

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Новосибирский
национальный исследовательский
государственный университет»
Чл.-корр. РАН, профессор

М.П. Федорук



«15» февраля 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Коляда Натальи Александровны «Волоконный фемтосекундный эрбийевый синтезатор частот стабилизированный по Nd:YAG/I₂ оптическому стандарту частоты для мобильных метрологических систем», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертационная работа Коляда Натальи Александровны посвящена исследованию физических основ создания компактного волоконного фемтосекундного синтезатора частот, предназначенного для переноса стабильности частоты оптического стандарта (Nd:YAG/I₂) в радиодиапазон и, таким образом, для реализации на его основе мобильных фемтосекундных оптических часов (МФОЧ). Синтезатор частот используется для деления частоты оптического стандарта и тем самым обеспечивает возможность прямого синтеза стандартных радиочастот со стабильностью и точностью оптического стандарта. МФОЧ должны обеспечивать долговременную нестабильность синтезируемых частот на уровне $10^{-15} \div 10^{-16}$ и поддерживать выходные характеристики на заданном уровне непосредственно после транспортировки. В настоящее время одним из наиболее перспективных подходов к созданию МФОЧ является использование волоконной оптики в качестве основы для фемтосекундного синтезатора

частот. Волоконные лазеры обладают целым рядом преимуществ, в числе которых 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, дальномерия и др.). В частности, одной из наиболее актуальных прикладных задач, которая может быть решена с использованием МФОЧ, является повышение точности глобальных спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС).

Несмотря на успешную демонстрацию возможности создания фемтосекундных синтезаторов частот на основе волоконных лазеров, в открытых источниках до сих пор отсутствуют сведения о разработке мобильных вариантов ФОЧ, способных обеспечить долговременную стабильность синтезируемых частот на уровне $10^{-15} \div 10^{-16}$ и поддерживать выходные характеристики на заданном уровне во внелабораторных условиях непосредственно после транспортировки. Создание мобильных ФОЧ – 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. При разработке синтезатора для МФОЧ основное внимание должно быть уделено схеме и конструкции задающего волоконного фемтосекундного лазера и системам его стабилизации. Кроме того, мобильные ФОЧ должны обладать малыми габаритами ($1\text{-}2\text{ м}^3$) и низким уровнем энергопотребления.

Цель диссертационной работы Н.А. Коляда «Волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор частот стабилизированный по Nd:YAG/I₂ оптическому стандарту частоты для мобильных метрологических систем» состоит в исследовании физических основ создания компактного волоконного фемтосекундного синтезатора частот, предназначенного для переноса стабильности частоты оптического стандарта (Nd:YAG/I₂) в радиодиапазон и, таким образом, для реализации на его основе МФОЧ. Данная цель является актуальной и представляет большой практический и научный интерес.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы.

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 представлен литературный обзор. Определены методы управления спектральными и частотными характеристиками волоконных эрбьевых лазеров с синхронизацией мод. Рассмотрены различные типы резонаторов лазеров наиболее применимые на практике, их преимущества и недостатки. Описаны различные принципы синхронизации мод и методы их реализации. Рассмотрены принципы уширения спектра излучения лазера с синхронизацией мод. Проанализированы действия различных нелинейных эффектов. Рассмотрены дисперсионные эффекты, влияющие на длительность импульсов. Приведено обоснование выбора эрбевого волоконного лазера для реализации МФОЧ.

Во второй главе определены основные блоки фемтосекундного синтезатора частот (СЧ) и приведено описание характеристик Nd:YAG/I₂ - оптического стандарта частоты, используемого для стабилизации волоконного эрбьевого синтезатора частот. Рассмотрен принцип, взятый за основу для создания мобильных ФОЧ. Приведены результаты исследований с целью определения оптимальной конфигурации волоконного лазера с синхронизацией мод для СЧ. Приведены исследования различных комбинаций составных волокон и волокон с постоянной дисперсией для контролируемого уширения спектра волоконного лазера.

В третьей главе приведены исследования, подтверждающие возможность реализовать мобильные фемтосекундные оптические часы на основе эрбевого волоконного синтезатора частот. Определена нестабильность, которую вносит разработанный волоконный синтезатор в выходные оптические и радиочастоты МФОЧ. Продемонстрировано, что разработанные и реализованные для синтезатора системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) могут обеспечить перенос долговременной стабильности оптических стандартов частоты на синтезируемые частоты. При этом минимально достижимая вносимая частотная нестабильность может составлять 10^{-18} за время усреднения 1000 с. Измерения показали, что нестабильность выходной радиочастоты МФОЧ на данном этапе работы ограничена нестабильностью измерительной системы и совпадает с параметрами использованного водородного стандарта пассивного типа Ч1-1006.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Наиболее значимыми результатами являются следующие:

1. 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 (≤ 1 м) длине волокна.

2. Предложен новый метод стабилизации спектральных компонент излучения фемтосекундного эрбьевого волоконного лазера с помощью одновременной фазовой автоподстройки оптических частот крайних спектральных компонент уширенного до октавы спектра фемтосекундного излучения по частоте Nd:YAG/I₂ 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.
3. Показано, что на основе кристалла КТР (KTiOPO₄) может быть изготовлен наиболее эффективный миниатюрный фазовый электрооптический модулятор для применения в резонаторе задающего волоконного фемтосекундного эрбьевого 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).
4. Впервые для стабилизации волоконного эрибьевого синтезатора частот была использована комбинация из миниатюрного внутрирезонаторного электрооптического фазового модулятора и внerezонаторного акустооптического частотного модулятора в волоконном исполнении. Выбранный подход позволил реализовать полосы отработки систем ФАПЧ шириной ~ 200 кГц и ~ 100 кГц в соответствующих петлях обратной связи.
5. 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.

Обоснованность и достоверность результатов и защищаемых положений подтверждается использованием современных эффективных экспериментальных методов и подходов, а также апробацией основных результатов на всероссийских и международных научных конференциях и семинарах, и публикацией в ведущих рецензируемых журналах.

Научная значимость результатов заключается в разработке нового принципа построения высоконелинейных волокон для уширения спектра фемтосекундного волоконного эрбьевого лазера. Предложен новый метод стабилизации спектральных компонент излучения фемтосекундного волоконного эрбьевого лазера по частоте оптического стандарта. Впервые исследованы физические основы создания волоконно-оптического синтезатора частот для мобильных оптических часов на основе фемтосекундного волоконного эрбьевого лазера и Nd:YAG/I₂ оптического стандарта частоты.

Приведенные исследования и разработки доказывают возможность создания компактного волоконно-оптического синтезатора частот для реализации мобильных фемтосекундных оптических часов (МФОЧ), что имеет огромную *практическую значимость*. 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.

Апробация результатов, полученных в диссертационной работе, проведена на девяти российских и международных научных семинарах и конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в пяти научных статьях в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, включая *Laser Physics*, *Journal of Physics: Conference Series* и Квантовую электронику. Кроме того, получен патент Российской Федерации на полезную модель. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе:

1. Во введении не обосновано использование Nd:YAG/I₂ стандарта частоты.
2. Стр. 82. Не показано, как производился пересчет параметра Аллана от радиочастоты к оптической частоте.

Сделанные замечания не снижают ценности полученных результатов и высокой оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа Н.А. Коляда выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное исследование. Результаты работы оригинальны и имеют высокую научную и практическую ценность.

Таким образом, диссертационная работа Н.А. Коляда «Волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор частот стабилизированный по Nd:YAG/I₂ оптическому стандарту частоты для мобильных метрологических систем» соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), а ее автор Коляда Наталья Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Отзыв на диссертацию Н.А. Коляда рассмотрен на объединенном семинаре отдела лазерной физики и инновационных технологий НГУ и лаборатории волоконных лазеров физического факультета НГУ «15» февраля 2018 года.

Отзыв подготовил

старший научный сотрудник отдела лазерной физики
и инновационных технологий НГУ, к.ф.-м.н.

С.В. Смирнов

Секретарь семинара

научный сотрудник лаборатории
волоконных лазеров ФФ НГУ, к.ф.-м.н.

И.Д. Ватник