

На правах рукописи



ТРИКШЕВ АНТОН ИГОРЕВИЧ

**КОГЕРЕНТНОЕ СЛОЖЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ
ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 01.04.21 - «Лазерная физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, зав. лабораторией
Цветков Владимир Борисович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Кундикова Наталья Дмитриевна

Зав. лабораторией нелинейной оптики, Институт электрофизики Уральского отделения РАН

доктор физико-математических наук

Наний Олег Евгеньевич

профессор физического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация:

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН

Защита состоится 03.12.2018 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу 119991, ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.063.03
кандидат физико-математических наук



Т.Б. Воляк

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Для использования в технологических и специальных целях требуются лазеры с выходной мощностью до нескольких десятков киловатт. Одновременно предъявляются высокие требования к качеству лазерного излучения.

Когерентное и спектральное сложение лазерных пучков, активно развиваемое в последние годы, привело к значительному росту мощности волоконных и твердотельных лазерных систем [1]. Оба метода обладают своими преимуществами и недостатками. Спектральное сложение весьма удобно в случае использования диодных или маломощных волоконных лазеров с относительно небольшой мощностью генерации единичного излучателя (до нескольких сотен ватт) и широким спектром излучения [2]. Однако, возможное число суммируемых источников, излучающих в спектральном диапазоне усиления ионов иттербия (1.06-1.16 мкм) не может быть большим. В случае сложения лазерных пучков мощных лазеров, предпочтительной является схема когерентного сложения пучков [3]. С одной стороны метод когерентного сложения лазерных пучков требует контроля и поддержания фазы излучения в каждом канале с высокой точностью, с другой позволяет получать высокие выходные мощности, вплоть до 100 кВт [4], без концентрации всей мощности на каком-либо одном оптическом элементе, как в случае спектрального сложения.

Цель и задачи работы

Основной целью настоящей работы являлось создание полностью волоконной системы когерентного сложения лазерных пучков волоконных лазеров ближнего ИК диапазона и решение вопросов, связанных с поддержанием постоянной разности фаз между лазерными каналами в условиях случайного изменения фазы излучения в каждом канале. При этом учитывалось, что создаваемая лазерная система должна являться частью более мощной лазерной установки с усилителями на кристаллах, легированных ионами неодима, в выходных каскадах.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Реализация одночастотного задающего генератора на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода с волоконной брэгговской решеткой (ВБР) и волоконного иттербиевого усилителя;
2. Создание волоконного усилителя в диапазоне мощностей до 200 Вт для одночастотного задающего генератора на основе активного GTWave-волокна, волокна типа LMA и активного волокна конической формы;
3. Исследование влияния волоконного усилителя на параметры излучения одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР, такие как спектральный состав, ширина линии генерации, степень поляризации;
4. Оптимизация параметров волоконных усилителей, а именно, длины волны накачки и длины активного волокна;
5. Создание системы контроля и удержания фазы в нескольких каналах лазерной установки;
6. Реализация семиканальной системы когерентного сложения лазерных пучков и последующее исследование профиля интенсивности суммарного поля от семи каналов; сравнение полученных данных с теоретическими расчетами;
7. Реализация мощной двухканальной системы когерентного сложения лазерных пучков и последующее исследование профиля интенсивности суммарного поля; сравнение полученных данных с теоретическими расчетами.

Научная новизна

1. Впервые предложены, теоретически исследованы и экспериментально реализованы способ и устройство когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием.
2. Впервые реализована гибридная лазерная система генерации одночастотного излучения с выходной мощностью до 130 Вт на коническом иттербиевом волокне.
3. Впервые созданы двух- и семиканальная полностью волоконные системы с когерентным сложением излучения с выходной мощностью до 60 и 35 ватт соответственно с использованием оптоволоконных корректоров фазы с пьезоэлектрическим управлением и быстродействием лучше 0,1 с.

Практическая ценность

Результаты исследований имеют широкий круг возможных применений, как в научных, так и в практических целях (например, лидары для дистанционного зондирования ветровых потоков, осуществления климатических наблюдений и повышения безопасности полетов самолетов в условиях возмущенной атмосферы; лазерный детектор гравитационных волн, удаленное лазерное воздействие на конструкционные материалы).

По результатам работы получен патент RU 2488862 C1 "Способ когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием и устройство для когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием".

Защищаемые положения

1. Использование гибридной схемы с одночастотным полупроводниковым лазерным диодом с волоконной брэгговской решеткой и волоконным иттербиевым усилителем на основе GTWave-волокна позволяет создать задающий генератор с шириной полосы излучения около 2 МГц и степенью поляризации выше 0,9;
2. Использование волоконных усилителей, созданных на основе иттербиевого волокна без сохранения поляризации, в гибридных системах с выходной мощностью до 5 Вт не влияет на ширину линии и оказывает слабое влияние на поляризацию усиленного излучения, которое возможно компенсировать включением в схему усилителей контроллеров поляризации;
3. Применение гибридной схемы с задающим генератором на одночастотном полупроводниковом лазерном диоде с волоконной брэгговской решеткой и последующее усиление в волоконных иттербиевых усилителях с оконечным каскадом на активном волокне с широким полем моды или на активном волокне конической формы позволяют создать одночастотную лазерную систему с высокой выходной мощностью;
4. Возможна реализация когерентного сложения (фазировки) в полностью волоконной семиканальной лазерной системе с суммарной мощностью около

35 Вт, построенной по схеме задающий генератор – каскад усилителей, с помощью подстройки фазы оптоволоконными корректорами с пьезоэлектрическим управлением;

5. Возможна реализация когерентного сложения в полностью волоконной двухканальной лазерной системе с суммарной мощностью около 60 Вт с помощью подстройки фазы оптоволоконными корректорами с пьезоэлектрическим управлением.

Личный вклад диссертанта

Изложенные в диссертации результаты получены А.И. Трикшевым лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Апробация работы

Основные результаты были доложены на следующих конференциях: на 9-й (Саранск, 2010 г.) и 10-й (Саранск, 2011 г.) Всероссийских конференциях с элементами научной школы для молодежи, на 5-й Всероссийской школе по лазерной физике и лазерным технологиям, (Саров, 2011 г.); на 20-й Международной конференции по лазерной физике Laser Physics Workshop (г. Сараево, Босния и Герцеговина, 2011 г.), на 5-м (Новосибирск, 2012 г.) Российском семинаре по волоконным лазерам, на 11-й Международной конференции "Забабахинские Научные Чтения" (Снежинск, 2012 г.), на Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике ICONO/LAT (г. Москва, 2013), на 4-й (Пермь, 2013 г.) и 5-й (Пермь, 2015 г.) Всероссийских конференциях по волоконной оптике, на 17-й Международной конференции "Оптика лазеров" (Санкт-Петербург, 2016 г.)

Публикации

Основные результаты опубликованы в 6 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 139 страниц, включая 90 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 108 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и вытекающие из них задачи исследований. Кратко рассмотрено состояние вопроса на момент начала исследований, сформулированы защищаемые положения, научная новизна работы и ее практическая ценность, описаны основные результаты работы и вклад автора в решение поставленных задач.

Первая глава диссертации носит обзорно-аналитический характер.

В первом разделе описаны основные методы сложения лазерных пучков. Рассматривались две большие группы методов: когерентные и некогерентные. Как подгруппа некогерентных методов рассматриваются методы спектрального сложения. Основными характеристиками, описывающими используемые методы сложения и архитектуру всей системы, являются: метод оценки качества сложения и его точность, устойчивость к разъюстировке и случайным помехам, применимость метода для случая получения суммарного излучения высокой мощности (вплоть до десятков кВт), и возможность масштабирования на большое число каналов, скорость реакции системы подстройки фазы (в случае с внешним управлением фазой излучения в каналах). В данной работе была выбрана полностью волоконная схема когерентного сложения с использованием опорного канала для анализа фазы каждого рабочего канала.

Во втором разделе описаны конструкции узкополосных задающих генераторов. В качестве задающего генератора рассмотрены следующие конструкции: 1) одночастотный полупроводниковый (п/п) лазерный диод с волоконным брэгговским резонатором (ВБР), 2) одночастотный волоконный DFB (Distributed Feedback Laser) лазер, 3) одночастотный лазер на кристалле, активированном ионами неодима или иттербия. При выборе наиболее подходящего

типа задающего генератора наряду с техническими характеристиками рассматривались также стоимость, надежность и удобство в работе. В наших условиях по сумме характеристик (ширина линии генерации, стоимость, надежность, удобство в работе) было решено в качестве задающего генератора применить одночастотный лазерный диод с ВБР и волоконным выходом.

В третьем разделе описаны активные волокна для каскадов усиления.

В качестве активной среды усилителей, представленных в данной работе, базовым является GTWave-волокно, которое представляет собой два и более волоконных световода с общим полимерным покрытием, имеющим пониженный по сравнению с кварцем показатель преломления. Преимуществом волокон такого типа является простота накачки, поскольку излучение накачки вводится непосредственно в пассивную жилу без использования волоконного комбайнера. При этом на выходе излучение имеет хорошее качество пучка и среднюю мощность порядка 10 Вт [5]. Недостатком таких волокон является малая концентрация активной примеси и, как следствие, большая длина.

Поскольку мощность выходного излучения одночастотных лазерных систем ограничивается порогом ВРМБ, который можно оценить по формуле

$$P = 21 \frac{A_{eff}}{g_B \cdot L_{eff}}, \quad (1)$$

где A_{eff} , L_{eff} - эффективные площадь сечения и длина волокна, g_B - коэффициент усиления ВРМБ (типичное значения для плавленого кварца $5 \cdot 10^{-11}$ м/Вт), то для получения излучения большой мощности было необходимо использовать волокна с большой сердцевиной и большой концентрацией активной примеси для уменьшения длины волокна. Примером таких волокон являются волокна с большим полем моды (LMA) с диаметром сердцевины более 10 мкм. Использование данных волокон позволяет получать в одночастотном режиме генерации более 600 Вт [6].

Также, для подавления ВРМБ можно использовать активные волокна конической формы, что позволяет получать высокие средние мощности выходного излучения, вплоть до 750 Вт в одномодовом режиме [7]. В отличие от LMA волокон, волокнам конической формы не требуется специальный адаптер для соединения с задающим генератором.

Вторая глава посвящена описанию гибридного одночастотного лазера с выходной мощностью излучения до 3 Вт (Рис. 1). В данной главе представлены результаты исследования параметров излучения задающего генератора, а также результаты исследования влияния двухкаскадного волоконного иттербиевого усилителя на данные параметры.

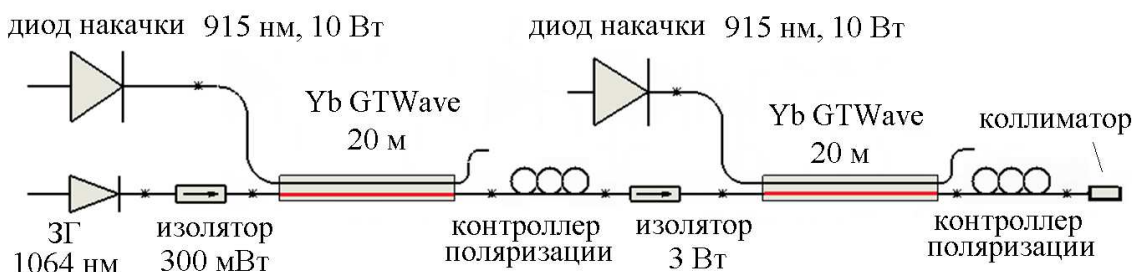


Рис. 1. Схема одночастотного гибридного лазера.

В качестве задающего генератора (ЗГ) использовался одночастотный п/п лазерный диод с ВБР ($\lambda = 1064$ нм), мощностью 25 мВт и степенью поляризации 0,98. В качестве активной среды использовалось иттербиевое GTWave-волокно длиной 20 м. Диаметр сердцевины/оболочки: 6/125 мкм ($NA=0.11/0.45$). Концентрация активной примеси $8,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В качестве накачки применялись мощные п/п лазерные диоды.

В первом разделе представлены результаты измерения основных параметров излучения п/п одночастотного лазерного диода с ВБР. Были определены условия, при которых наблюдался стабильный одночастотный режим работы: оптимальная температура диода 22°C и оптимальный ток накачки в диапазоне 127-130 мА. Степень поляризации определялась по максимальной (I_{max}) и минимальной (I_{min}) интенсивности света, прошедшего через призму Глана, и составила 0,98.

Для точного определения ширины линии генерации одночастотного лазерного диода порядка 1 МГц в работе применялся сканирующий волоконный кольцевой интерферометр (ВКИ) [8].

Область свободной дисперсии ВКИ составляла 28 МГц, а ширина аппаратной функции 470 кГц. На Рис. представлен результат измерения ширины линии излучения, полученный с помощью сканирующего ВКИ при оптимальном режиме

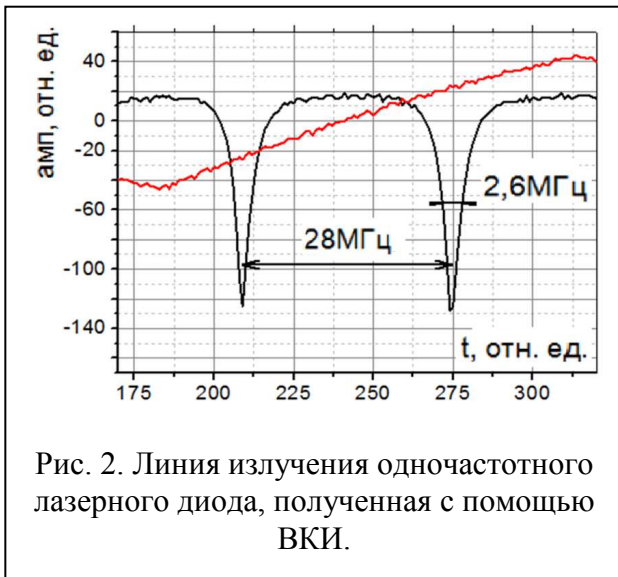


Рис. 2. Линия излучения одночастотного лазерного диода, полученная с помощью ВКИ.

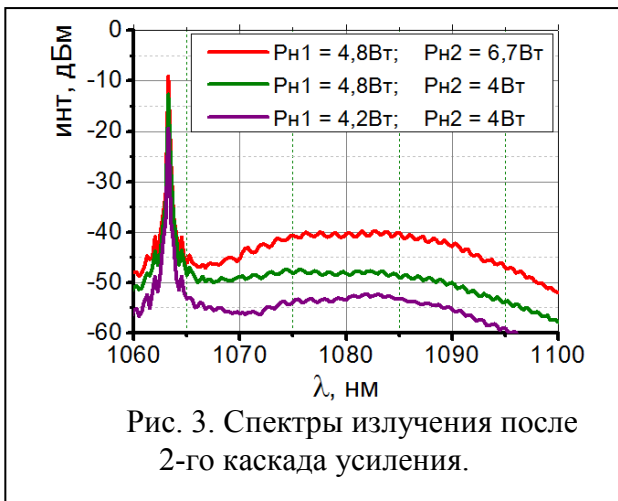


Рис. 3. Спектры излучения после 2-го каскада усиления.

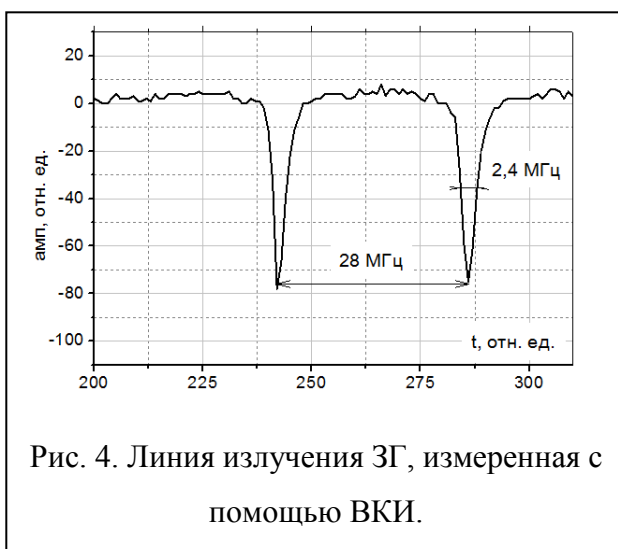


Рис. 4. Линия излучения ЗГ, измеренная с помощью ВКИ.

работы лазерного диода. По данным, полученным в работе, ширина линии генерации была оценена в $2,6 \pm 0,2$ МГц.

Во втором разделе представлены результаты измерения основных параметров излучения после усиления. Спектры излучения представлены на Рис. 3. Как видно из полученных спектров, после второго каскада усиления в области 1080 нм возникал заметный рост мощности спонтанной люминесценции, который ограничивал максимальную мощность накачки.

При мощностях накачки в 4,8 Вт для первого каскада и 6,8 Вт для второго, на выходе системы была получена мощность генерации 2,5 Вт. Коэффициент усиления второго каскада составил 10 дБ. Суммарный коэффициент усиления двухкаскадного усилителя с учетом потерь составил 21 дБ. Степень поляризации после 2-го каскада усиления составила 0,93. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлен результат измерения ширины линии излучения, полученный с помощью ВКИ после второго каскада

усиления.

Ширина линии генерации была оценена в $2,4 \pm 0,2$ МГц. Также в работе были установлены следующие параметры выходного излучения: качества пучка $M^2=1.01$, диаметр перетяжки $d_0 = 0,52$ мм и угловая расходимость $\Theta=2,6$ мрад.

Третья глава содержит результаты исследований системы когерентного сложения семи лазерных каналов. Описан принцип фазовой подстройки каналов, основанный на синхронном детектировании сигнала, полученного при сложении выходного и опорного излучения. Так же приведен сравнительный анализ полученных экспериментальных результатов с теоретическим расчетом.

В первом разделе представлено описание схемы когерентного сложения семи лазерных каналов (Рис. 2).

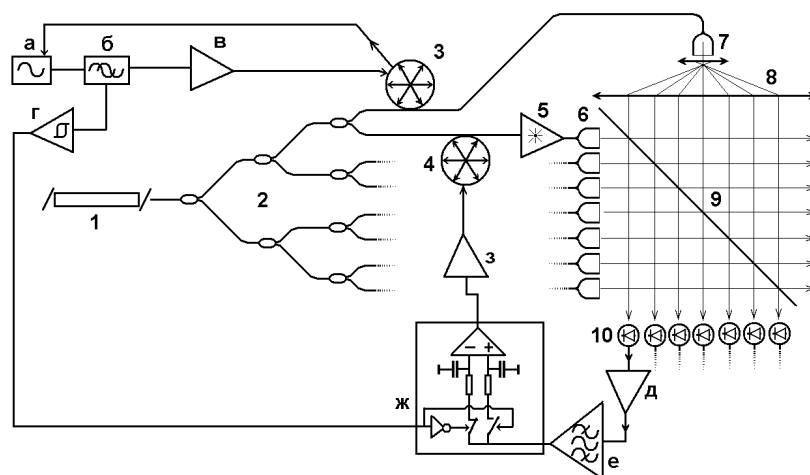


Рис. 2. Схема установки.

Оптические элементы: 1 – задающий лазер, 2 – волоконные ответвители, 3 – пьезокерамический модулятор фазы, 4 – пьезокерамический управляющий элемент, 5 – волоконные иттербиевые усилители, 6 – коллиматоры рабочих каналов (в держателях), 7 – коллиматор опорного канала, 8 – телескоп, 9 – делительная пластина, 10 – фотоприемники. Электронные компоненты: а) генератор гармонических (синусоидальных) колебаний на собственной частоте пьезокерамического модулятора, б) фазовращатель модулирующего и опорного сигналов, в) усилитель модулирующего сигнала, г) формирователь прямоугольного опорного сигнала, д) предусилитель для фотоприемника, е) селективный полосовой предусилитель, ж) синхронный детектор, з) выходной высоковольтный усилитель.

Исходное одночастотное излучение формировалось задающим генератором (1), на основе одночастотного п/п лазерного диода с ВБР ($\lambda = 1064$ нм) и шириной линии генерации $2,1 \pm 0,2$ МГц. Затем это излучение разделялось на восемь каналов системой разветвителей (2). В семи рабочих каналах излучение, пройдя через систему усилителей (5), достигало требуемого уровня мощности. Волоконные усилители представляли собой иттербиевое GTWave-волокно

(6/125 мкм, NA=0.11), длиной 20 м каждый. Накачка производилась п/п лазерным диодом (3) с помощью семиканального разветвителя (4). После усиления излучение собиралось в систему параллельных, близко расположенных лазерных пучков, формируя, таким образом, синтезированную апертуру лазерной системы.

Опорный канал предназначен для того, чтобы относительно него фазировались рабочие каналы. В настоящей работе использовались волоконные пьезокерамические модуляторы (3, 4), которые конструктивно представляли собой цилиндрическую катушку из пьезокерамики с намотанным одномодовым волокном. Модуляция фазы опорного и подстройка фаз рабочих каналов осуществлялась за счет изменения оптического хода лучей в волокне при растяжении волокна вследствие изменения геометрии пьезокерамической катушки.

Выделение разностного сигнала, пропорционального разности фаз между опорным и силовым каналами, происходило при сложении излучения опорного канала и части излучения силовых каналов на гетеродинных детекторах, индивидуальных для каждого канала. Полученный сигнал обрабатывался в блоке управления фазового модулятора (ФМ) и использовался в цепи обратной связи для управления ФМ.

Управляющий сигнал на выходе ключевого синхронного детектора можно представить в виде разности двух интегралов сигнала с фотоприемника, первого полупериода и второго полупериода модуляции.

$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^{\pi} \cos(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + C) d\varphi - \int_{\pi}^{2\pi} \cos(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + C) d\varphi = \\
 &= -2 \operatorname{Sin} C \int_0^{\pi} \sin(B \cdot \sin(\varphi + \varphi_0)) d\varphi, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где A – амплитуда интерференции, B – амплитуда модуляции опорного канала по фазе, φ_0 – сдвиг фазы механической модуляции и синхросигнала, C – сдвиг фазы среднего значения фазы опорного и рабочего каналов, D – постоянная величина.

Видно, что при нулевом сдвиге фаз ($C = 0$) рабочего канала и среднего значения фазы опорного излучения управляющий сигнал нулевой и система находится в устойчивом равновесии, в то время как при C отличном от нуля появится возвращающий сигнал обратной связи.

Блок управления принимал и обрабатывал сигналы с фотоприемников, формируя гармонические колебания для фазового модулятора, а также сигналы для управляющих пьезоэлементов фазовых корректоров.

Во втором разделе третьей главы приведены результаты исследований семиканальной системы на малой мощности. Экспериментальные и теоретические профили интенсивности суммарного поля представлены на Рис. 3.

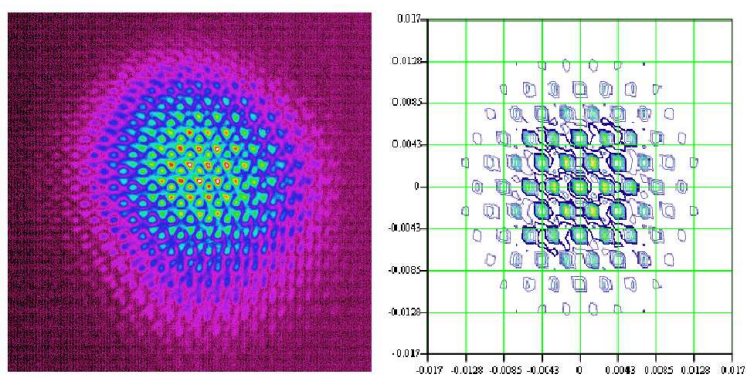


Рис. 3. Распределение поля при сложении 7-ми каналов.
а) эксперимент, б) теоретический расчет

Полученные данные хорошо согласуются с теоретическим расчетом.

После отработки системы когерентного сложения на малом уровне мощности (50-100 мВт на рабочий канал) была собрана установка с максимальной суммарной выходной мощностью до 35 Вт. Максимальная мощность выходного излучения рабочих каналов варьировалась в пределах от 4,9 до 5,5 Вт при дифференциальной эффективности от 63 до 70%. Суммарные профили интенсивности лазерного пучка при сложении семи рабочих каналов в свободном режиме (с выключенной системой обратной связи) и в режиме фазовой синхронизации представлены на Рис. 4.

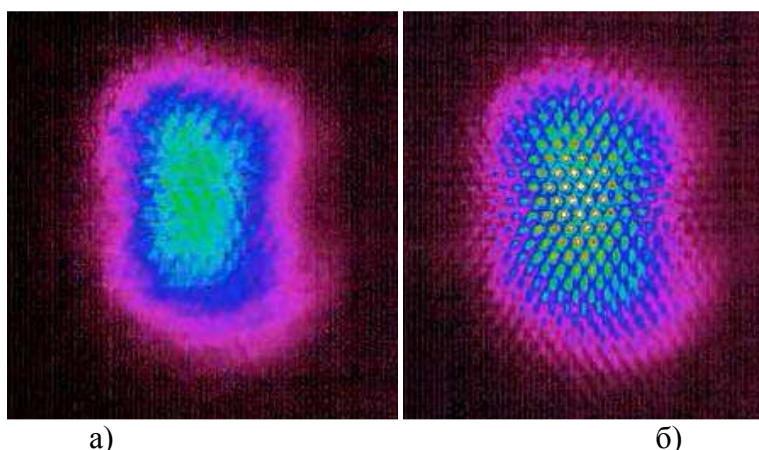


Рис. 4. Распределение поля при сложении семи каналов.
 а) свободный режим, б) режим фазовой синхронизации

В процессе исследования не только рассматривались медленные воздействия за счет дрейфа температуры в каналах, но и импульсные (ударное воздействие на систему). Характерное время стабилизации составляло десятые доли секунды.

В третьем разделе третьей главы приведены выводы по результатам исследования семиканальной системы когерентного сложения.

Материалы, представленные в четвертой главе, связаны с исследованием одночастотного гибридного лазера на коническом волокне с выходной мощностью до 160 Вт (Рис. 5).

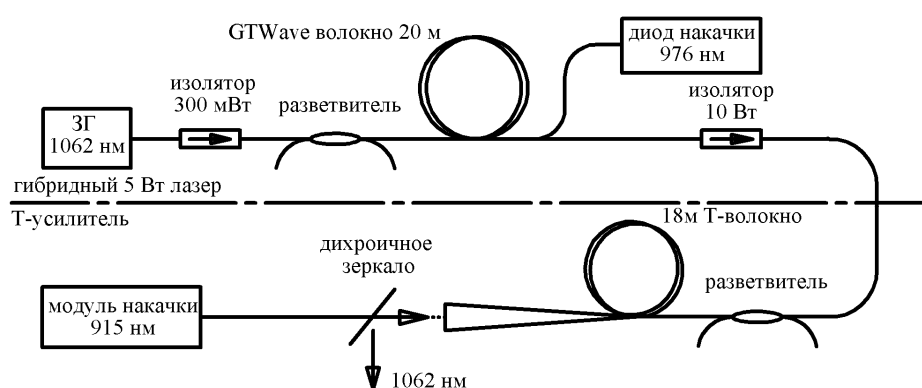


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

Установка состояла из двух главных частей. Первая – гибридный одночастотный лазер с выходной мощностью 5 Вт. Вторая – усилитель на коническом волокне (Т-усилитель). Т-усилитель включал в себя активное

коническое волокно, модуль накачки (длина волны 915 нм), дихроичное зеркало (пропускание на 915 нм, отражение на 1062 нм), разветвитель (коэффициент деления 1/99) для контроля мощности гибридного лазера и контроля обратной мощности Т-усилителя.

В первом разделе представлены результаты измерения основных параметров излучения п/п одночастотного лазерного диода с ВБР (длина волны генерации 1062 нм). Определен оптимальный режим работы: ток накачки 115 мА, $T = 26^{\circ}\text{C}$. Степень поляризации излучения 0,98. Ширина линии генерации $1,9 \pm 0,2$ МГц.

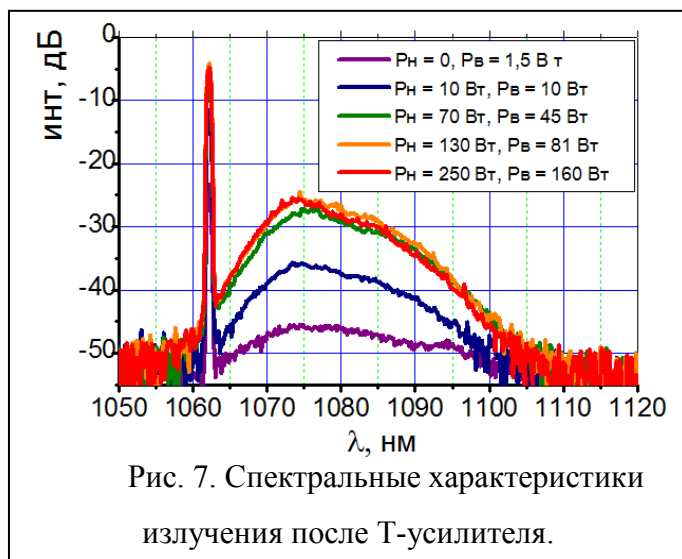
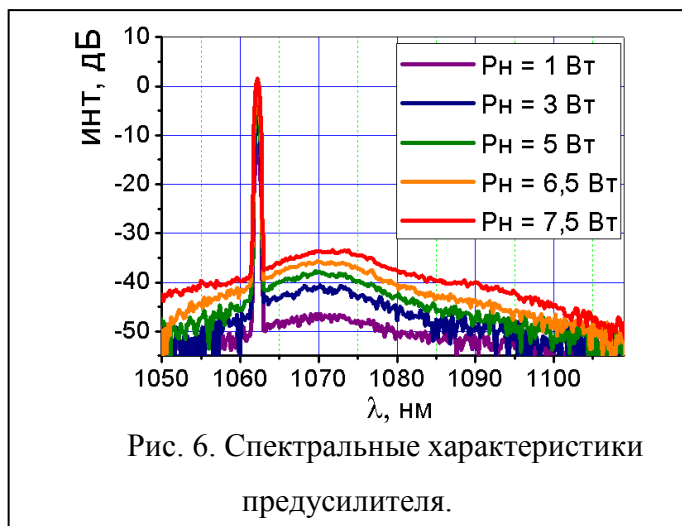
Во втором разделе представлено описание и исследование волоконного предусилителя на GTWave-волокне при разной длине активного волокна и различных длинах волн накачки. В качестве ЗГ служил одночастотный п/п лазерный диод с ВБР с шириной линии генерации в $1,9 \pm 0,2$ МГц ($I_z = 115$ мА, $T = 26^{\circ}\text{C}$). В качестве накачки применялись диоды с выходной мощностью до 10 Вт. Исследуемые длины волн накачки, 915, 940 и 975 нм. Исследуемые длины активного волокна 20 и 16 м.

После сопоставления спектров излучения диодов накачки и спектра поглощения активного волокна было показано, что необходимо поддерживать температуру диода накачки (на 975 нм) выше 44°C . Диоды накачки 915 и 940 нм работали при температуре 20°C .

Для случая накачки на длинах волн 915 нм и 975 нм был проведен теоретический расчет спектров спонтанной люминесценции и мощности выходного излучения. Расчет показал хорошее качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Из полученных данных было получено, что максимальная дифференциальная эффективность, с использованием накачки на 975 нм при длине активного волокна 20 м составила 81%, при этом максимальная мощность выходного сигнала составила 5,1 Вт при коэффициенте усиления около 27дБ. При накачке на 915 нм максимальная дифференциальная эффективность составляла 32%. При этом максимальная выходная мощность составила 1,4 Вт при коэффициенте

усиления около 21дБ. При накачке на 940 нм дифференциальная эффективность составляла 13%. При этом максимальная выходная мощность составляла 0,5 Вт при коэффициенте усиления около 17 дБ. Спектральные характеристики предусилителя представлены на рис. 9.



Максимальная мощность излучения на выходе с предусилителя составила 5,1 Вт, при мощности накачки 7,4 Вт и температуре диода 44°С. Коэффициент усиления составил около 27 дБ. Дифференциальный КПД составил около 80%.

В третьем разделе представлены параметры созданного усилителя на коническом волокне. Накачка осуществлялась диодным лазерным модулем с волоконным выходом с мощностью до 250 Вт на длине волны 915 нм. Волокно представляло собой иттербиевое активное волокно, длиной 18 м, с плавно меняющимся диаметром сердцевины и оболочки с 44 и 700 мкм до 7.5 и 120 мкм соответственно. Апертура сердцевины $NA = 0,11$. Апертура оболочки 0,4. Для предотвращения френелевского отражения широкий торец, в который вводилась накачка, был сколот под углом 8°.

В четвертом и пятом разделах представлены результаты экспериментального исследования характеристик выходного излучения. Спектральные характеристики излучения после Т-усилителя представлены на

рис. 10. Максимальная выходная мощность составила около 160 Вт. При этом мощность полезного сигнала составила 130 Вт. Дифференциальная эффективность составила около 60%. Коэффициент усиления для Т-усилителя оказался равным примерно 17 дБ (суммарный коэффициент усиления составил около 40дБ). Установлено, что при мощности накачки более 180 Вт начинается резкий нелинейный рост мощности обратного излучения, который, скорее всего, связан с усилением излучения ВРМБ. Лазерная система на основе конического волокна позволяет решить вопрос о создании полностью волоконной одночастотной лазерной системы с выходной мощностью до нескольких сотен Ватт, однако существующие сложности во вводе излучения накачки и создания полностью волоконной лазерной системы требуют рассмотрения альтернативных вариантов мощных усилителей.

В шестом разделе представлены выводы по 4й главе.

Пятая глава содержит результаты исследований одночастотного гибридного лазера на основе LMA волокна с выходной мощностью до 120 Вт (Рис. 8). Также глава содержит описание исследования двухканальной системы когерентного сложения, рабочие каналы которой представляют собой гибридные лазеры на основе LMA волокна. Установка была ориентирована на длину волны 1,08 мкм, наиболее оптимальную для создаваемой волоконной лазерной системы.

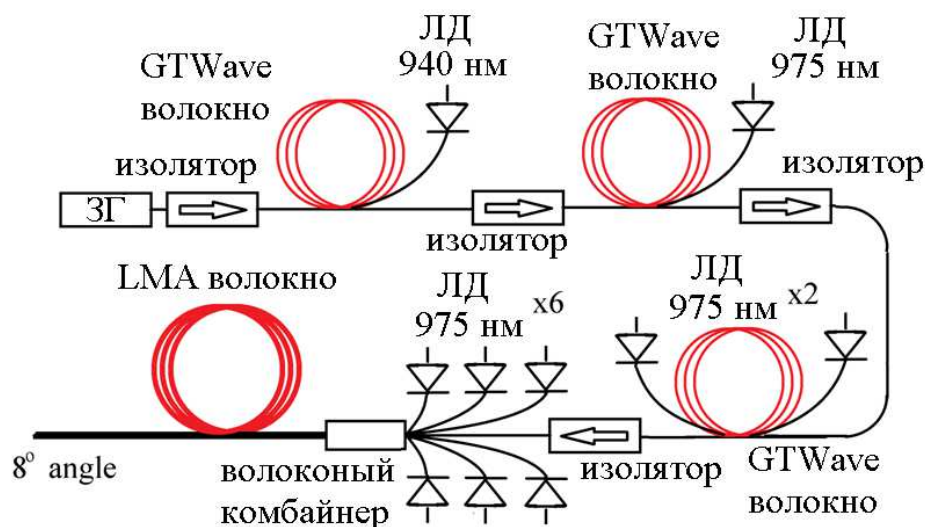


Рис. 8. Схема экспериментальной установки. ЛД - лазерный диод накачки.

Задающий генератор представлял собой одночастотный п/п лазерный диод с ВБР ($\lambda = 1080\text{нм}$, $\Delta f = 2,8 \pm 0,2 \text{ МГц}$). Первый каскад усиления представлял собой иттербиевое GTWave-волокно длиной 16 м с накачкой на 940 нм. Второй и третий каскады представляли собой иттербиевое GTWave-волокно длиной 20 м каждый, с накачкой на 975 нм. Выходная мощность третьего каскада составляла около 10 Вт. Мощный усилитель представлял собой иттербиевое LMA волокно длиной 2,5 м. Диаметр сердцевины составлял 25 мкм ($NA = 0.06$). Диаметр оболочки 250 мкм. Коэффициент поглощения на длине волны накачки составлял около 10 дБ/м. Накачка осуществлялась шестью диодами с волоконными выходами, объединенными мощным волоконным комбайнером. Суммарная мощность накачки с учетом потерь составляла около 175 Вт. Для согласования апертур волокон комбайнера и выходного волокна третьего каскада применялся модовый адаптер, представляющий собой волокно конической формы, с плавным изменением диаметра сердцевины от 6 мкм до 25 мкм.

В первом разделе приведены результаты исследования основных параметров излучения п/п одночастотного лазерного диода с ВБР (1080 нм). Определены оптимальные условия работы ($I_z = 134 \text{ мА}$, $T = 20^\circ\text{C}$). Степень поляризации излучения 0,98. Ширина линии генерации была оценена по результатам измерений как $2,8 \pm 0,2 \text{ МГц}$.

Во втором разделе представлены результаты исследования параметров выходного излучения гибридного лазера на LMA волокне.

При максимальной накачке (175 Вт с учетом потерь) выходная мощность составила около 120 Вт (117 Вт полезного сигнала) при дифференциальной эффективности около 68%. Мощностные и спектральные характеристики излучения после усилителя на LMA волокне представлены на Рис. 12.

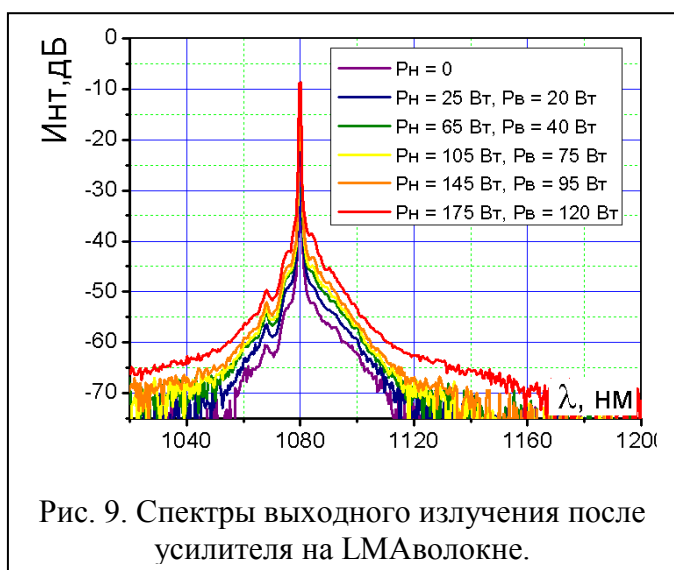


Рис. 9. Спектры выходного излучения после усилителя на LMA-волокне.

В третьем разделе приведены результаты исследования фазировки двух каналов при когерентном сложении лазерных пучков с максимальной суммарной мощностью до 60 Вт. Принцип работы установки аналогичен установке, представленной на рисунке 5, и описанной в третьей главе. Отличие от установки, приведенной на рисунке 6, состоит в том, что рабочие каналы построены на основе многокаскадного усилителя с выходным каскадом на LMA волокне. Количество каналов сокращено до двух. Суммарный профиль интенсивности двух рабочих каналов в режиме фазовой синхронизации представлен на Рис. 10.

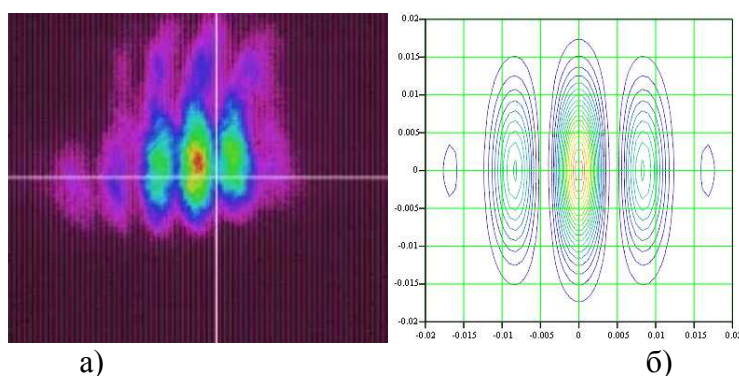


Рис. 10. Профиль интенсивности суммарного поля: а) экспериментальный, б) теоретический.

В четвертом разделе приведены выводы к главе 5.

В заключении сформулированы основные результаты.

Основные результаты диссертации.

1) Создан гибридный одночастотный лазер на основе двухкаскадного волоконного усилителя и задающего одночастотного полупроводникового лазерного диода с ВБР. Выходная мощность составила 2,5 Вт при коэффициенте усиления около 20 дБ и максимальной дифференциальной эффективности около 80%. Установлено, что волоконный усилитель существенно не влияет на параметры излучения. При оптимальном режиме работы ширина линии генерации составляла $2,4 \pm 0,2$ МГц как до, так и после усиления. Степень поляризации излучения после усиления сохранялась на уровне выше 0,9.

2) Впервые предложена и разработана система контроля и управления фазой излучения с использованием оптоволоконных корректоров фазы с

пьезоэлектрическим управлением и быстродействием лучше 0,1 с. Алгоритм работы обратной связи теоретически разработан и экспериментально апробирован на примере двух- и семиканальной схемы когерентного сложения. Продемонстрирована семиканальная лазерная система с когерентным сложением каналов с суммарной выходной мощностью до 35 Вт, работоспособная при внешних возмущениях. Полученные данные соответствуют теоретическим расчетам.

3) Впервые создана гибридная одночастотная лазерная система на основе иттербиевого двухкаскадного волоконного усилителя с использованием двух типов активных волокон (GTWave-волокно в первом каскаде усиления и коническое волокно с двойным покрытием во втором каскаде). При мощности накачки в 250 Вт на длине волны 915 нм получена выходная мощность в 160 Вт, 130 Вт из которых приходилось на одночастотное излучение. Суммарный коэффициент усиления с учетом потерь (-5 дБ) составил около 40 дБ при дифференциальной эффективности не меньше 60% и максимальной мощности обратного излучения не более 0,3 Вт.

4) Создана гибридная одночастотная лазерная система на основе 4-х каскадного волоконного усилителя. Первые три каскада усиления представляли собой активное GTWave-волокно. В выходном каскаде использовано активное волокно с широким полем моды (LMA волокно). При мощности накачки в 175 Вт на длине волны 975 нм получена выходная мощность около 120 Вт, 117 Вт из которых приходилось на одночастотное излучение. Суммарный коэффициент усиления с учетом потерь -5 дБ составил около 40 дБ при дифференциальной эффективности около 68%. Для согласования апертур GTWave и LMA волокна использовался модовый адаптер, представляющий собой волокно конической формы с плавным изменением диаметра сердцевины с 6 мкм до 25 мкм.

5) Создана и исследована двухканальная полностью волоконная лазерная система с когерентным сложением каналов и суммарной мощностью до 60 Вт, работоспособная при внешних механических возмущениях и флуктуациях температуры. Полученные экспериментальные данные соответствуют теоретическим расчетам. Продемонстрирована устойчивая работа системы

обратной связи при компенсации разности фаз в лазерных каналах при тепловом и механическом воздействии на активную среду с характерным временем фазировки около 0,1 с.

Список публикаций по теме диссертации

1. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Парамонов В.М. Измерение ширины линии излучения одночастотного полупроводникового лазера с использованием кольцевого волоконного интерферометра //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 656-658.
2. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б. Одночастотный гибридный лазер с выходной мощностью до 3 Вт на длине волны 1064 нм //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 5. – С. 417-419.
3. Пырков Ю.Н., Трикшев А.И., Цветков В.Б. Фазировка нескольких усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 9. – С. 790-793.
4. Trikshev A.I., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B., Filatova S.A., Kertulla J., Filippov V., Chamorovskiyy Yu.K. and Okhotnikov O.G. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier //Laser Physics Letters. – 2013. – Т. 10. – №. 6. – С. 065101.
5. Трикшев А.И., Пырков Ю.Н., Цветков В.Б. Фазировка двух усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной мощностью 60 Вт //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 11. – С. 1045-1048.
6. Трикшев А.И., Цветков В.Б. Теоретический расчет спектров усиленной спонтанной люминесценции иттербиевого волокна //Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22. – №. 6. – С. 98-103.
7. Пырков Ю.Н., Курков А.С., Трикшев А.И., Цветков В.Б., Способ когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием и устройство для когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием. Патент РФ № RU2 488 862 С1 Опубликовано: 27.07.2013 Бюл. № 21

Цитируемая литература.

- [1] Brignon A. (ed.). Coherent Laser beam combining. – John Wiley & Sons, 2013. - p. 498.
- [2] Augst S. J.; Redmond S.M.; Yu C.X.; Ripin D.J.; Fan T.Y.; Goodno G.D.; Thielen P.A.; Rothenberg J.E.; Sanchez-Rubio A., Coherent and spectral beam combining of fiber lasers //Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2012. – Т. 8237. – С. 823704.
- [3] Yu C.X., Kinsky J.E., Shaw S.E.J., Murphy D.V., Higgs C., Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2-D fibre array, //Electronics Letters, 2006, – №. 18, pp.– Т. 42. – С. 1024-1025.
- [4] McNaught S.J., Komine H., Weiss S.B., Simpson R., Johnson A.M., Machan J., Asman C.P., Weber M., Jones G.C., Valley M.M., Jankevics M., Burchman D., McClellan M., Sollee J., Marmo J. and Injeyan H., 100 kW coherently combined slab MOPAs //Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference. CLEO/QELS 2009. Conference on. – IEEE, 2009. – С. 1-2.
- [5] Буфетов И.А., М Бубнов.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. Волоконные Yb-, Er-Yb-и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой //Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – №. 4. – С. 328-334.
- [6] Wang X.L., Zhou P., Tao R.M., Su R.T., and Xu X.J. 670 W Single-frequency Retrievable Multi-tone All-fiber MOPA //PIERS Proceedings. – 2014. – С. 2289-2293.
- [7] Filippov V., Kerttula J., Chamorovskii Y., Golant K., and Okhotnikov O.G. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser //Optics Express. – 2010. – Т. 18. – №. 12. – С. 12499-12512.
- [8] Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Парамонов В.М. Измерение ширины линии излучения одночастотного полупроводникового лазера с использованием кольцевого волоконного интерферометра //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 656-658.