонатора  $L$ . Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошные линии – корневой аппроксимации.

среды. Надо отметить, что скачок частоты не зависит от полной длины резонатора. В эксперименте получено, что для резонаторов с длинами от 6 до 44 м сдвиг частоты лежит в диапазоне от 18 до 26 МГц, что очень близко к теоретической оценке  $\delta\nu = 29$  МГц.

Четвертый раздел главы посвящён изучению лазера на основе иттербиевого четырехсердцевинного волоконного световода (4ВС) с двойной оболочкой и одномодовой ВБР [А4, А5]. Принципиальное отличие 4ВС от 2ВС состояло в большом расстоянии между сердцевинами, что приводило к большой длине связи  $\sim 4$  км. Это означает, что связь между модами сердцевин на длине световода 6 м практически отсутствует. Резонатор образовывался прямым сколом торца световода и одномодовой ВБР, приставленной к одной из сердцевин. Таким образом, обратная связь была реализована только для одной из сердцевин, где находилась ВБР. Несмотря на слабую связь мод сердцевин, лазерная генерация происходила во всех сердцевинах на длине волны ВБР. При этом значительная часть лазерной мощности  $>60\%$  была в других трех сердцевинах.

Эти результаты указывают на значительный обмен энергией между модами сердцевин в таком лазере. В работе [9] было показано, что может существовать эффективный обмен энергии между слабо связанными модами через посредника. Для 4ВС была найдена мода, которая может служить по-

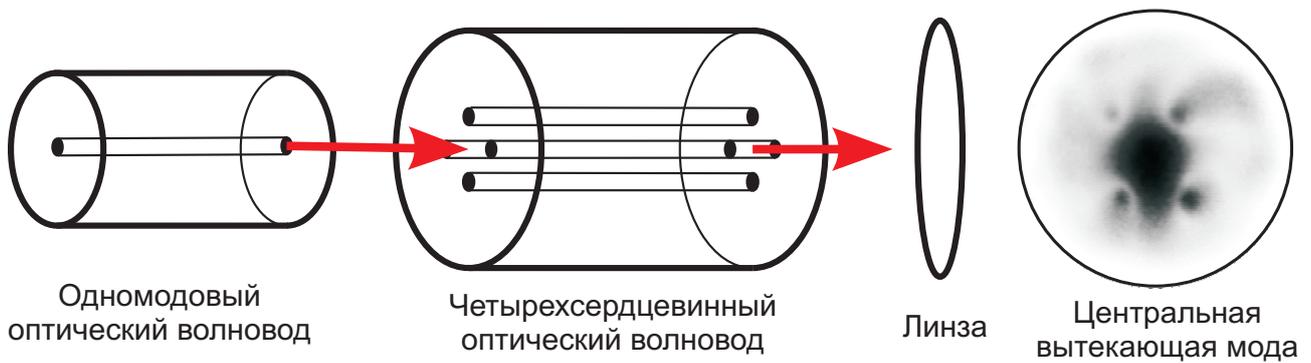


Рис. 5. Схема для возбуждения центральной моды. Справа — фотография центральной моды на выходе из 4ВС.

средником между модами сердцевин. Оказалось, что если заводить пробное излучение между сердцевинами, то на выходе наблюдается локализация мощности в виде четырехконечной звезды (рис. 5). Это свидетельствует о возбуждении вытекающей центральной моды волокна. При этом мода может иметь существенную связь с модами сердцевин. Кроме того, было изучено влияние кривизны на проходящую мощность центральной моды и мод сердцевин. Для описания механизма представлена аналитическая модель, учитывающая центральную моду-посредник.

Выводы по изучению лазерной генерации в МВС приводятся в пятом разделе. В ходе экспериментов оказалось, что некоторые особенности лазерного излучения, которые наблюдались в диссертационной работе и ранее в работах других авторов, не связаны с многосердцевинной структурой световода. Узкий и нестабильный спектр, который ранее наблюдался в [4], может быть связан с эффектом ССЧ. К сожалению, на сегодняшний день для реализации лазеров на основе МВС практически отсутствуют компоненты (например, отражатели) с малыми потерями. Используются стандартные компоненты, которые имеют большие потери при согласовании с МВС. Это приводит к значительному снижению добротности таких лазеров, а значит к появлению припороговых эффектов, таких как ССЧ. Экспериментальная демонстрация обмена энергией между слабосвязанными модами через моду-посредника позволяет надеяться на новые виды волоконных лазеров. Например, в [10] показана существенная роль моды-посредника в фазовой синхронизации мод.

**Заключение** содержит формулировку результатов данной работы.

## Основные результаты

1. Предложена и реализована новая методика для изучения многосердцевинных волоконных световодов — измерение продольного распределения мощности в сердцевинах по боковому свечению сердцевин.
2. Экспериментально установлено, что зависимость степени связи в 2ВС от радиуса кривизны носит резонансный характер. Эффективная связь достигается только тогда, когда существующая технологическая разность констант распространения мод компенсируется за счет изменения показателя преломления при искривлении световода.
3. Экспериментально продемонстрировано влияние поляризации распространяющегося излучения на связь мод в 2ВС. На основании экспериментальных данных предложена модифицированная теоретическая модель связи мод в двухсердцевинном волоконном световоде с учетом поляризации излучения и двулучепреломления сердцевин. Поляризационные свойства 2ВС были применены для синхронизации мод волоконного лазера с амплитудной модуляцией, основанной на нелинейном вращении поляризации. Получены импульсы с длительностью  $\sim 50$  пс и энергией  $\sim 3$  нДж.
4. Обнаружено, что генерация в лазере на основе 4ВС происходит во всех сердцевинах несмотря на то, что обратная связь реализуется только для одной сердцевины, а прямая связь между сердцевинами отсутствует. Обнаружено, что в центральной области оболочки, расположенной между сердцевинами, может распространяться вытекающая мода, которая служит посредником при обмене энергией между модами сердцевин. Предложено аналитическое описание непрямого механизма связи мод сердцевин через центральную моду.
5. Экспериментально обнаружен новый эффект в волоконном лазере — самоиндуцированное узкополосное сканирование частоты, который проявляется как в многосердцевинном, так и обычном одномодовом волоконном лазере. Показано, что эффект самосканирования связан с эффектом самопульсаций. Измеренная мгновенная ширина лазерной линии составила  $\sim 100$  МГц. Предложена модель движения лазерной ли-

нии, основанная на пространственном выжигании дыр и деформации контура усиления активной среды. Продемонстрировано количественное согласие между теоретической оценкой для сдвига частоты между импульсами с экспериментальными данными. Получена рекордная перестройка длины волны 16 нм в режиме самосканирования.

## Список работ, опубликованных по теме диссертации

- [A1] Lobach I. A., Babin S. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V. and Kurkov A. S. Field distribution and mode interaction in twin-core fiber // *Laser Phys.* — 2010. — Vol. 20, no. 2. — Pp. 1–7.
- [A2] Лобач И. А., Каблуков С. И., Подивилов Е. В., Бабин С. А., Аполонский А. А. Поляризационные эффекты в двухсердцевинном волокне и их применение для синхронизации мод в волоконном лазере // *Квант. электроника.* — 2012. — Т. 42, № 9, — С. 785–790.
- [A3] Lobach I. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V., Babin S. A. Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser // *Opt. Exp.* — 2011. — Vol. 19, no. 18. — Pp. 17632-17640.
- [A4] Лобач И. А., Каблуков С. И. Селекция частоты в лазере на основе четырехсердцевинного иттербиевого оптического волокна // *Вестник НГУ* — 2007. — Т. 2, № 3., — С. 41–44.
- [A5] Kurkov A. S., Babin S. A., Lobach I. A., and Kablukov S. I. Mechanism of mode coupling in multicore fiber lasers // *Opt. Lett.* — 2008. — Vol. 33, no. 1. — Pp. 61–63.

## Список цитируемых работ

- [1] Poulin A. C. J. and Vallee R. Optical bandpass filter from a curved segment of a detuned two-core fiber // *Appl. Opt.* — 1997. — Vol. 36, no. 21. — Pp. 5064–5071.

- [2] Friberg S. R., Silberberg Y., Oliver M. K., Andrejco M. J., Saifi M. A., and Smith P. W. Ultrafast all-optical switching in a dual-core fiber nonlinear coupler // *Appl. Phys. Lett.* — 1987. — Vol. 51, no. 15. — Pp. 1135–1137.
- [3] Meltz G. and Dunphy J. R. Twin-core fiber-optics strain and temperature sensor // *Conf. on Optical Fiber Communication and Third International Conf. on Optical Fiber Sensors (OFC/OFS 1985)*, 1 January 1985, San Diego, California, USA, Optical Society of America, 1985. — Paper ThFF6.
- [4] Kurkov A. S., Paramonov V. M., Dianov E. M., Isaev V. A., and Ivanov G. A. Fiber laser based on 4-core Yb-doped fiber and multimode Bragg grating // *Las. Phys. Lett.* — 2006. — Vol. 3, no. 9. — Pp. 441–444.
- [5] Winful H. G. and Walton D. T. Passive mode locking through nonlinear coupling in a dual-core fiber laser // *Opt. Lett.* — 1992. — Vol. 17, no. 23. — Pp. 1688–1690.
- [6] Li L., Schulzgen A., Chen S., Temyanko V. L., Moloney J. V., and Peyghambarian N. Phase locking and in-phase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers // *Opt. Lett.* — 2006. — Vol. 31, no. 17. — Pp. 2577–2579.
- [7] Agrawal G. P. *Applications of Nonlinear Fiber Optics* — Academic press, 2001.
- [8] Фолин К. Г., Гайнер А. В. *Динамика свободной генерации твердотельных лазеров* — Новосибирск, Наука, 1979.
- [9] Tsukada N., Tsujinishi R., Nagano M., and Tomishima K. Effects of interference on couplings in three optical waveguides // *J. Appl. Phys.* — 1980. — Vol. 51, no. 5. — Pp. 2450–2454.
- [10] Мельников Л. А., Мажирина Ю. А. Фазовая связь мод в волоконном лазере с несколькими активными одномодовыми сердцевинами, осуществляющаяся через возбуждение мод оболочки // III Российский семинар по волоконным лазерам, 31 марта — 2 апреля 2009г., г. Уфа, С. 37–38.

Подписано в печать 07.11.2012 г. Печать цифровая.  
Бумага офсетная. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ № 120.

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»  
ИП Малыгин Алексей Михайлович  
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф.104  
Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07