

На правах рукописи

Никулин Максим Александрович

**Исследование иттербиевых волоконных лазеров
с распределенной обратной связью**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2010

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

Научный руководитель доктор физико-математических наук
 Подивилов Евгений Вадимович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
 профессор Шапиро Давид Абрамович

 доктор физико-математических наук
 Скворцов Михаил Николаевич

Ведущая организация Учреждение Российской
 академии наук Научный центр
 волоконной оптики РАН

Защита состоится «__» _____ 2010 г. в __ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.005.01 при Институте автоматики
и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, проспект Ака-
демика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО
РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Насыров К.А.

Общая характеристика работы

Актуальность

Волоконные лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) — это компактные и стабильные источники одночастотного излучения ближнего инфракрасного диапазона. Их особенностью является совмещение активной среды — сердцевины оптического волокна и распределенных отражателей, формируемых волоконной брэгговской решеткой (ВБР) с фазовым сдвигом для выделения одной продольной моды резонатора. Разработаны они относительно недавно: в 1994 году были продемонстрированы эрбий-иттербиевые волоконные РОС-лазеры [1], а в следующем году были опубликованы работы, посвященные иттербиевым [2] и эрбиевым [3, 4] волоконным РОС-лазерам. Позднее, в 2004 году, появились тулиевые волоконные РОС-лазеры [5]. Эрбиевые и эрбий-иттербиевые волоконные РОС-лазеры привлекли наибольшее внимание исследователей, поскольку они излучают в области максимальной прозрачности оптического волокна 1,55 мкм. Это позволяет использовать их, например, в различных волоконных датчиках [6]. Изучению иттербиевых волоконных РОС-лазеров посвящено небольшое число публикаций, однако они успешно применялись в некоторых научных экспериментах: в спектроскопии молекул йода [7, 8], где потребовалась вторая гармоника иттербиевого волоконного РОС-лазера; при охлаждении ионов магния [9], где четвертая гармоника позволила получить излучение с длиной волны 280 нм, и других.

Численная модель иттербиевого волоконного РОС-лазера, которая корректно описывала наблюдавшуюся в эксперименте мощность генерации, была построена в 1996 году [10]. Параллельно одна из групп разрабатывала численную модель эрбиевого волоконного РОС-лазера [11], но сравнение с экспериментом не проводилось. Более сложная структура переходов в случае, когда волокно легировано смесью эрбия и иттербия, потребовала создания специальной численной модели [12]. Она позволила оптими-

зировать резонатор лазера и с помощью волоконной брэгговской решетки, имеющей специальный профиль, получить КПД более 25 %. Аналитическая теория эрбиевых волоконных РОС-лазеров была развита С. Фостером в 2004 году [13]. Она построена в предположении слабого поглощения волны накачки в резонаторе лазера, которое не выполняется для иттербиевых волоконных РОС-лазеров.

Для иттербиевых волоконных РОС-лазеров оставался открытым вопрос о влиянии тепловых эффектов в резонаторе на мощность и длину волны генерации. Поглощение излучения накачки приводит к неравномерному нагреву активного волокна вдоль резонатора лазера, что может изменять его добротность и ограничивать мощность генерации лазера.

Таким образом, существовала необходимость исследования влияния тепловых эффектов в резонаторе иттербиевых волоконных РОС-лазеров на мощность и частоту генерации, а также аналитического описания КПД таких лазеров и сравнения предсказаний теории с результатами эксперимента.

Цель работы

Целью данной работы было исследование особенностей иттербиевых волоконных лазеров с распределенной обратной связью и иттербиевых волоконно-оптических усилителей.

Задачи работы

В этой работе ставились задачи экспериментального изучения влияния тепловых эффектов, возникающих в результате поглощения излучения накачки, на выходные характеристики иттербиевых волоконных РОС-лазеров, а также дополнения численных моделей лазеров этого типа аналитической, учитывающей затухание волны накачки в резонаторе лазера и обеспечивающей точность расчета КПД порядка 10 %.

Научная новизна

Экспериментально продемонстрировано, что наблюдавшийся ранее в эрбий-иттербиевых волоконных РОС-лазерах [14] эффект теплового искажения волоконной брэгговской решетки, являющейся резонатором лазера, при недостаточном теплоотводе наблюдается и в иттербиевых волоконных РОС-лазерах. Влияние модуляции мощности излучения накачки на частоту генерации лазера ранее изучалось для эрбиевых и эрбий-иттербиевых волоконных РОС-лазеров [15, 16], в данной работе проведены измерения для иттербиевых лазеров данного типа.

Впервые получены аналитические соотношения для мощности генерации иттербиевого волоконного РОС-лазера и непоглотившейся в резонаторе мощности волны накачки. Показано, что рассчитанные с помощью этих уравнений величины согласуются в пределах погрешности с измеренными в эксперименте.

Практическая значимость

На основе иттербиевого волоконного РОС-лазера создан источник одночастотного излучения мощностью 1 Вт с длиной волны генерации 1093 нм. Он разработан для использования в исследованиях, которые ведутся в Институте лазерной физики СО РАН. Этот лазер предназначен для накачки параметрического генератора и получения излучения с длиной волны 3,28 мкм при спектроскопии переходов метана в этой области.

С помощью аналитической модели, приведенной в главе 3, может проводиться расчет и оптимизация характеристик иттербиевых волоконных РОС-лазеров при проектировании устройств на их основе.

Метод определения параметров волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом может применяться для характеристики резонаторов волоконных РОС-лазеров независимо от вида легирующих примесей (иттербий, эрбий, эрбий-иттербий, тулий).

Апробация работы

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались на следующих семинарах и конференциях: Российский семинар по волоконным лазерам (4–6 апреля 2007 г., Новосибирск); Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics ICONO/LAT (28 May – 1 June, 2007, Minsk, Belarus); II Российский семинар по волоконным лазерам, (1–4 апреля 2008 г., Саратов); 13th Int. Conf. “Laser Optics” (24–27 June 2008, St.Petersburg, Russia) и 17th Int. Laser Physics Workshop LPHYS, (30 June – 4 July 2008, Trondheim, Norway); а также на научных семинарах УНЦ «Квантовая оптика» в ИАиЭ СО РАН

Защищаемые положения

1) Нагрев активного оптического волокна в результате поглощения излучения накачки ограничивает мощность генерации иттербиевых волоконных лазеров с распределенной обратной связью.

2) Частотой генерации иттербиевого волоконного лазера с распределенной обратной связью можно управлять с помощью изменения мощности излучения накачки.

3) В волоконно-оптическом усилителе с большим коэффициентом усиления за один проход при мощности входного одночастотного излучения малой по сравнению с мощностью насыщения наблюдается процесс вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.

4) Вид профиля волоконной брэгговской решетки в области фазового сдвига незначительно влияет на выходную мощность волоконного лазера с распределенной обратной связью при заданных амплитуде и ширине резонанса в спектрах отражения и пропускания волоконной брэгговской решетки.

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором диссертации лично. Он активно участвовал во всех этапах исследований: от планирования экспериментов до обсуждения результатов, теоретического анализа и подготовки статей. Из опубликованных работ в диссертацию вошли только те результаты, вклад автора в которые является определяющим или значимым.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 5-ти опубликованных работах [А1-А5], список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Диссертация изложена на 95 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 221 ссылку.

Основное содержание работы

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

В первой главе сделан подробный обзор публикаций, посвященных волоконным РОС-лазерам. Сначала поясняется структура продольных мод резонаторов на основе распределенных отражателей — брэгговских решеток для двух типов лазеров: с рас-

пределенной обратной связью и с распределенными брэгговскими отражателями.

Далее описаны особенности волоконных РОС-лазеров на основе оптического волокна с различными легирующими примесями. В результате исследований, проводившихся в различных лабораториях, были разработаны лазеры со следующими характеристиками. Эрбиевые РОС-лазеры при мощности излучения менее 1 мВт и длине волны генерации в области 1,55 мкм могут служить чувствительными элементами волоконно-оптических датчиков. Добавка иттербия позволяет более эффективно использовать излучение накачки с длиной волны 976 нм и получить мощность генерации до нескольких десятков милливольт. В сочетании с эрбий-иттербиевыми волоконно-оптическими усилителями мощность одночастотного излучения может составлять почти 100 Вт. Тулиевые волоконные РОС-лазеры и усилители разрабатываются для лазерной локации в области 2 мкм. Сообщалось о тулиевом одночастотном лазере мощностью около 900 мВт, излучение которого было усилено до 100 Вт. В нескольких публикациях описаны иттербиевые волоконные РОС-лазеры, излучающие в области 0,98 и 1,03–1,12 мкм, их характерная мощность составляет десятки милливольт. Была продемонстрирована возможность усиления одночастотного излучения до полукиловатта.

Описана проблема получения поляризованного излучения: как правило, в волоконных РОС-лазерах генерация идет на двух ортогональных поляризационных модах. Характерный диапазон перестройки длины волны генерации лазеров 0,5 нм достигается изменением температуры резонатора. Для быстрой модуляции или стабилизации частоты генерации применяется растягивание резонатора лазера пьезокерамическим элементом. Эрбиевые и эрбий-иттербиевые лазеры применяются в различных датчиках, например гидрофонах. Во многих работах предлагалось использовать волоконные РОС-лазеры в волоконно-оптических линиях связи. Кроме того, в этой главе перечисляются другие типы одночастотных волоконных лазеров.

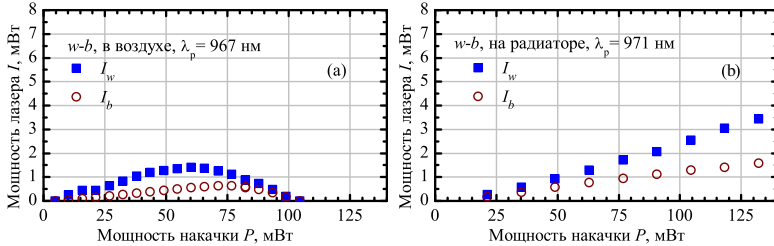


Рис. 1. Мощность генерации лазера в двух направлениях I_w и I_b в зависимости от мощности излучения накачки: (а) резонатор окружен воздухом, (б) волокно приклеено к радиатору

Обзор публикаций позволяет сделать вывод, что физика иттербиевых волоконных РОС-лазеров понятна не до конца. Требовало изучения влияние эффектов, связанных с заметным поглощением волны накачки в резонаторе, на выходные характеристики иттербиевых волоконных РОС-лазеров.

Вторая глава посвящена описанию источника одночастотного излучения мощностью 1 Вт на длине волны 1093 нм. Он состоит из задающего иттербиевого волоконного РОС-лазера, который обеспечивает малую ширину спектра генерации, и двух-каскадного полностью волоконного усилителя, который увеличивает мощность до необходимого уровня.

Показано, что в иттербиевых волоконных РОС-лазерах может наблюдаться уменьшение КПД лазера и даже его мощности при увеличении мощности волны накачки (рис. 1) [A1, A2]. Ранее этот эффект наблюдался в эрбий-иттербиевых волоконных РОС-лазерах [14]. Неравномерное нагревание волокна брэгговской решетки приводит к ее искажению и уменьшению добротности резонатора. Улучшение теплоотвода при закреплении волокна на радиаторе подавляет эффект.

Для вынужденного рассеяния Манделъштама—Бриллюэна

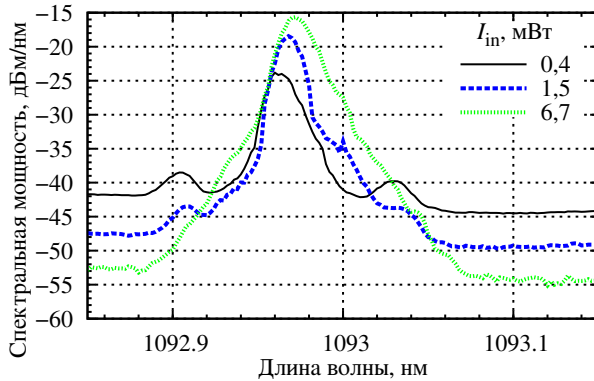


Рис. 2. Спектры излучения, направленного назад, на входе иттербиевого усилителя. Пьедестал — суперлюминесценция, главный пик — рэлеевское рассеяние и паразитное отражение, боковые пики — ВРМБ. При увеличении мощности входного сигнала пики ВРМБ пропадают

(ВРМБ) в волоконном усилителе показано, что рассеянная волна может подавляться при увеличении мощности входного сигнала (рис. 2) [А3]. Как правило, спонтанное излучение активных ионов не дает заметного вклада в формирование рассеянной волны, но оно является определяющим при большом коэффициенте усиления за проход и мощности входного сигнала малой по сравнению с мощностью насыщения. Правильное разбиение усилителя на каскады, разделенные оптическими изоляторами, позволяет подавить нежелательный процесс ВРМБ.

Увеличение мощности волны накачки волоконного РОС-лазера сопровождается ростом температуры волокна и изменением длины волны генерации лазера. В квазистатическом случае эффект ослабляется, если волокно с резонатором лазера помещено на радиатор. Для иттербиевого волоконного РОС-лазера измерен динамический отклик на изменение мощности накачки — получена зависимость амплитуды модуляции частоты генерации

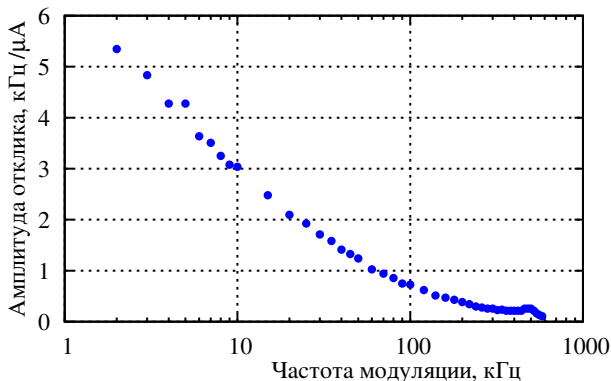


Рис. 3. Отклик частоты генерации лазера на модуляцию тока накачки ЛД. Наклон ватт-амперной характеристики ЛД составляет 0,55 Вт/А

лазера от частоты модулирующего сигнала (рис. 3) [A4]. Необходимо заметить, что этот эффект использовался для активной стабилизации частоты генерации РОС-лазера в совместной работе с ИЛФ и ИФП СО РАН, где была достигнута спектральная ширина линии генерации относительно эталона менее 1 кГц [A4].

В третьей главе сравниваются между собой КПД итербиевого волоконного РОС-лазера, измеренный в эксперименте и рассчитанный с помощью аналитической модели [A5].

В начале главы описано измерение параметров одномодового оптического волокна, легированного ионами иттербия и чувствительного к УФ-излучению. В эксперименте получены следующие значения, соответствующие длинам волн накачки $\lambda_p = 976$ нм и генерации $\lambda_l = 1093$ нм: коэффициент поглощения накачки при большой мощности излучения на длине волны генерации $g_p = 0,64$ см⁻¹, коэффициент ненасыщающегося поглощения накачки $\alpha_p^* = 0,028$ см⁻¹, отношение мощности насыщения на длине

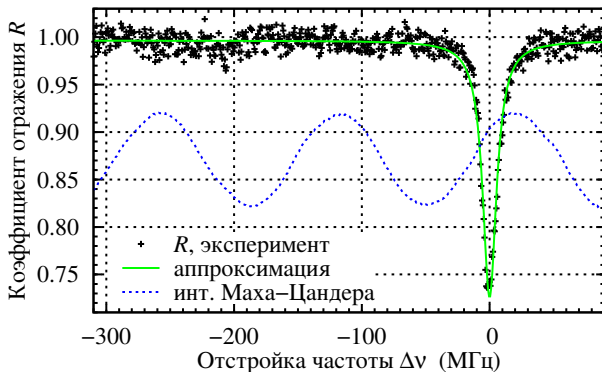


Рис. 4. Коэффициент отражения R_b в зависимости от частоты в области резонанса. Сигнал с интерферометра Маха—Цандера (после масштабирования и сдвига по вертикальной оси). Параметры аппроксимации: $1 - R_b = 0,271$ и $\delta\nu = 13,1$ МГц

волны генерации I_s и накачки P_s , равное $I_s/P_s = 25$, и коэффициент усиления малого сигнала $g_l = 0,023$ см $^{-1}$.

Чтобы определить параметры ВБР с фазовым сдвигом — резонатора РОС-лазера, с помощью перестраиваемого одночастотного волоконного лазера были записаны спектры пропускания и отражения ВБР (рис. 4). Пусть фазовый сдвиг решетки расположен в точке $z = 0$, а ее края имеют координаты $z_1 \approx -2$ и $z_2 = 2$ см. В предположении, что ВБР имеет прямоугольный профиль, получена ее сила $\varkappa = 2,68$ см $^{-1}$ (амплитуда модуляции показателя преломления $9,4 \times 10^{-5}$), коэффициент ненасыщающихся потерь на длине волны генерации $\alpha_l^* = 3,8 \times 10^{-3}$ см $^{-1}$ и коэффициенты пропускания левой и правой частей решетки относительно фазового сдвига $T_1 = 2,1 \times 10^{-4}$ и $T_2 = 0,82 \times 10^{-4}$.

Далее представлен альтернативный вариант получения соотношений, определяющих КПД лазера в аналитической модели Фостера [13] волоконного РОС-лазера. Уравнение на степень насыщения $X = 2I_0P_s/(P_0I_s)$, где I_0 и P_0 — мощности излучения

генерации и накачки в точке фазового сдвига, имеет вид

$$\frac{4g_l}{\varkappa X} \ln \frac{1 + \sqrt{1 + X}}{2} = \frac{T_1 + T_2}{2} + \frac{\alpha_l^*}{\varkappa}. \quad (1)$$

Заметим, что $(T_1 + T_2)/2 + \alpha_l^*/\varkappa = 2\pi n \delta\nu/(\varkappa c)$, где $\delta\nu$ — измеряемая в эксперименте ширина резонанса. Если С. Фостер рассматривал эрбиевые РОС-лазеры, в которых поглощается незначительная мощность излучения накачки, то для иттербиевых лазеров сечение поглощения на длине волны накачки заметно больше, поэтому необходимо учесть уменьшение мощности излучения накачки вдоль резонатора. Степень насыщения определяет долю мощности накачки, поглощенную в резонаторе ионами иттербия:

$$F = \frac{2g_p}{\varkappa} \ln \frac{1 + \sqrt{1 + X}}{2}.$$

Величин X и F достаточно, чтобы записать КПД лазера (в сумме по двум направлениям)

$$\eta = \frac{I_{\text{out}}}{P(z_1)} = \frac{X I_s (T_1 + T_2)}{4P_s} \exp(-\alpha_p^* |z_1| - F/2) \quad (2)$$

и мощность излучения накачки, прошедшей через резонатор,

$$P(z_2) = P(z_1) \exp[-\alpha_p^* (|z_1| + z_2) - F]. \quad (3)$$

Для приведенных параметров волокна и резонатора КПД лазера равен $\eta = 3,2\%$, что после поправок на потери на сварках и спектрально-селективных разветвителях уменьшается до $2,5\%$. В эксперименте наблюдается значение $2,4\%$, таким образом отличие значений не превышает погрешность экспериментов, которая оценивается на уровне 10% .

Для демонстрации возможностей аналитической модели показано, как влияет на КПД лазера сила ВБР (рис. 5). Были рассмотрены два случая: на потери в резонаторе влияет УФ-излучение при записи ВБР ($\alpha_l^* \sim \varkappa$), потери определяются только

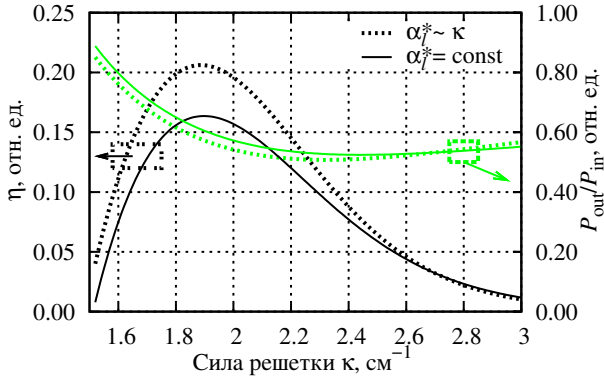


Рис. 5. КПД волоконного РОС-лазера (черные кривые) и непоглощенной доли накачки (серые) в зависимости от силы ВБР в случае постоянных потерь (сплошная линия) и для случая $\alpha_l^* \sim \kappa$ (точки)

свойствами волокна ($\alpha_l^* = \text{const}$). Для заданных параметров волокна оптимальной была бы ВБР с силой меньше примерно на 30 % по сравнению с изучавшейся в эксперименте. Проведен качественный анализ, как различные параметры резонатора и их соотношения влияют на КПД лазера. Показано, что параметры резонатора предпочтительно определять по резонансу в спектрах пропускания и отражения ВБР, поскольку в этом случае модель слабо чувствительна к искажению профиля ВБР. Аналитическая модель дала корректные оценки характеристик иттербиевого волоконного РОС-лазера, взятых из работы [2], сильно отличающегося по параметрам резонатора от описанного выше.

Оценка вклада в потери в резонаторе нерезонансного рассеяния в оболочку на ВБР показала, что данный механизм, по-видимому, не является определяющим, но может давать заметный вклад порядка 20 %.

Заключение содержит формулировку результатов данной работы.

Основные результаты и выводы

1) Доказано, что деградация выходных характеристик иттербиевого волоконного лазера с распределенной обратной связью при увеличении мощности излучения накачки вызвана искажением спектра пропускания волоконной брэгговской решетки в результате ее неравномерного нагрева. Показано, что улучшение теплоотвода от волокна резонатора уменьшает влияние мощности излучения накачки на КПД и длину волны лазерного излучения.

2) Измерена зависимость частоты генерации иттербиевого волоконного лазера с распределенной обратной связью от мощности накачки. Получено, что коэффициент пропорциональности изменяется от 9,7 до 1,3 кГц/мкВт в диапазоне частот модуляции от 2 до 100 кГц, что достаточно для использования данного эффекта для активной стабилизации частоты лазера.

3) Экспериментально обнаружено вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна при малой мощности входного сигнала в волоконном усилителе с большим коэффициентом усиления на проход. Показано, что этот эффект связан с вкладом усиленного спонтанного излучения и подавляется за счет насыщения усиления при увеличении входной мощности.

4) Продемонстрировано, что количественное согласие между измеренными в эксперименте и рассчитанными с помощью аналитической модели значениями КПД иттербиевого волоконного РОС-лазера и мощности излучения накачки, не поглотившейся в резонаторе, достигается, если учитывается затухание волны накачки в резонаторе лазера.

5) По измеренным ширине и амплитуде резонанса в спектрах отражения и пропускания волоконной брэгговской решетки рассчитаны коэффициенты пропускания распределенных отражателей и коэффициент поглощения на длине волны генерации, которые определяют выходные характеристики иттербиевого волоконного РОС-лазера.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- [A1] *Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E., Kablukov S. I., Nikulin M. A.* Single frequency single polarization DFB fiber laser // *Laser Phys. Lett.* — 2007. — Vol. 4, no. 6. — Pp. 428–432.
- [A2] *Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Nikulin M. A.* Single frequency linearly polarized DFB fiber laser source // *Proc. SPIE.* — 2007. — Vol. 6727. — P. 672716.
- [A3] *Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Kurkov A. S., Nikulin M. A.* Distributed feedback fiber laser with optical amplifier // *Laser Phys.* — 2007. — Vol. 17, no. 11. — Pp. 1292–1295.
- [A4] *Никулин М. А., Бабин С. А., Дмитриев А. К., Дычков А. С., Каблукков С. И., Луговой А. А., Печерский Ю. Я.* Иттербиевый волоконный лазер с распределенной обратной связью с низким уровнем частотных шумов // *Квант. электроника.* — 2009. — Т. 39, № 10. — С. 906–910.
- [A5] *Nikulin M. A., Churkin D. E., Vlasov A. A., Podivilov E. V.* Distributed feedback ytterbium fiber laser: experiment and analytical model // *J. Opt. Soc. Am. B.* — 2010. — Vol. 27, no. 7. — Pp. 1414–1420.

Список цитируемых работ

- [1] *Kringlebotn J. T., Archambault J.-L., Reekie L., Payne D. N.* Er³⁺:Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser // *Opt. Lett.* — 1994. — Vol. 19, no. 24. — Pp. 2101–2103.
- [2] *Asseh A., Storoy H., Kringlebotn J. T. et al.* 10 cm Yb³⁺ DFB fibre laser with permanent phase shifted grating // *Electr. Lett.* — 1995. — Vol. 31, no. 12. — Pp. 969–970.
- [3] *Loh W. H., Laming R. I.* 1.55 μm phase-shifted distributed feedback fibre laser // *Electr. Lett.* — 1995. — Vol. 31, no. 17. — Pp. 1440–1442.
- [4] *Sejka M., Varming P., Hubner J., Kristensen M.* Distributed feedback Er³⁺-doped fibre laser // *Electr. Lett.* — 1995. — Vol. 31, no. 17. — Pp. 1445–1446.
- [5] *Agger S., Povlsen J. H., Varming P.* Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser // *Opt. Lett.* — 2004. — Vol. 29, no. 13. — Pp. 1503–1505.
- [6] *Hill D. J., Hodder B., De Freitas J. et al.* DFB fibre-laser sensor developments // *Proc. SPIE.* — 2005. — Vol. 5855 — Pp. 904.
- [7] *Wallerand J.-P., Robertsson L., Ma L.-S., Zucco M.* Absolute frequency measurement of molecular iodine lines at 514.7 nm, interrogated by a frequency-doubled Yb-doped fibre laser // *Metrologia.* — 2006. — Vol. 43, no. 3. — Pp. 294–298.
- [8] *Markert F., Scheid M., Kolbe D., Walz J.* 4W continuous-wave narrow-linewidth tunable solid-state laser source at 546 nm by externally frequency doubling a ytterbium-doped single-mode fiber laser system // *Opt. Express.* — 2007. — Vol. 15, no. 22. — Pp. 14476–14481.
- [9] *Friedenauer A., Markert F., Schmitz H. et al.* High power all solid state laser system near 280 nm // *Appl. Phys. B.* — 2006. — Vol. 84, no. 3. — Pp. 371–373.

- [10] *Jaskorzynska B., Vanin E. V., Helmfriid S., Asseh A.* Gain saturation and pump depletion in high-efficiency distributed-feedback rare-earth-doped lasers // *Opt. Lett.* — 1996. — Vol. 21, no. 17. — Pp. 1366–1368.
- [11] *Lauridsen V. C., Povlsen J. H., Varming P.* Optimising erbium-doped DFB fibre laser length with respect to maximum output power // *Electr. Lett.* — 1999. — Vol. 35, no. 4. — Pp. 300–302.
- [12] *Yelen K., Zervas M. N., Hickey L. M. B.* Fiber DFB lasers with ultimate efficiency // *J. Lightwave Technol.* — 2005. — Vol. 23, no. 1. — Pp. 32–43.
- [13] *Foster S.* Dynamical noise in single-mode distributed feedback fiber lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* — 2004. — Vol. 40, no. 9. — Pp. 1283–1293.
- [14] *Dong L., Loh W. H., Caplen J. E. et al.* Efficient single-frequency fiber lasers with novel photosensitive Er/Yb optical fibers // *Opt. Lett.* — 1997. — Vol. 22, no. 10. — Pp. 694–696.
- [15] *Rønnekleiv E.* Frequency and intensity noise of single frequency fiber Bragg grating lasers // *Optical Fiber Technology.* — 2001. — Vol. 7, no. 3. — Pp. 206–235.
- [16] *Horak P., Voo N. Y., Ibsen M., Loh W. H.* Pump-noise-induced linewidth contributions in distributed feedback fiber lasers // *IEEE Photonics Tech. Lett.* — 2006. — Vol. 18, no. 9. — Pp. 998–1000.

НИКУЛИН МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИТТЕРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Подписано в печать 11.11.2010. Заказ №91. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Отпечатано на полиграфическом участке Института катализа СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 5