

**Отзыв
официального оппонента
на диссертацию Коляда Натальи Александровны
«Волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор частот
стабилизированный по Nd:YAG/I₂ оптическому стандарту частоты
для мобильных метрологических систем»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук,
специальность 01.04.21 – лазерная физика**

Актуальность темы обоснована в автореферате и во введении диссертационной работы Н.А. Коляда. Современная метрология и навигация, несомненно, нуждаются в мобильных системах типа оптических часов высокой стабильности, реализация которых возможна на основе фемтосекундных генераторов излучения. В диссертации отмечается отсутствие доступных литературных данных о разработке мобильных вариантов фемтосекундных оптических часов (ФОЧ) с долговременной стабильностью синтезируемых частот на уровне $10^{-15} \div 10^{-16}$, поддерживающих выходные характеристики во внелабораторных условиях после транспортировки. **Цель работы** – исследование научных основ создания компактного фемтосекундного синтезатора частот, предназначенного для переноса в радиодиапазон стабильности оптического стандарта Nd:YAG/I₂, разработанного в ИЛФ СО РАН – сформулирована чётко. В диссертации перечислены **конкретные задачи**, которые были успешно решены.

Текст диссертационной работы Н.А. Коляда состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и включает 139 страниц текста, 96 наименований цитированной литературы, 69 рисунков.

Первая глава диссертации Н.А. Коляда представляет критический обзор работ по волоконным лазерам с синхронизацией мод. В ней рассмотрены различные типы резонаторов, основные принципы синхронизации мод, механизмы и способы технического воплощения активной и пассивной синхронизации мод волоконных лазеров. В этой же главе проанализированы нелинейные процессы, приводящие к уширению спектра излучения волоконных лазеров с синхронизацией мод, а также процессы дисперсии коэффициента преломления, изменяющие длительность импульсов. В конце главы рассмотрены активные среды волноводных лазеров, определены преимущества использования волоконных эрбиевых лазеров для реализации мобильных ФОЧ.

Вторая глава излагает результат поиска оптимальной конфигурации синтезатора частот на основе волоконного эрбиевого лазера с синхронизацией мод, стабилизированного по мобильному стандарту частоты Nd³⁺:YAG/I₂. Исследуется

контролируемое уширение спектра волоконного лазера с помощью составных волокон и волокон с постоянной по длине волокна дисперсией коэффициента преломления – сначала путём расчётов, затем экспериментов. Показаны преимущества составных волокон: при длине уширяющего высоко-нелинейного волокна менее одного метра суперконтиум занимал требуемый диапазон спектра ($1 - 2$ мкм), и не было необходимости в большой мощности лазерного излучения. Составные волокна были разработаны и изготовлены совместно с НЦВО РАН. Простое объяснение эффективного уширения спектра дано с помощью модели с разделением нелинейных и дисперсионных эффектов. Наиболее эффективное уширение происходит, когда интенсивность (и, значит, нелинейность) высока, а дисперсия мала. Поэтому сначала спектр уширялся в районе центральной длины волны; затем энергия распространялась в обоих спектральных направлениях; на последнем этапе использованы сегменты волокон с точками нулевой дисперсии, расположенными всё дальше от центральной длины волны.

В работе выбран линейно-кольцевой резонатор лазера с синхронизацией мод с помощью эффекта нелинейной эволюции состояния поляризации (НЭСП) в волокне. Вариант с коммерческим зеркалом с насыщающимся поглощением (SESAM) оказался неприемлемым из-за того, что ограничивал ширину оптического спектра излучения лазера и увеличивал длительность импульсов за счет большого времени релаксации (вероятно, в SESAM использовались квантовые ямы, разделенные толстыми барьерами).

Для исследования свойств высоко-нелинейных составных волокон использовался волоконно-оптический усилитель, разработанный в ИАиЭ СО РАН (усиление средней мощности эрбьевого лазера от 15 до 200 мВт). Были проанализированы характеристики высоко-нелинейных составных волокон и показано экспериментально, что они обеспечивают эффективную генерацию октавной гребенки оптических частот с относительно высокой интенсивностью на краях спектра при умеренной мощности фемтосекундного излучения и при малой (дециметровой) длине волокна.

Кроме того, во второй главе проверялась возможность динамического контроля и подстройки длины резонатора с помощью пьезокерамического стретчера волокна (ПСВ); в дальнейшем этот подход использовался для активной стабилизации межмодовой частоты лазера.

Третья глава, наиболее объемная, посвящена разработке мобильного волоконного эрбьевого синтезатора частот и стабилизации его частоты по частоте Nd:YAG/I₂-оптического стандарта.

В разделе 3.1 представлена схема определения фазовой нестабильности, которую вносит эрбьевый волоконный синтезатор частот в характеристику мобильных оптических

часов. Излучение уширенной до октавы гребенки оптических частот попадает в спектрально-селективный волоконно-оптический смеситель, в котором частота излучения Nd:YAG/I₂ оптического стандарта смещивается с ближайшей коротковолновой компонентой гребенки оптических частот, образуя частоту биений δf_1 . Эта частота сравнивается с опорным сигналом от промышленного водородного стандарта и стабилизируется системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) по сигналам отработки медленного (быстродействие менее 100 Гц) и быстрого (до 30 кГц) колец обратной связи. Эффективность работы системы фазовой автоподстройки показана по сужению радиочастотного спектра сигнала биений и по приближению формы линии к лоренцевской, а также по подавлению шумов в полосе до 25 кГц. Для предотвращения выхода системы ФАПЧ из рабочего диапазона медленного кольца резонатор задающего волоконного фемтосекундного лазера был термостабилизирован с точностью до 0.1 °С.

Относительная нестабильность радиочастоты сигнала биений δf_1 не превышала $1,2 \cdot 10^{-10}$ за 1000 с; это значение складывается из случайных отклонений частоты синтезатора от опорного сигнала и из нестабильности частоты самого оптического стандарта. Пересчет среднеквадратичной величины относительных случайных отклонений ближайшей оптической частоты синтезатора от частоты опорного оптического стандарта дал величину относительной нестабильности $4,0 \cdot 10^{-18}$ за 1000 с.

Таким образом, было доказано, что разработанная система ФАПЧ синтезатора способна обеспечить перенос долговременной стабильности всех доступных на сегодняшний день оптических стандартов частоты на синтезируемые частоты оптического диапазона и радиодиапазона без существенного ухудшения.

В том же подразделе проанализирована возможность абсолютной стабилизации частот оптической гребенки синтезатора на основе фемтосекундного волоконного эрбийевого лазера. Для предварительного измерения частоты смещения f_{offset} (для последующей привязки по фазе к опорной радиочастоте) использован одноплечевой f -2 f интерферометр. Из-за сложностей совмещения во времени импульсов излучения на основной и удвоенной частоте было принято решение далее использовать новый метод стабилизации оптической гребенки – без использования интерферометра, с отдельной привязкой длинноволнового и коротковолнового края оптической гребенки к частоте оптического стандарта.

В подразделе 3.2 рассмотрены новые комбинации высоко-нелинейных волокон, а также новый оптический усилитель. Их применение позволило обеспечить необходимые для работы ФАПЧ уровни сигналов биений во всем диапазоне спектра оптической гребенки. При этом пришлось принять во внимание эффект комбинационного рассеяния

излучения, изменяющего спектр в длинном волокне. Стабилизация частот δf_1 и δf_2 с помощью петель обратной связи приводит к полной стабилизации фемтосекундной гребенки оптических частот. Данный метод стабилизации фемтосекундной гребенки по частоте оптического стандарта без использования f_2f интерферометра предложен и реализован впервые и позволил существенно упростить экспериментальную схему.

Для более эффективного динамического контроля длины резонатора и лучшей отработки частотно-фазовых возмущений в резонатор задающего фемтосекундного волоконного лазера был добавлен миниатюрный электрооптический модулятор (ЭОМ), разработанный самостоятельно. Модулятор на основе КТР имел (на длине волн генерации задающего фемтосекундного волоконного эрбиеевого лазера) на 30% выше величину электрооптического эффекта, существенно более низкий уровень пьезоэлектрического эффекта и меньшую величину хроматической дисперсии по сравнению с другими известными кристаллами. В новой схеме волоконного эрбиеевого лазера этот ЭОМ, разработанный на основе КТР, использовался в петле быстрой обратной связи. Исследование новой конструкции синтезатора частот показали, что в свободном режиме работы синтезатора сигнал биений испытывает частотные возмущения (РЧ спектр сигнала уширен акустическим джиттером до 0,5 МГц) и, как следствие, имеет форму спектра, отличную от лоренцевской. Включение автоподстройки ФАПЧ-1 привело к стабилизации частоты биений δf_1 синтезатора частот в коротковолновой области со стандартом частоты Nd:YAG/I₂ и к сужению РЧ спектра до субгерцовой ширины с приближением формы линии к лоренцевской. Ширина полосы эффективного подавления шумов системой ФАПЧ-1 была оценена в ~ 220 кГц, удалось также удалить медленный дрейф частоты биений. Экспериментально найдена оптимальная для работы ФАПЧ-1 частота сигнала биений (по наилучшему отношению сигнал/шум биений и наименьшему уровню помех) – 20 МГц. Исследования случайных отклонений стабилизированной частоты биений δf_1 синтезатора частот в коротковолновой области с оптическим стандартом показали, что, в результате усовершенствования оптической схемы синтезатора частот, погрешности, вносимые ФАПЧ, оказались на порядок меньше измеренных ранее.

Характеристики нового синтезатора частот на основе фемтосекундного волоконного эрбиеевого лазера исследовались также по РЧ спектрам биений δf_2 второй гармоники длинноволновой ($\lambda \sim 2128$ нм) части спектра с оптическим стандартом. Результаты с использованием ФАПЧ-2 сравнимы с предыдущим случаем для коротковолновой компоненты.

В этом же подразделе решалась и более сложная задача одновременной стабилизации коротковолнового и длинноволнового края гребенки оптических частот. В этой схеме стабилизации частот были использованы внутрирезонаторный ЭОМ, а также коммерческий акустооптический частотный модулятор (АОЧМ) в волоконном исполнении вне резонатора фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера. Оптоэлектронная схема одновременной стабилизации частот коротковолнового и длинноволнового края гребенки оптических частот включала две системы ФАПЧ. Первая система аналогична представленной ранее для стабилизации частоты по коротковолновому краю; она включает быстрое кольцо обратной связи на внутрирезонаторном ЭОМ и медленное кольцо на пьезокерамическом трансляторе (на котором закреплено зеркало линейной части резонатора). Вторая ФАПЧ имеет три кольца обратной связи: быстрое кольцо, замкнутое на АОЧМ вне резонатора; медленное кольцо, включающее связь с током диодного лазера накачки; и сверх-медленное кольцо, замкнутое на ток элемента Пельтье, нагревающего участок волокна эрбиевого лазера. В результате, элементы отработки возмущений частоты δf_1 контролировали длину резонатора, то есть частоту повторения импульсов f_{rep} , а элементы отработки возмущений частоты δf_2 , в основном, контролировали частоту смещения гребенки f_{offset} . Таким образом, механизмы отработки практически не конфликтуют между собой, и возможна одновременная стабилизация двух сигналов биений.

Выбранный подход позволил реализовать полосы быстрой отработки ФАПЧ шириной ~ 200 кГц и ~ 100 кГц в соответствующих петлях обратной связи (ОС). Такая комбинация широкополосных петель обратной связи была впервые реализована в волоконном эрбиевом фемтосекундном генераторе-синтезаторе оптических частот.

Кроме существенного изменения схемы стабилизации частот, была также изменена схема синтезатора частот на основе волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера. Она была дополнена вторым волоконно-оптическим РМ (Polarization maintaining) усилителем высокой мощности (разработка совместно с ИАиЭ) и вторым высоко-нелинейным волокном для уширения спектра (высоко-нелинейные уширяющие РМ волокна компании Menlo Systems). Были также использованы спектрально-селективные смесители с сохранением поляризации излучения. Для того чтобы получить необходимую для работы ФАПЧ мощность излучения, в схему уширения спектра эрбиевого лазера был добавлен волоконный эрбиевый предусилитель мощности собственного производства.

Подраздел 3.3 излагает результаты исследования нестабильности, вносимой волоконным синтезатором частот в выходные характеристики мобильного фемтосекундного оптического стандарта частоты (МФОЧ). Были проведены

одновременные долговременные прецизионные измерения частот сигналов биений δf_1 и δf_2 между опорным оптическим стандартом частоты и стабилизируемыми по нему крайними компонентами ($\lambda_1 \sim 1064$ нм, и $\lambda_2 \sim 2128$ нм) октавной гребенки оптических частот синтезатора с эквидистантными межмодовыми интервалами, формирующими выходную радиочастоту МФОЧ. Точность привязки частот оптической гребенки синтезатора к стандарту была на уровне 10^{-3} Гц. Относительная долговременная нестабильность частоты стандарта равнялась 10^{-15} . Исследования показали несколько большие девиации частоты длинноволнового края гребенки ($\lambda_2 \sim 2128$ нм) относительно частоты опорного оптического стандарта частоты, чем коротковолновый край ($\lambda_1 \sim 1064$ нм), что объясняется различием в реализации систем ФАПЧ для указанных компонент гребенки оптических частот и разной шириной полос отработки в петлях обратной связи. Тем не менее, даже наихудшее значение отклонения оптических частот достаточно мало: $\sim 1 \cdot 10^{-18}$ за 1000 сек.

Подраздел 3.4 излагает результаты исследования нестабильности, вносимой волоконным синтезатором в выходную радиочастоту МФОЧ. Анализировалось поведение во времени разности $2\delta f_1 - \delta f_2$ в диапазоне радиочастоты (30 МГц) с использованием в качестве опорной частоты водородного стандарта пассивного типа Ч1-1006. Измерения показали, что нестабильность, вносимая в выходную радиочастоту МФОЧ (аддитивно к нестабильности опорного оптического стандарта), находится в диапазоне значений от $\sim 5 \cdot 10^{-17}$ за 1 сек до $\sim 1 \cdot 10^{-18}$ за 1000 сек, что на несколько порядков величины меньше собственной нестабильности оптического стандарта частоты. Таким образом, в работе показано, что перенос стабильности оптического стандарта частоты в радиодиапазон возможен с минимальными потерями точности.

В подразделе 3.5 рассмотрен вопрос об измерении нестабильности выходной радиочастоты МФОЧ. Полное решение этой задачи возможно путём сравнения с радиочастотой, имеющей такую же или меньшую нестабильность, либо от второго экземпляра ФОЧ аналогичной конструкции, либо, при отсутствии вторых ФОЧ, от высокостабильного микроволнового стандарта частоты (например, водородного). В диссертационной работе выполнены измерения путем сравнения с радиочастотой водородного стандарта пассивного типа Ч1-1006. Показано, что основной вклад в измеренную величину взаимной нестабильности дает водородный стандарт частоты совместно со стабилизированным по нему генератором.

В подразделе 3.6 перечислены основные выводы из исследований главы 3. В Заключении изложены основные результаты диссертационной работы Н.А. Коляда, а также выражаются благодарности научному руководителю диссертационной работы и сотрудникам организаций, с которыми автор диссертации работал на протяжении многих

лет. В конце текста приведен список сокращений и условных обозначений, делающий прочтение работы более удобным.

В результате выполнения диссертационной работы Н.А. Коляда исследованы научные основы и экспериментально подтверждена возможность создания мобильных фемтосекундных оптических часов на основе эрбииевого волоконного синтезатора частот. Определена нестабильность, которую вносит разработанный волоконный синтезатор в выходные оптические и радиочастоты МФОЧ; проведены предварительные измерения выходной радиочастоты МФОЧ. **Научная новизна и практическая значимость работы не вызывают сомнения.**

Диссертационная работа написана ясным, понятным языком. Незначительное количество опечаток не снижает общего положительного впечатления. Автореферат вполне отражает основное содержание диссертации.

Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, и её автор, Коляда Наталья Александровна, достойна присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Отзыв составила:

Доктор физико-математических наук,
заведующая лабораторией
лазерной спектроскопии и лазерных технологий
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физики полупроводников
им. А.В. Ржанова Сибирского отделения
Российской академии наук (ИФП СО РАН)

 – Н.Н. Рубцова

Почтовый адрес:

630090, проспект Академика Лаврентьева, 13, ИФП СО РАН,
тел. +7(383)333-27-69, электронный адрес: rubtsova@isp.nsc.ru

Подпись Н.Н. Рубцовой заверяю.

Учёный секретарь ИФП СО РАН,
к.ф.-м.н.



С.А. Аржаникова