

На правах рукописи

Власов Александр Анатольевич

Волоконные брэгговские решётки для применений в перестраиваемых  
волоконных лазерах

01.04.05 "Оптика"

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2009

Работа выполнена в Институте автоматики и электрометрии Сибирского  
отделения Российской академии наук

Научный руководитель                      доктор физико-математических наук  
Бабин Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты:                доктор физико-математических наук  
Плеханов Александр Иванович

кандидат физико-математических наук  
Латкин Антон Иванович

Ведущая организация                      Институт лазерной физики  
Сибирского отделения  
Российской академии наук

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.005.01 при Институте автоматики и  
электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и  
электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009.

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

Насыров К.А.

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Одним из основных направлений развития волоконной оптики в настоящее время является создание волоконных лазеров, генерирующих в новых спектральных диапазонах. Волоконные лазеры обладают уникальным набором рабочих характеристик и высокими эксплуатационными качествами. В исследовательской практике получена генерация в ближней инфракрасной области спектра на большом количестве активных сред, реализованных легированием волоконных световодов редкоземельными элементами. Наибольшее распространение получили неодимовые, иттербиевые, эрбиевые волоконные лазеры [1]. Значительный интерес вызывают лазеры, генерация которых происходит посредством вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волокне. Вследствие аморфности стекла волоконных световодов спектр ВКР-усиления широкий и поэтому возможна генерация такого лазера на любой длине волны в диапазоне от 1 до 2 микрон [2]. Применение фосфосиликатных волоконных световодов представляет особый интерес, так как они обладают большой величиной стоксова сдвига, составляющей  $\sim 1300 \text{ см}^{-1}$  [3].

Существенный прорыв в создании волоконных лазеров был достигнут благодаря применению волоконных брэгговских решёток (ВБР) в качестве элемента, селективирующего длину волны излучения [4,5]. ВБР представляет собой участок волоконного световода, в волноводной сердцевине которого создано периодическое изменение показателя преломления. ВБР характеризуются резонансным спектром отражения с относительной шириной  $\sim 10^{-4}$  на брэгговской длине волны  $\lambda = 2\Lambda n$ , где  $\Lambda$  - период модуляции,  $n$  - среднее значение показателя преломления. Формирование таких структур осуществляется голографическими методами вследствие фоточувствительности сердцевины волоконного световода к ультрафиолетовому излучению [6]. Применение ВБР и волоконных устройств ввода оптической накачки позволило реализовать полностью волоконные схемы лазеров.

Применение ВБР в качестве фильтров и компенсаторов дисперсии в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов с необходимостью приводит к высоким требованиям к форме спектра отражения ВБР, что достигается посредством аподизации - реализации специального профиля наведённого показателя преломления с результирующим влиянием на форму спектра ВБР.

Дальнейшее развитие применения ВБР в системах связи привело к созданию перестраиваемых фильтров на основе перестраиваемых ВБР.

Создание перестраиваемой ВБР возможно вследствие чувствительности резонансной длины волны ВБР к механическим и температурным воздействиям, оказываемым на волоконный световод. В частности, аксиальное растяжение/сжатие волоконного световода приводит к изменению резонансной длины волны ВБР  $\Delta\lambda = \lambda(1 - p_e)\varepsilon$ , где  $p_e$  -коэффициент фотоупругости,  $\varepsilon$  -относительное удлинение. Наибольший диапазон перестройки 110 нм в области 1,5 микрон достигнут применением метода изгибного сжатия [7].

Таким образом, с очевидностью назрела необходимость интеграции и развития полученных результатов с целью создания перестраиваемых в широком диапазоне полностью волоконных лазеров с контролем спектра излучения, определяемого спектром отражения ВБР.

На момент начала данной работы опубликованы исследования о применении перестраиваемых ВБР в качестве селективного элемента эрбиевого волоконного лазера с линейным резонатором с диапазоном перестройки 35 нм (1532-1567 нм) при мощности ~40 Вт [8]. Для неодимового лазера достигнут диапазон перестройки 15 нм (911-926 нм) при выходной мощности до 0,8 Вт [9]. В работе [10] продемонстрировано применение перестраиваемой ВБР в качестве селективного элемента ВКР-лазера с областью перестройки 15 нм (1543-1558 нм). Отдельно изучался вопрос о влиянии формы спектра и температуры ВБР на спектр излучения ВКР-лазеров с большим уширением линии генерации [11].

Чувствительность резонансной длины волны ВБР к механическим и температурным воздействиям на волоконный световод определяет их применение в сенсорных системах. В настоящее время внедрение сенсоров на основе ВБР ограничено относительно высокой стоимостью измерительной аппаратуры, такой как оптические спектроанализаторы. Поэтому представляет интерес поиск оптимального для данной задачи способа опроса ВБР-сенсоров, в т.ч. с использованием перестраиваемых волоконных лазеров.

Основная цель работы формулируется следующим образом: разработка ВБР со специальными характеристиками для реализации лазеров с большим диапазоном перестройки и узкой линией генерации.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи:

1. Разработать технологию записи ВБР со специальными свойствами.
2. Разработать методы перестройки ВБР для их интегрирования в волоконный лазер в полностью волоконной схеме.

3. Исследовать изменение спектральных характеристик ВБР в процессе перестройки.
4. Применить перестраиваемые ВБР для перестройки частоты различных типов волоконных лазеров: иттербиевого, эрбиевого и ВКР-лазера.
5. Реализовать и исследовать характеристики ВБР со сдвигом фазы, обеспечивающих селекцию одной продольной моды в схеме лазера с распределённой обратной связью (РОС-лазера).
6. Исследовать возможности применения перестраиваемых и специальных ВБР в сенсорных системах.

### Научная новизна работы

В диссертации представлен комплексный подход к реализации перестраиваемых волоконных лазеров ближнего инфракрасного диапазона, основанный на применении перестраиваемых ВБР. Для формирования спектра ВБР, формирующих резонатор волоконных лазеров предложен простой способ аподизации. Для реализации перестраиваемых волоконных лазеров предложен метод синхронной перестройки резонансных длин волн нескольких ВБР, сводящий число элементов управления перестройкой до одного. Созданы перестраиваемые в широких пределах полностью волоконные лазеры. Обоснованы выбор фосфосиликатного волоконного световода и применение метода синхронной перестройки для перестраиваемых ВКР-лазеров.

### Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы определяется возможностями практических применений перестраиваемых и одночастотных волоконных лазеров ближней инфракрасной области спектра. Удвоением частоты излучения достигается создание перестраиваемых лазеров в видимом диапазоне [12], предлагая альтернативу существующим перестраиваемым лазерам. Использование результатов работы позволяет реализовать оптоволоконные сенсорные системы для измерения механических и тепловых воздействий.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Дополнительная засветка гомогенным гауссовым ультрафиолетовым пучком справа и слева от плотной ВБР, записанной промодулированным гауссовым ультрафиолетовым пучком, приводит к устранению боковых резонансов в коротковолновой части спектра отражения ВБР.

2. Метод изгибного сжатия ВБР применим для перестройки длины волны излучения лазеров на основе легированных волокон в широком диапазоне ( $>45$  нм), при этом возможна синхронная перестройка плотной и выходной ВБР, образующих резонатор лазера.
3. Синхронная перестройка ВБР лазера накачки и ВБР, образующих резонатор ВКР-лазера, позволяет получить плавную перестройку ВКР-лазера на основе фосфосиликатного волокна в широком диапазоне ( $>50$  нм).
4. Контроль спектра отражения с помощью перестраиваемого одночастотного лазера позволяет записать длинную ВБР со сдвигом фазы в активном иттербиевом волокне с заданными параметрами и получить одночастотную лазерную генерацию в схеме волоконного иттербиевого РОС-лазера в области 1,1 мкм.
5. Сканирование длины волны волоконного эрбиевого лазера с помощью перестраиваемой ВБР позволяет осуществить опрос ВБР-датчиков со спектральным мультиплексированием измерительных каналов, а реализация спектра ВБР-датчиков в соответствии с формой спектра зондирующего импульса рефлектометра – применить рефлектометрический метод опроса ВБР-датчиков с возможностью их временного мультиплексирования.

### Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично. Принимал активное участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке статей. Из печатных работ, опубликованных диссертантом в соавторстве, в диссертацию вошли только те результаты, в получении которых он принял непосредственное участие на всех этапах: от постановки задач и теоретического анализа до проведения экспериментов.

### Апробация работы

Результаты были доложены на 11-й и 12-й Международных конференциях Laser Optics (Санкт-Петербург, 2003, 2006), Международной конференции Lasers, Applications, and Technologies 2005 (Санкт-Петербург, 2005), I и II Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, 2007; Саратов, 2008), Международной конференции APCOM 2007 (Владивосток, 2007), симпозиуме «Нанофотоника 2007» (Черноголовка,

2007). Результаты также докладывались на семинарах Института автоматики и электрометрии СО РАН.

### Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав с изложением материала диссертации и заключения, в котором перечислены основные результаты. Общий объём диссертации составляет 101 страницу и включает 37 рисунков и список литературы из 112 наименований.

### **Содержание работы**

Во введении описано состояние области исследований на момент проведения работы, проанализированы имеющиеся к настоящему времени результаты. Обсуждается актуальность темы диссертации и сформулированы цели диссертационной работы. Приведено краткое содержание работы и защищаемые положения.

В первой главе представлено описание технического и технологического инструментария, применяемого в данной работе. В параграфе 1 подробно описан источник ультрафиолетового излучения. Отмечены параметры излучения, определяющие процесс записи ВБР. Описаны процессы, определяющие эффективность внутрирезонаторного удвоения частоты излучения аргонового лазера. В оригинальной части работы показано, что увеличение апертуры газоразрядной трубки приводит к увеличению эффективности генерации второй гармоники. В параграфе 2 описаны реализованные в работе экспериментальные схемы записи с применением фазовой маски, интерферометров Ллойда и Тальбота и отмечены их возможности для получения требуемых характеристик ВБР. В параграфе 3 описан метод изгибного сжатия, примененный для создания перестраиваемых ВБР. Предложен оригинальный способ синхронной перестройки ВБР, формирующих резонатор волоконного лазера, позволяющий упростить использование ВБР в качестве перестраиваемого элемента волоконного лазера, селективирующего длину волны генерации.

Во второй главе рассмотрены особенности записи ВБР пучком ультрафиолетового излучения с гауссовым профилем распределения интенсивности. В параграфе 4 рассмотрены общие принципы реализации и измерения спектральных характеристик ВБР. В параграфе 5 продемонстрировано, что гауссов профиль интерферирующих пучков естественным образом приводит к подавлению величины боковых резонансов при небольших коэффициентах отражения, но при больших коэффициентах проявляются резонансы в коротковолновой области спектра, связанные с

изменением среднего значения показателя преломления вдоль ВБР. Далее предложен и описан простой способ выравнивания среднего показателя преломления вдоль ВБР посредством дополнительной засветки гомогенным гауссовым пучком, приводящей к устранению боковых резонансов плотных решёток (см. рис.1).

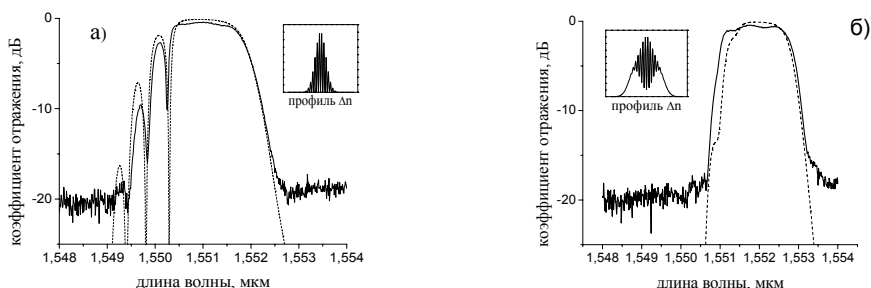


Рисунок 1. Спектр решётки (а) до и (б) после амплитудной засветки и результаты численного моделирования формы спектра ВБР. На вставках схематичное изображение профиля наведённого показателя преломления.

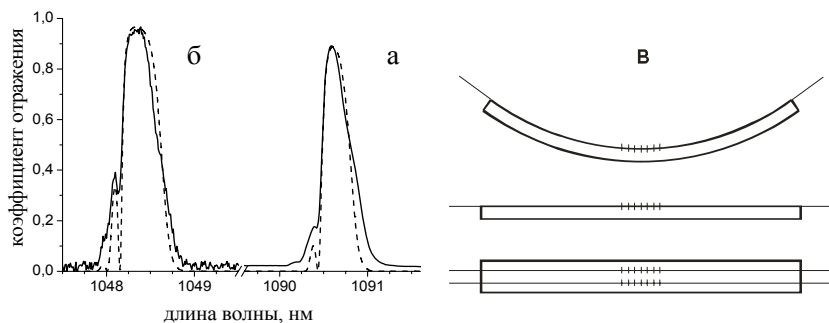


Рисунок 2. Изменение спектра отражения перестраиваемой ВБР при сжатии от (а) свободного состояния ( $\epsilon \approx -0.002$ ) до (б) сильного сжатия ( $\epsilon \approx -0.05$ ). Непрерывная линия – эксперимент, пунктирная линия – численное моделирование с величиной наведённого показателя преломления (а)  $\Delta n = 0.5 \cdot 10^{-3}$  и (б)  $\Delta n = 0.72 \cdot 10^{-3}$ . (в) Схематическое изображения способа изгибного сжатия и синхронной перестройки резонансных длин волн двух ВБР.

В параграфе 6 описаны эффекты, ограничивающие применение перестраиваемых ВБР в волоконных лазерах, в том числе вследствие изменения их спектральных характеристик при сжатии. Продемонстрирован



новый эффект, приводящий к изменению спектральных характеристик ВБР в процессе перестройки её резонансной длины волны в широких пределах посредством изгибного сжатия волоконного световода. Показано, что в результате создания значительных механических напряжений в волоконном световоде, заклеенном на пластине, происходит обратимое изменение амплитуды модуляции наведённого показателя преломления, что приводит к росту коэффициента отражения и соответствующему изменению спектральных характеристик ВБР при сжатии (см. рис. 2).

В третьей главе продемонстрировано применение перестраиваемых ВБР при создании перестраиваемых волоконных лазеров. В параграфе 7 продемонстрирован иттербиевый волоконный лазер с перестраиваемой ВБР в качестве селектора длины волны излучения. Достигнут диапазон перестройки более 45 нм. Показано, что при однородном характере насыщения и большом превышении усиления над потерями достигается постоянство выходной мощности иттербиевого лазера при перестройке длины волны генерации в большом спектральном диапазоне (см. рис. 3а). В параграфе 8 исследована схема полностью волоконного перестраиваемого иттербиевого лазера. Реализован способ синхронной перестройки резонансных длин ВБР, формирующих резонатор лазера (см. рис. 2в). Проанализированы преимущества и ограничения подобного способа перестройки. В параграфе 9 описаны эксперименты по получению перестраиваемой генерации ВКР-лазера в полностью волоконной схеме. Объяснено уменьшение выходной мощности лазера при сильном сжатии, обусловленное рассогласованием резонансных длин волн ВБР (см. рис. 3б).

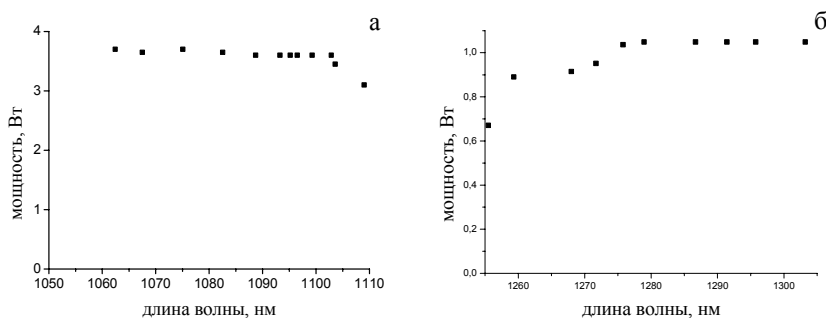


Рисунок 3. Зависимость выходной мощности (а) иттербиевого и (б) полностью волоконного фосфосиликатного ВКР-лазера при перестройке длины волны генерации.

Показано, что применение фосфосиликатного волоконного световода имеет принципиальное преимущество перед германосиликатным. А именно, несмотря на необходимость синхронной перестройки ВБР лазера накачки

уменьшение ступеней ВКР-преобразования упрощает схему перестраиваемого волоконного ВКР-лазера (уменьшение числа перестраиваемых элементов). Показано, что применение предложенного метода синхронной перестройки сводит число управляющих элементов до одного.

В четвёртой главе продемонстрировано применение специальных ВБР для реализации одночастотных волоконных лазеров с распределённой обратной связью (РОС) и распределённых сенсорных систем. В параграфе 10 описана методика записи длинных ВБР со сдвигом фазы в активном волокне с контролем спектра с помощью пробного одночастотного перестраиваемого лазера (см. рис. 4) и измерены характеристики реализованного РОС-лазера с генерацией вблизи центрального провала в спектре (около 1093,1 нм). В параграфе 11 рассмотрены практические задачи применения ВБР в сенсорных системах. Описан эрбиевый лазер с перестраиваемой ВБР, являющийся основным элементом интеррогатора сенсорной системы из линейки ВБР со спектральным разделением каналов. Продемонстрировано, что использование ВБР со специальными спектральными характеристиками позволяет реализовать рефлектометрический способ опроса сенсоров на основе ВБР с временным разделением каналов с использованием стандартного рефлектометра AQ7260.

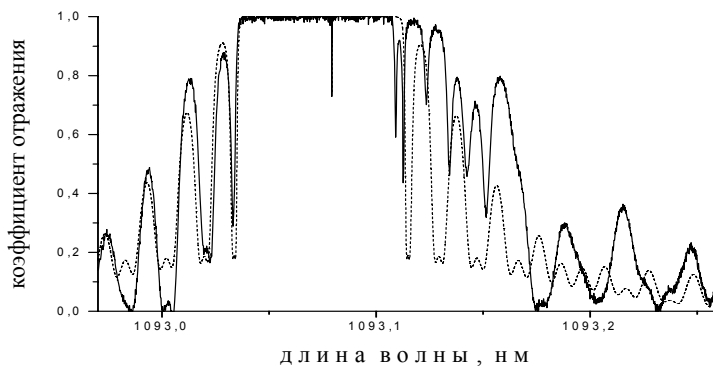


Рисунок 4. Спектр ВБР РОС-лазера, прописанный перестраиваемым поляризованным одночастотным лазером. Сплошная кривая - экспериментальный спектр. Прерывистая кривая - теоретическая аппроксимация для ВБР длиной 3,833 см, положением фазового сдвига на  $\pi+0,3$  в 2 см от края, величиной наведённого показателя преломления  $\Delta n=12,4 \cdot 10^{-5}$ .

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

## Основные результаты

1. Предложен и реализован простой метод гауссовой аподизации спектра ВБР. Пост-засветкой гомогенным гауссовым пучком на расстоянии порядка его радиуса справа и слева от центра ВБР, записанной в световоде промодулированным гауссовым пучком того же радиуса, достигается выравнивание среднего значения наведённого показателя преломления вдоль ВБР, что приводит к подавлению интерференционных эффектов в спектре ВБР.
2. Предложен и реализован метод синхронной перестройки ВБР, формирующих резонатор волоконного лазера, достигающейся заклеиванием ВБР на одной пластине с последующим их аксиальным сжатием за счёт изгиба пластины. Достигнута синхронная перестройка резонансных длин волн ВБР на  $\sim 3\%$ , при дальнейшем сжатии происходит заметное рассогласование резонансных длин волн, сравнимое по величине с шириной спектра отражения ВБР.
3. Экспериментально установлен факт увеличения коэффициента отражения ВБР в процессе перестройки методом изгибного сжатия. Показано, что эффект обусловлен увеличением амплитуды модуляции наведённого показателя преломления на  $\sim 50\%$  при относительном сжатии волоконного световода  $\varepsilon \sim 5\%$ .
4. Применение перестраиваемой ВБР в качестве селектора длины волны позволило получить диапазон перестройки более 45 нм длины волны генерации иттербиевого волоконного лазера. Реализованы полностью волоконные схемы перестраиваемых волоконных лазеров с диапазоном перестройки длины волны генерации 40 нм (1065-1105 нм) для иттербиевого лазера, 51 нм (1252-1303 нм) для фосфосиликатного ВКР-лазера, 55 нм (1525-1580 нм) для эрбиевого лазера.
5. При контроле спектра отражения с помощью пробного перестраиваемого лазера в активном иттербиевом волокне записана длинная ( $\sim 4$  см) ВБР со сдвигом фазы с параметрами, позволяющими получить одночастотную лазерную генерацию в области  $\sim 1,1$  мкм в схеме волоконного иттербиевого РОС-лазера.
6. Перестраиваемая ВБР применена для сканирования длины волны генерации волоконного эрбиевого лазера с шагом 4 пм в диапазоне 45 нм, который используется для опроса ВБР-датчиков со спектральным мультиплексированием измерительных каналов.

Реализованы ВБР-датчики с оптимальной формой спектра (коэффициент отражения  $\sim 2\%$  при ширине  $\sim 1$  нм), позволяющей применить рефлектометрический метод опроса с возможностью временного мультиплексирования до  $\sim 30$  датчиков.

## **Основные результаты опубликованы в работах**

1. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И. Внутррезонаторное удвоение частоты генерации в широкоапертурном аргоновом лазере // Квант. электроника, 2005, т. 35, № 9, с. 857-861.
2. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И. Особенности записи волоконных брэгговских решёток гауссовым пучком // Квант. электроника, 2006, т. 36, № 10, с. 966-970.
3. Babin S.A., Kablukov S.I., Vlasov A.A. Tunable fiber Bragg gratings for application in tunable fiber lasers // Laser Physics, 2007, vol. 17, N 11, p. 1323–1326.
4. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И., Курков А.С., Шелемба И.С. Полностью волоконный иттербиевый лазер, перестраиваемый в диапазоне 45 нм // Квант. электроника, 2007, т. 37, № 12, с. 1146-1148.
5. Babin S.A., Churkin D.V., Kablukov S.I., Rybakov M.A., Vlasov A.A. All-fiber widely tunable Raman fiber laser with controlled output spectrum // Opt. Express, 2007, vol. 15, N 13, p. 8438-8443.
6. Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser // Laser Physics, 2007, vol. 17, N 11, p. 1340-1344.
7. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Shalagin A.M., Babin S.A., Vlasov A.A. Application of optical time-domain reflectometry for the interrogation of fiber Bragg sensors // Laser Physics, 2007, vol. 17, N 11, p. 1335–1339.
8. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин А.М., Бабин С.А., Власов А.А. Рефлектометрический метод опроса и мультиплекси-рования датчиков на волоконных брэгговских решетках // Автометрия, 2008, т. 44, № 2, с. 113-118.
9. Babin S.A., Kablukov S.I., Vlasov A.A. Frequency doubling in the enhancement cavity with single focusing mirror // Proc. SPIE, 2004,

- v.5478: Laser Optics 2003: Solid State Lasers and Nonlinear Frequency Conversion, ed.V.I.Ustugov, p. 165-172.
10. Abdullina S.R., Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I. Frequency doubling in a large-bore argon laser // Proc. SPIE, 2006, v.6054: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2005: Advanced Lasers and Systems; Eds. G. Huber, V.Y. Panchenko, I.A. Scherbakov; p. 605402 (1-8).
  11. Abdullina S.R., Babin S.A., Kablukov S.I., Vlasov A.A. Simple technique of fiber Bragg gratings apodization by use of gaussian beam // SPIE Proc., 2007, vol. 6612, Laser Optics 2006: Diode Lasers and Telecommunication Systems, ed. Nikolay N. Rosanov, p. 661201 (1-10).
  12. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Каблуков С.И., Власов А.А., Рыбаков М.А. Перестраиваемые волоконные брэгговские решётки // Труды Российского семинара по волоконным лазерам 2007 (Новосибирск, 4-6 апреля 2007), с. 21-22.
  13. Кульчин Ю. Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин А.М., Бабин С.А., Власов А.А. Метод декодирования сигналов волоконных брэгговских решеток на основе оптической временной рефлектометрии. Труды Российского семинара по волоконным лазерам 2007 (Новосибирск, 4-6 апреля 2007), с. 76-77.

## Список цитированной литературы

1. Буфетов И.А. и др. Волоконные Yb-, Er-Yb- и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой // Квантовая электроника, 2005, т. 35, № 4, с. 328-334.
2. Dianov E.M. et al. Raman fiber lasers emitting at a wavelength above 2 $\mu$ m // Quant. Electr., 2004, vol. 34, p. 695-697.
3. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A. et al., CW high power 1.24  $\mu$ m and 1.48  $\mu$ m Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre // El. Lett. 1997, vol. 33, N 18, p. 1542-1544.
4. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. Academic Press, 1999.
5. Васильев С.А. и др. Волоконные решётки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника, 2005, т. 35, № 12, с. 1085-1103.

6. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Opt. Lett.*, 1989, vol. 14, p. 823-825.
7. Mokhtar M. R., Goh C. S., Butler S. A., Set S. Y., Kikuchi K., Richardson D. J., Ibsen M. Fiber Bragg grating compression-tuned over 110 nm // *Electron. Lett.*, 2003, vol. 39, N 6, p. 509-510.
8. Yoonchan J. et al. A 43-W C-band tunable narrow-linewidth Erbium-Ytterbium codoped large-core fiber laser // *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, vol. 16, N 3, p. 756-758.
9. Fu L. B. et al. Compact high-power tunable three-level operation of double cladding Nd-doped fiber laser // *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, N 2, p. 306-308.
10. Han Y.-G. et al. Flexibly tunable multiwavelength Raman fiber laser based on symmetrical bending method // *Opt. Express*, 2005, vol. 13, N 7, p. 6330-6335.
11. Бабин С.А. и др. Влияние локального изменения температуры на спектральные характеристики волоконного ВКР-лазера // *Квантовая электроника*, 2003, т. 33, № 12, с.1096-1100.
12. Akulov V.A. et al. Frequency tuning and doubling in Yb-doped fiber lasers // *Laser Physics*, 2007, vol. 17, N 2, p. 124-129.

Подписано в печать «2» ноября 2009 г.  
Формат бумаги 60x84 1/16. Объём 0,9 печ.л.  
Тираж 100 экз. Заказ №

---

Типография Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 5.