

На правах рукописи



Коляда Наталья Александровна

**Волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор частот  
стабилизированный по Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптическому стандарту  
частоты для мобильных метрологических систем**

01.04.21 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН)

**Научный руководитель:**

**Пивцов Виктор Сергеевич**

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник

**Официальные оппоненты:**

**Бабин Сергей Алексеевич**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория волоконной оптики, заведующий лабораторией

**Рубцова Наталия Николаевна**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория лазерной спектроскопии и лазерных технологий, заведующая лабораторией

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: проспект академика Лаврентьева, 15Б, г. Новосибирск-90, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института лазерной физики СО РАН (<http://www.laser.nsc.ru>)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.024.01  
при Институте лазерной физики СО РАН  
кандидат физико-математических наук



Никулин Н.Г.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность**

С каждым годом лазеры с синхронизацией мод находят все большее применение в науке и технике. Такие лазеры генерируют пико- или фемтосекундные импульсы и могут быть использованы для создания синтезатора оптических частот, который является одним из основных блоков в конструкции фемтосекундных оптических часов (ФОЧ) [1-3]. Благодаря тому, что спектр излучения таких лазеров представляет собой набор эквидистантных оптических частот (гребенка оптических частот) и при этом расстояние между соседними частотами (межмодовая частота) находится в радиодиапазоне, синтезаторы на их основе позволяют перенести стабильность оптических стандартов частоты в радиодиапазон. При этом в открытых источниках до сих пор отсутствуют сведения о разработке мобильных вариантов ФОЧ (МФОЧ) способных обеспечить долговременную нестабильность синтезируемых частот на уровне  $10^{-15} \div 10^{-16}$  и поддерживать выходные характеристики на заданном уровне непосредственно после транспортировки. Создание МФОЧ существенно более сложная задача, требующая специальных исследований особенностей функционирования различных оптико-физических схем и надежности конструкций фемтосекундных синтезаторов частот и оптических стандартов частоты в различных условиях. В то же время реализация мобильных вариантов ФОЧ позволит расширить сферу их применений не только в наземных, но и в космических областях (увеличение точности позиционирования спутниковой системы ГЛОНАСС).

В настоящее время наиболее перспективным подходом к созданию МФОЧ представляется использование волоконной оптики в качестве основы для фемтосекундного синтезатора частот. Возможность применения волоконных лазерных систем для метрологических задач уже продемонстрирована в ряде работ [4,5]. Волоконные лазеры обладают такими преимуществами: высокий КПД, малые габариты, и относительно низкая стоимость. Системы на основе

волоконных лазеров менее подвержены разъюстировке при воздействии на них вибрации и других внешних возмущений. Данные преимущества позволяют использовать волоконные лазеры с синхронизацией мод в случаях, когда требуется мобильный источник высокостабильного лазерного излучения для различных областей науки и техники (фундаментальные исследования, навигация, дальнометрия и др.). Для бортовых спутниковых систем наиболее целесообразным представляется применение лазерных систем на основе волокон легированных эрбием в силу их большей радиационной стойкости по сравнению с иттербиевыми волокнами. Рабочий диапазон длин волн эрбиевых волоконных лазеров (~1550 нм) позволяет создать цельноволокonnую конфигурацию за счет многообразия волоконных компонентов и возможности компенсации дисперсии с помощью специальных волокон. Такой подход позволяет минимизировать количество элементов схемы подверженных разъюстировке и тем самым сделать ее надежнее.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании физических основ создания компактного волоконного фемтосекундного синтезатора частот, предназначенного для переноса стабильности частоты оптического стандарта (Nd:YAG/I<sub>2</sub>) в радиодиапазон и, таким образом, для реализации на его основе МФОЧ. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить оптимальную конфигурацию задающего волоконного эрбиевого лазера с синхронизацией мод для мобильного фемтосекундного синтезатора частот.
2. Провести исследования по оптимизации характеристик высоконелинейных волокон с целью достижения эффективного уширения оптического спектра задающего фемтосекундного волоконного лазера до октавы при сравнительно низкой пиковой мощности излучения.
3. Разработать и исследовать методы стабилизации спектральных компонент излучения фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта.

4. Провести исследования для оценки нестабильности выходных частот макета МФОЧ на основе разработанного волоконного эрбиевого синтезатора, стабилизируемого по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта.

### **Научная новизна**

1. Предложен новый принцип построения составных высоконелинейных волокон, дисперсионный профиль которых изменяется от сегмента к сегменту с учетом эволюции спектра импульса. Составные волокна обеспечивают генерацию спектра перекрывающего октаву с сохранением высокой когерентности компонент и низкого уровня шумов даже при относительно низкой пиковой мощности фемтосекундного излучения.
2. Предложен новый метод стабилизации спектральных компонент излучения фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера с помощью одновременной фазовой автоподстройки оптических частот крайних спектральных компонент уширенного до октавы спектра фемтосекундного излучения по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта. Метод позволяет обеспечить полную стабилизацию генерируемой гребенки оптических частот без применения традиционно используемого для этих целей нелинейного интерферометра и, таким образом, повысить устойчивость системы к внешним возмущениям.
3. Впервые продемонстрирована возможность использования кристалла КТР (KTiOPO<sub>4</sub>) в качестве наиболее эффективного материала для реализации внутрирезонаторных фазовых электрооптических модуляторов в системе стабилизации волоконных фемтосекундных эрбиевых лазеров. Модулятор обладает миниатюрными размерами, высокой чувствительностью, низкими вносимыми оптическими потерями, низкой интенсивностью «звона» (незначительным пьезоэффектом) и низкой величиной хроматической дисперсии в сравнении с традиционно применимыми электрооптическими материалами.

4. Впервые предложен метод полной стабилизации волоконного эрбиевого синтезатора частот по оптическому стандарту частоты, основанный на использовании комбинации внутрирезонаторного электрооптического фазового модулятора и внерезонаторного акустооптического частотного модулятора в волоконном исполнении для отработки фазо-частотных возмущений.
5. Впервые исследованы физические основы создания волоконно-оптического синтезатора частот для мобильных оптических часов на основе фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера и Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта частоты.

### **Практическая значимость**

Приведённые исследования и разработки доказывают возможность создания компактного волоконно-оптического синтезатора частот для реализации мобильных фемтосекундных оптических часов (МФОЧ). В сравнении с традиционными устройствами МФОЧ, физические основы которых исследованы в данной работе, менее чувствительны к внешним возмущениям, обладают малыми габаритами и энергопотреблением. Данные преимущества позволяют в перспективе использовать МФОЧ во внелабораторных условиях для прецизионных измерений оптических и радиочастот, метрологического обеспечения навигационных, телекоммуникационных и лидарных систем.

### **Защищаемые положения:**

1. Предложенный принцип оптимизации дисперсионного профиля составных высоконелинейных оптических волокон позволяет увеличить ширину спектра маломощного волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера до октавы с сохранением когерентности спектральных компонент и низким уровнем фазовых шумов.
2. Предложенный оригинальный метод стабилизации фемтосекундного волоконного эрбиевого синтезатора частот с помощью одновременной фазовой автоподстройки оптических частот его крайних (в октавном

диапазоне) спектральных компонент по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта позволяет обеспечить полную стабилизацию выходных частот синтезатора.

3. Использование кристалла КТР позволяет создать уникальный миниатюрный электрооптический фазовый модулятор, обладающий наиболее оптимальными среди всех известных типов фазовых модуляторов характеристиками для эффективной стабилизации волоконного фемтосекундного эрбиевого синтезатора частот по Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптическому стандарту частоты.
4. Фемтосекундный эрбиевый волоконный синтезатор частот, стабилизированный по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта методом фазовой автоподстройки частот с использованием акустооптического и электрооптического модуляторов, является перспективной основой для мобильных оптических часов с относительной долговременной нестабильностью выходных частот  $\sim 10^{-15}$ .

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы доложены на следующих семинарах и конференциях: «V Российский семинар по волоконным лазерам» (Россия, г. Новосибирск, 27-30 марта 2012 г.), «The 6-th International Symposium on Modern Problems of Laser Physics», MPLP-2013 (Russia, Novosibirsk, August 25-31), «6-й Российский семинар по волоконным лазерам» (Россия, г. Новосибирск, Академгородок, 14-18 апреля 2014 г.), «XIV международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике» (Россия, г. Иркутск, 30 июня – 5 июля 2014), «16th International Conference on Laser Optics» (LO-2014) (Russia, St. Petersburg, June 30 – July 4, 2014), «V Russian-Chinese Workshop on Laser Physics and Photonics» (RCWLP&P-2015) (Russia, Novosibirsk, August 26–30, 2015), The VII International Symposium and Young Scientists School «Modern Problems of Laser Physics» (MPLP-2016) (Russia, Novosibirsk, August 22-28, 2016), «7-й Российский семинар по волоконным

лазерам» (Россия, г. Новосибирск, Академгородок, 5-9 сентября, 2016), VII Международный симпозиум «Метрология времени и пространства» (Россия, Санкт –Петербург, 14-16 сентября 2016).

### **Публикации**

Основные результаты проведенных работ опубликованы в 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах [A1 – A5], рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, получен патент Российской Федерации на полезную модель [A6].

### **Личный вклад автора**

Основные экспериментальные результаты получены автором лично. В ходе выполнения работ автор принимал активное участие в постановке задач, в обработке и обсуждении результатов, подготовке статей для публикаций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 140 страницах, содержит 69 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 96 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** перечислены преимущества волоконных лазеров с синхронизацией мод, обоснована актуальность исследования возможности создания мобильных вариантов фемтосекундных оптических часов на основе волоконного эрбиевого синтезатора частот, приведено описание проблемы на момент начала работы, сформулирована цель работы и изложено краткое содержание глав диссертации. В конце приведен список публикаций и защищаемые положения.

**В первой главе** определены методы управления спектральными и частотными характеристиками волоконных эрбиевых лазеров с синхронизацией мод. В первом разделе рассмотрены различные типы резонаторов лазеров



наиболее применимые на практике, их преимущества и недостатки. Проанализированы линейные, кольцевые и линейно-кольцевые схемы резонаторов. Во втором разделе описаны различные принципы синхронизации мод и методы их реализации. В третьем разделе рассмотрены принципы уширения спектра излучения лазера с синхронизацией мод. Проанализированы действия различных нелинейных эффектов. В четвертом разделе рассмотрены дисперсионные эффекты, влияющие на длительность импульсов. В пятом разделе приведено обоснование выбора эрбиевого волоконного лазера для реализации МФОЧ. Рабочий диапазон длин волн эрбиевых волоконных лазеров позволяет создать цельноволокonnую конфигурацию за счет многообразия волоконных компонентов и возможности компенсации дисперсии с помощью специальных волокон.

**Вторая глава** посвящена определению оптимальной конфигурации волоконного эрбиевого синтезатора частот для мобильных фемтосекундных оптических часов. В первом разделе главы приведены основные блоки синтезатора, который включает в себя задающий фемтосекундный волоконный лазер, систему увеличения ширины спектра его излучения и систему переноса стабильности оптического стандарта частоты на полученный уширенный спектр оптических частот. Во втором разделе приведено описание оптического стандарта частоты на основе стабилизированного по молекулярному йоду Nd:YAG -лазера с удвоением частоты [6], используемого для стабилизации волоконного эрбиевого синтезатора частот.

В третьем разделе главы предложен метод стабилизации спектральных компонент излучения фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера с помощью одновременной фазовой автоподстройки оптических частот крайних спектральных компонент уширенного до октавы спектра фемтосекундного излучения по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта. Приведены требования к параметрам задающего фемтосекундного лазера.

Четвертый и пятый разделы посвящены исследованиям с целью определения оптимальной схемы резонатора волоконного эрбиевого лазера. В результате была выбрана линейно-кольцевая схема резонатора с синхронизацией мод за счет эффекта нелинейной эволюции состояния поляризации в волокне. Предложенная конфигурация резонатора лазера обеспечивает самозапуск и высокую устойчивость режима синхронизации мод в лазере. Основные характеристики разработанного лазера: центральная длина волны генерации  $\sim 1,56$  мкм; ширина оптического спектра по полувысоте  $\sim 30$  нм; длительность импульсов  $\sim 220$  фс; частота повторения импульсов (межмодовая частота)  $\sim 100$  МГц; средняя выходная мощность  $\sim 15$  мВт

В шестом разделе проанализированы требования для высоконелинейных волокон увеличивающих ширину спектра волоконных лазеров для создания мобильных синтезаторов. Предложен, экспериментально и теоретически исследован принцип построения составных высоконелинейных оптических волокон (ВНЛВ) с переменной дисперсией длиной менее 1 метра [A1]. Такие волокна состоят из двух или более сегментов с разными профилями дисперсии. Принцип построения такого волокна показан на рис.1.

Преимущество составного волокна состоит в том, что изменение его дисперсионного профиля от сегмента к сегменту учитывает эволюцию спектра импульса. В итоге спектральные компоненты с максимальной интенсивностью оказываются в области нормальной дисперсии (малой по величине), благодаря этому уширение происходит в несолитонном режиме и уширенное излучение обладает высокой когерентностью. Были проведены исследования различных комбинаций составных волокон, состоящих из различных длин нелинейных волокон с дисперсионными параметрами  $D = -0,54$  и  $0,67$  пс·нм<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup> (для длины волны 1,55 мкм). В результате исследований были получены спектры перекрывающие диапазон 1-2 мкм (при средней мощности лазерного излучения 200 мВт). В последнем разделе обобщаются результаты второй главы.

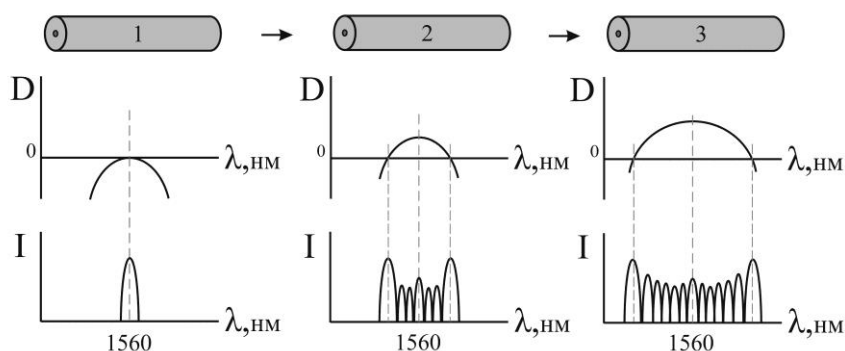


Рис.1. Концепция составного ВНЛВ: изменение дисперсионного профиля волокна и эволюция спектра ультракороткого импульса от сегмента 1 к сегменту 3.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованию волоконного эрбиевого синтезатора частот для мобильных фемтосекундных оптических часов. Первый раздел главы посвящен исследованию разработанного синтезатора частот на основе волоконного эрбиевого лазера и составного высоконелинейного волокна. Описан впервые предложенный спектрально-селективный волоконнооптический смеситель, с помощью которого осуществляется смешение частот излучения Nd:YAG/I<sub>2</sub> стандарта ( $\lambda \sim 1064$  нм) и ближайшей коротковолновой компоненты спектра оптических частот волоконного лазера. Полученный с помощью фотодиода радиочастотный сигнал биений стабилизируется путем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с помощью подстройки длины резонатора (посредством пьезоэлектрических трансляторов). При этом измеренная вносимая синтезатором частотная нестабильность составила  $\sim 4 \cdot 10^{-18}$  (за 1000 с).

Во втором разделе описано усовершенствование конструкции волоконного лазера. Для более эффективной отработки частотно-фазовых возмущений в резонатор лазера был добавлен миниатюрный электрооптический модулятор (ЭОМ) простой конструкции (по сравнению с традиционными), разработанный в ходе работ. Впервые предложено использовать кристалл КТР (калий титанил фосфат, хим. формула  $\text{KTiOPO}_4$ ) в качестве электрооптического материала для ЭОМ для стабилизации волоконного фемтосекундного лазера. Предложенный

кристалл обладает целым рядом преимуществ перед традиционно используемым кристаллом ниобата лития [7]. Ширина полосы эффективного подавления шумов системой ФАПЧ с помощью ЭОМ в итоге увеличилась с 30 до  $\sim 220$  кГц. Приведены результаты измерения РЧ спектров биений между частотой опорного Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта ( $\lambda \sim 1064$  нм) и коротковолновой ( $\lambda \sim 1064$  нм) и длинноволновой ( $\lambda \sim 2128$  нм) (удвоенной с помощью нелинейного кристалла PPLN) спектральными компонентами синтезатора. В обоих случаях фазовая автоподстройка частоты волоконного лазера осуществлялась через контроль длины резонатора лазера посредством ЭОМ и пьезотранслятора. Величина относительной случайной частотной погрешности, вносимой синтезатором, в обоих случаях составила  $\sim 1 \cdot 10^{-18}$  за 1000 сек. Далее приведены исследования по полной стабилизации волоконного синтезатора. Излучение волоконного эрбиевого лазера было разделено на две части и по отдельности усилено в малошумящих волоконных усилителях. Затем спектры излучений были уширены в высоконелинейных волокнах до диапазона 1-2 мкм. С помощью волоконных спектрально селективных смесителей были получены радиочастотные сигналы биений. Затем частота биений коротковолновой компоненты с частотой оптического стандарта была стабилизирована с помощью миниатюрного внутррезонаторного электрооптического фазового модулятора и медленного пьезотранслятора. Частота биений удвоенной длинноволновой компоненты с частотой стандарта стабилизирована с помощью внerezонаторного акустооптического частотного модулятора (АОЧМ) в волоконном исполнении (фирмы Brimrose) расположенного на выходе эрбиевого волоконного лазера, для медленных отработок были добавлены температурный контроль нескольких сантиметров волокна внутри резонатора и контроль мощности накачки лазера. Комбинация из миниатюрного внутррезонаторного ЭОМ и внerezонаторного АОЧМ впервые использована для стабилизации волоконного эрбиевого синтезатора частот.

В третьем разделе приведены результаты измерения нестабильности, вносимой волоконным синтезатором в выходные оптические частоты МФОЧ. В ходе работ были проведены одновременные долговременные измерения частот сигналов биений между опорной частотой Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта и стабилизируемыми по нему крайними компонентами спектра волоконного синтезатора. Используемый подход позволил обеспечить миллигерцовую точность привязки оптических частот. Параметр Аллана составил  $\sim 2,6 \cdot 10^{-19}$  за 1000 сек для компоненты коротковолнового края и  $\sim 1 \cdot 10^{-18}$  за 1000 сек для компоненты длинноволнового края.

В четвертом разделе приведены результаты измерения нестабильности, вносимой волоконным синтезатором в выходную радиочастоту МФОЧ (соответствует межмодовой частоте задающего волоконного синтезатора частот). Для этих целей впервые была реализована специальная схема для получения сигнала биений, который определяет разность между частотой оптического стандарта ( $f_{YAG} \sim 2,8 \cdot 10^{14}$  Гц) и удвоенной шириной стабилизированного октавного спектра оптических частот синтезатора (кратной выходной радиочастоте МФОЧ). Относительная нестабильность, вносимая в выходную радиочастоту МФОЧ дополнительно к нестабильности опорного оптического стандарта, находится в диапазоне значений от  $\sim 5 \cdot 10^{-17}$  за 1 сек до  $\sim 2 \cdot 10^{-18}$  за 1000 сек. Это на несколько порядков величины меньше, чем собственная нестабильность частоты опорного оптического стандарта, использованного в данной работе.

В пятом разделе приведены результаты измерения нестабильности выходной радиочастоты МФОЧ путем сравнения с радиочастотой водородного стандарта пассивного типа Ч1-1006. Для этого были проведено долговременное измерение низкой разностной частоты ( $\sim 3$  кГц) между межмодовой частотой синтезатора и частотой вспомогательного опорного РЧ генератора (Rohde&Schwarz 1090.3000.11), стабилизированного по водородному стандарту. Рассчитанные по результатам измерения значения нестабильности

(представлены на рис. 2) в диапазоне ошибок совпадают с паспортными характеристиками нестабильности используемого водородного стандарта. Это свидетельствует о том, что основной вклад в измеренную величину взаимной нестабильности дает водородный стандарт частоты совместно со стабилизированным по нему генератором.

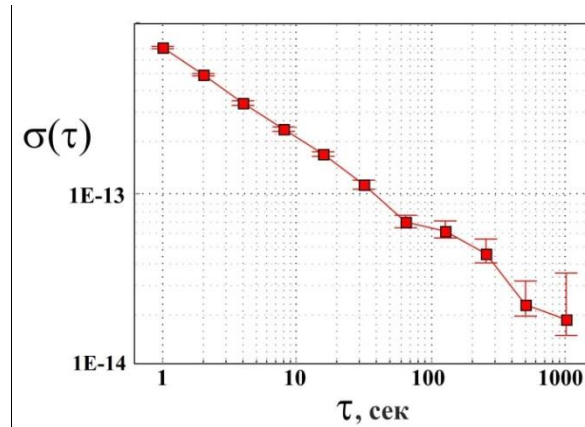


Рис. 2 Параметр Аллана для взаимной нестабильности выходной радиочастоты ФОЧ ( $f_{rep}$ ) и частоты вспомогательного опорного РЧ генератора, стабилизированного по частоте пассивного водородного стандарта.

Учитывая значение относительной нестабильности водородного стандарта частоты (а также вносимую нестабильность вспомогательного РЧ генератора), можно оценить значения нестабильности выходной радиочастоты ФОЧ по формуле:

$$\sigma_{M\text{FOЧ}}(\tau) = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2(\tau) - \sigma_{\text{BCЧ}}^2(\tau) - \sigma_{\text{ген}}^2(\tau)},$$

где  $\sigma_{\Sigma}^2(\tau)$  – вариация Аллана для взаимной нестабильности,  $\sigma_{\text{BCЧ}}^2(\tau)$  – вариация Аллана для нестабильности частоты водородного стандарта,  $\sigma_{\text{ген}}^2(\tau)$  – вариация Аллана для нестабильности РЧ генератора,  $\tau$  - время.

Оценка подтверждает, что значения  $\sigma_{M\text{FOЧ}}(\tau)$  близки к значениям относительной нестабильности частоты опорного оптического стандарта используемого в составе ФОЧ ( $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  за 1 сек,  $\sim 4 \cdot 10^{-15}$  за  $10^4$  сек).

**Заключение содержит основные результаты работы:**

1. Для создания мобильного синтезатора частот проведены исследования с целью выбора оптимальной схемы резонатора волоконного эрбиевого лазера с синхронизацией мод. Предложенная конфигурация резонатора обеспечивает самозапуск, высокую устойчивость режима синхронизации мод и обладает возможностью стабилизации оптической длины и подстройки хроматической дисперсии резонатора.
2. В ходе работ предложен принцип построения составных высоконелинейных волокон, дисперсионный профиль которых изменяется от сегмента к сегменту с учетом эволюцию спектра импульса и проведены их исследования. Составные волокна обеспечивают генерацию спектра перекрывающего октаву, с сохранением высокой когерентности компонент и низкого уровня шумов даже при сравнительно низкой пиковой мощности ( $< 10$  кВт) фемтосекундного излучения и малой ( $\leq 1$  м) длине волокна.
3. Предложен новый метод стабилизации спектральных компонент излучения фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера с помощью одновременной фазовой автоподстройки оптических частот крайних спектральных компонент уширенного до октавы спектра фемтосекундного излучения по частоте Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта. Метод позволяет обеспечить полную стабилизацию генерируемой гребенки оптических частот без применения традиционно используемого для этих целей нелинейного интерферометра. Это позволяет реализовать более компактную и устойчивую к внешним возмущениям систему.
4. Предложена и применена оригинальная схема смешения оптических сигналов с использованием волоконно-оптических элементов. Такой подход позволил реализовать более компактную и устойчивую к внешним возмущениям систему детектирования биений между оптическими частотами в системе стабилизации МФОЧ.
5. Показано, что на основе кристалла КТР (KTiOPO<sub>4</sub>) может быть изготовлен наиболее эффективный миниатюрный фазовый электрооптический

модулятор для применения в резонаторе задающего волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера. Разработанный модулятор используется для формирования быстродействующей петли обратной связи в системе ФАПЧ и позволяет осуществлять эффективную стабилизацию спектральных компонент излучения волоконного фемтосекундного лазера по частоте опорного оптического стандарта, подавляя шумы в широкой полосе частот (до нескольких сотен килогерц).

6. Впервые для стабилизации волоконного эрбиевого синтезатора частот была использована комбинация из миниатюрного внутррезонаторного электрооптического фазового модулятора и внрезонаторного акустооптического частотного модулятора в волоконном исполнении. Выбранный подход позволил реализовать полосы отработки систем ФАПЧ шириной  $\sim 200$  кГц и  $\sim 100$  кГц в соответствующих петлях обратной связи.
7. В качестве опорного сигнала для систем ФАПЧ в данной работе впервые используется межмодовая частота разработанного синтезатора. Таким образом, стабилизация волоконного синтезатора происходит только по частоте оптического стандарта без использования дополнительных стабильных РЧ генераторов, что уменьшает габариты МФОЧ и упрощает его транспортировку.
8. Экспериментально измеренная величина вносимой синтезатором относительной частотной нестабильности (аддитивной к собственной нестабильности опорного оптического стандарта) составляет  $\sim 10^{-18}$  (за времена усреднения 1000 с). Проведенная по результатам измерений оценка показала, что относительная нестабильность выходной радиочастоты МФОЧ соответствует значениям нестабильности используемого опорного оптического стандарта, которые находятся в диапазоне от  $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  за 1 сек до  $\sim 4 \cdot 10^{-15}$  за  $10^4$  сек.

Полученные результаты подтверждают возможность использования волоконного синтезатора для создания на его основе мобильных фемтосекундных оптических часов.



### Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. Korel I., Nyushkov B.N., Denisov V.I., Pivtsov V.S., Koliada N.A., Sysolyatin A.A., Ignatovich S.M., Kvashnin N.L., Skvortsov M.N. and Bagaev S.N. Hybrid highly-nonlinear fiber for spectral supercontinuum generation in mobile femtosecond clockwork // *Laser Physics*. – 2014. – Vol. 24, no. 7. – P. 074012.
- A2. Пивцов В.С., Ньюшков Б.Н., Корель И.И., Коляда Н.А., Фарносов С.А., Денисов В.И. Разработка прототипа компактного волоконного синтезатора частот для мобильных фемтосекундных оптических часов // *Квантовая Электроника*. – 2014. – Том 44, № 6. – Стр. 507-514.
- A3. Ньюшков Б.Н., Пивцов В.С., Коляда Н.А., Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. Стабилизация волоконного фемтосекундного лазера по оптическому стандарту частоты с использованием электрооптического кристалла КТР // *Квантовая Электроника*. – 2015. – Том 45, № 5. – С. 486-491.
- A4. Коляда Н.А., Ньюшков Б.Н., Пивцов В.С., Дычков А.С., Фарносов С.А., Денисов В.И., Багаев С.Н. Стабилизация волоконного синтезатора частот с использованием акустооптического и электрооптического модуляторов // *Квантовая Электроника*. – 2016. – Том 46, № 12. – С. 1110-1112.
- A5. Bagaev S.N., Denisov V.I., Dychkov A.S., Koliada N.A., Nyushkov B.N., Pivtsov V.S., Farnosov S.A. Fiber-based femtosecond optical frequency comb stabilized to iodine frequency standard // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 793, no. 1. – art.no. 012003.
- A6. Миниатюрный внутрирезонаторный электрооптический модулятор фазы лазерного излучения: пат. 161626 Рос. Федерация: МПК H01S 3/107, G02F 1/03 / Пивцов В.С., Ньюшков Б.Н., Коляда Н.А., Денисов В.И., Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Примаков Д.Ю.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук. - № 2105135814/28; заявл. 24.08.2015; опубл. 27.04.2016, Бюл. № 12.

### Список цитируемых работ

1. Droste S., Ycas G., Washburn B.R., Coddington I., Newbury N.R. Optical frequency comb generation based on erbium fiber lasers // *Nanophotonics*. – 2016. – Vol. 5, no. 2. – P. 196-213.
2. Bagayev S.N., Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F. Femtosecond combs for precision metrology // *Laser Physics*. – 2004. – Vol. 14, no. 11. – P. 1367 -1374.
3. Udem Th., Holzwarth R., Hansch Th. Femtosecond optical frequency combs // *Eur. Phys. J. Special Topics*. – 2009. – Vol. 172, no. 1. – P. 69-79.
4. Adler F., Moutzouris K., Leitenstorfer A., Schnatz H., Lipphardt B., Grosche G., Tauser F. Phase-locked two-branch erbium-doped fiber laser system for long-term precision measurements of optical frequencies // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12, no. 24. – P. 5872-5880.
5. Губин М.А., Киреев А.Н., Конященко А.В., Крюков П.Г., Таусенев А.В., Тюриков Д.А., Шелковников А.С. Реализация компактных метановых оптических часов // *Квантовая электроника*. – 2008. - Том 38, № 7 – С. 613-614.
6. Скворцов М.Н., Охапкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н. Оптический стандарт частоты на основе Nd:YAG-лазера, стабилизированного по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде с использованием второй гармоники излучения // *Квантовая электроника*. – 2004. – Том 34, № 12. – С. 1101-1106.
7. Hudson D.D., Holman K.W., Jones R.J., Cundiff S.T., Ye J., and Jones D.J. Mode-locked fiber laser frequency-controlled with an intracavity electro-optic modulator // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30, no. 21. – P. 2948-2950.