

На правах рукописи

ШЕЛКОВНИКОВ Александр Сергеевич

**РЕЗОНАНСЫ НАСЫЩЕННОЙ ДИСПЕРСИИ МЕТАНА
С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ШИРИНОЙ 10^{-9} - 10^{-12} ДЛЯ ЗАДАЧ СТАНДАРТОВ
ЧАСТОТЫ И ЗАДАЮЩИЙ РАДИО ГЕНЕРАТОР НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.21 – «Лазерная физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2013

Работа выполнена в **Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук**

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Губин Михаил Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Дмитриев Александр Капитонович,
Новосибирский государственный технический
университет

доктор физико-математических наук, профессор
Киреев Сергей Васильевич,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Ведущая организация: ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений»

Защита состоится ____ июня 2013 г. в 12 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 002.023.03 при Физическом институте
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 Москва,
Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук,
профессор

А.С. Шиканов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Разработка высокоточных квантовых стандартов частоты (КСЧ) и частотно-временные измерения на их основе – одно из фундаментальных направлений квантовой радиофизики, начавшейся с создания КСЧ на основе мазеров, сначала на инверсионном переходе молекул аммиака, а затем на переходе между уровнями сверхтонкой структуры атомов водорода [1,2,3].

Помимо исключительной важности исследований по повышению стабильности и точности частотной и временной шкал для фундаментальной науки (прецизионная спектроскопия, фундаментальные физические эксперименты, астрофизика и радиоастрометрия, использующие интерферометры со сверхдлинной базой, и др.), существенно расширилась практическая сфера применений результатов таких исследований. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС / GPS имеют своей целью создание глобального «координатно-временного поля», доступного в любой точке Земли и в ближайшем (до 2000 км) космосе, позволяющего производить высокоточные измерения координат и времени для задач навигации, управления, синхронизации приема-передачи информации между удаленными объектами, и т.д. Центральными элементами, определяющими точность синхронизации всех наземных и бортовых элементов этих систем, являются КСЧ, как активного типа на основе Н-мазеров, так и пассивного на основе цезиевых и рубидиевых реперов, пассивных Н-мазеров [4].

Прогресс этих навигационных систем, в частности при определении координат в реальном масштабе времени с точностью 10 см и менее, в определяющей степени зависит от улучшения стабильности и точности КСЧ. Для следующего поколения спутниковых навигационных систем стоит задача создания КСЧ с точностью $\sim 10^{-17}$ и суточной стабильностью до $1 \cdot 10^{-16}$. Возможность столь радикального повышения точности и стабильности связана с использованием реперных переходов в оптическом диапазоне спектра и созданием лазерных стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов в световых и электромагнитных ловушках [5].

Общие принципы и преимущества применения лазеров в стандартах частоты были перечислены еще в первом отечественном обзоре, посвященном оптическим стандартам частоты (ОСЧ) [6]. Однако несколько десятилетий ОСЧ развивались «в отрыве от практики», поскольку не существовало удобных

средств измерения оптических частот и переноса стабильности и точности лазерных стандартов в привычный для потребителя радиодиапазон.

Ситуация революционным образом изменилась в начале 2000-х годов благодаря достижениям физики сверхбыстрых (фемтосекундных) процессов в лазерных генераторах и созданию генератора суперконтинуума, перекрывающего октаву в оптическом диапазоне спектра [7]. Развитие фемтосекундных технологий решило одну из труднейших проблем ОСЧ и создало эффективный способ измерения оптических частот, позволяющий использовать точностной потенциал оптических переходов, «синхронизовать» и объединить различные лазерные и радио стандарты, отстоящие по частоте на десятки и сотни терагерц, в единую систему с помощью компактных лазерных устройств.

Одно из преимуществ такого объединения – передача метрологических параметров одного устройства другому, что позволяет потребителю приблизиться к «идеальному» стандарту, выбирая нужное сочетание свойств этого стандарта (относительная стабильность частоты, ширина спектра, точность).

Поскольку в одном устройстве крайне сложно достигнуть и предельной стабильности на малых временах, и предельной точности частоты (требования на параметры квантового дискриминатора при этом противоречат друг другу), стандарты развиваются по трем основным направлениям: (1) - *задающие генераторы* (узкий спектр излучения, высокая кратковременная стабильность частоты, например - кварцевые генераторы); (2) - *хранители частоты* (высокая долговременная стабильность, например – Н-мазер); (3) – *реперы* (предельная точность воспроизведения частоты невозмущенного перехода, и соответственно, размера секунды, например – Cs репер частоты).

Что касается развития реперов, то в достижении предельной точности и воспроизводимости частоты неоспоримыми преимуществами обладают СВЧ и оптические реперы, использующие спектральные линии глубоко охлажденных атомов/ионов, захваченных в ловушках или совершающих движение в геометрии «фонтана». Собственная неопределенность значения частоты современных ОСЧ на одиночных холодных ионах Hg^+ и Al^+ , дополненных фемтосекундными делителями частоты (часто эти устройства называются «оптическими часами»), в настоящее время снижена до величины 10^{-17} . Недостатком ОСЧ на одиночных частицах является малое отношение сигнал / шум и необходимость длительного усреднения сигнала. В значительной

степени эта проблема решена в ОСЧ, использующих холодные атомы, захваченные в оптической решетке.

Указанные варианты оптических стандартов, претендующих на высшую точность и воспроизводимость частоты, в настоящее время представляют собой сложные стационарные установки, и для их работы необходимы задающие генераторы с чрезвычайно узким (доли Гц) спектром и высокой ($\sim 10^{-15}$ за 1 с) кратковременной стабильностью частоты. Лучшие кварцевые генераторы имеют совершенно недостаточную ($\sim 10^{-13}$ за 1 с) стабильность частоты, и поэтому, активно развиваются задающие генераторы на основе криогенных СВЧ резонаторов, а также на основе стабилизированных по частоте лазеров с делением их частоты и переносом стабильности оптической частоты в микроволновый диапазон.

Следующий важный для практики вопрос - тиражирование шкал времени и частоты в сотнях лабораторий с помощью менее сложных и дорогих чем реперы - хранителей частоты, периодически калибруемых по реперам сигналами, передаваемыми из национальных метрологических центров через космические ретрансляторы или по линиям волоконно-оптической связи.

Недостатком активных Н-мазеров, являющихся лучшими хранителями частоты, является наличие дрейфа на временах усреднения больше суток ($\tau > 10^5$ с), высокие требования на условия эксплуатации, недостаточно высокая кратковременная стабильность частоты (10^{-13} , при $\tau = 1$ с), значительные массо-габаритные параметры (75-200 кг), высокая стоимость.

В настоящей работе исследуются возможности создания высокостабильного задающего генератора, хранителя и переносчика частоты оптического диапазона на основе He-Ne лазеров, стабилизированных по спектральным линиям молекулы метана.

Большая доля изложенного в диссертации материала (главы 1, 2, 3) относится к «дофемтосекундной эпохе», когда отсутствовали удобные средства связи оптического и радиодиапазонов. Роль созданных метановых задающих генераторов и переносчиков оптической частоты была важна, но позволяла решать сравнительно узкий круг научных и метрологических задач (это относится ко всем ранее разрабатывавшимся оптическим стандартам частоты).

С появлением в 1999-2000 гг. фемтосекундных делителей оптической частоты результаты выполненных исследований стали доступны и для радиодиапазона спектра, что резко расширило сферу возможных применений метановых стандартов частоты.

Поэтому заключительная часть диссертационной работы (глава 4) посвящена переносу стабильности метановых стандартов в радиодиапазон спектра с помощью компактного оптоволоконного фемтосекундного делителя оптической частоты.

Цели диссертационной работы:

1. Оценка возможности создания стандартов частоты с повторяемостью и воспроизводимостью $\sim 10^{-14}$ - 10^{-15} на основе резонансов насыщенной дисперсии с относительными ширинами $\sim 10^{-12}$ на $F_2^{(2)}$ линии метана в условиях полного разрешения дублета отдачи.

2. Создание компактного транспортируемого He-Ne/CH₄ ОСЧ, стабилизированного по резонансу насыщенной дисперсии в условиях полного разрешения магнитной сверхтонкой структуры (с относительной шириной 3×10^{-11}).

3. Калибровка шкал оптических частот различных лабораторий с точностью 10^{-13} - 10^{-14} транспортируемым He-Ne/CH₄ ОСЧ с целью получения новой спектральной и метрологической информации.

4. Создание на основе He-Ne/CH₄ лазера и волоконного фемтосекундного делителя оптической частоты лабораторного макета радио генератора с кратковременной стабильностью частоты на 1-2 порядка выше, чем у лучших кварцевых генераторов.

Все исследования в работе выполнены с газовыми He-Ne лазерами с длиной волны $\lambda = 3,39$ мкм, различной конструкции и назначения, стабилизированными по внутридоплеровским резонансам метана на переходе $F_2^{(2)}$ линии P(7) полосы ν_3 .

Данный выбор связан со случайным совпадением линии усиления He-Ne лазера и указанной линии метана, что стимулировало исследования и разработки по He-Ne/CH₄ системе с внешней и внутренней метановой поглощающей ячейкой, начатые пионерскими работами В.С. Летохова, Дж. Холла и В.П. Чеботаева в конце 60-х годов [8,9 и ссылки в них]. Большой теоретический и экспериментальный вклад в изучение фундаментальных механизмов, определяющих свойства нелинейных резонансов в данной системе, был внесен работами сотрудников ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск) [10,11 и ссылки в них]. Исследования, выполненные в различных лабораториях, выявили также целый ряд тонких спектроскопических и методических особенностей, влияющих на

предельные параметры по стабильности, повторяемости, воспроизводимости и точности не только данной системы, но и других ОСЧ с поглощающими ячейками на I_2 , C_2H_2 , SF_6 , OsO_4 , Rb с использованием газовых, твердотельных и полупроводниковых лазеров. Среди различных пар «лазер - поглотитель» наиболее высокая стабильность частоты в сочетании с небольшими габаритами продемонстрирована двумя системами: Nd:YAG/ I_2 и He-Ne/ CH_4 . В частности, новейшие исследования показывают, что потенциальная стабильность лазеров, привязанных к внутридоплеровским резонансам молекулярного йода и метана, составляет 10^{-15} - 10^{-16} при времени усреднения $1 \cdot 10^4$ с [12,13].

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработан и создан малогабаритный стационарный лазерный спектрометр, позволяющий исследовать резонансы насыщенной дисперсии $F_2^{(2)}$ линии метана со спектральным разрешением 10^{-11} - 10^{-12} .

2. Проведены спектроскопические исследования сверхузких резонансов насыщенной дисперсии $F_2^{(2)}$ линии метана в условиях полного разрешения дублета отдачи, измерены сдвиги частоты стабилизированного лазера от давления и насыщающей мощности в области ширин реперных резонансов 400-900 Гц.

3. Созданы компактные транспортируемые He-Ne/ CH_4 переносчики частоты, стабилизированные по резонансам насыщенной дисперсии метана с относительной шириной 3×10^{-11} . Выполнены абсолютные измерения их частоты относительно цезиевого репера, доказавшие, что повторяемость частоты созданных образцов достигает 3×10^{-14} .

4. Разработана модель сдвигов частоты He-Ne/ CH_4 лазера от внутренних паразитных обратных отражений. Определен диапазон сдвигов частоты лазера от перестройки телескопического резонатора по области устойчивости.

5. На основе He-Ne/ CH_4 лазера и волоконного фемтосекундного лазера создан лабораторный макет задающего радио генератора, превосходящий по кратковременной стабильности лучшие кварцевые генераторы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Доказана возможность регистрации резонансов насыщенной дисперсии с разрешением 4×10^{-12} в малогабаритном спектрометре на основе двухмодового лазера.

2. Получены зависимости сдвигов частоты лазера, стабилизированного по резонансам насыщенной дисперсии, от давления метана и насыщающей мощности в условиях полного разрешения дублета отдачи.

3. Продемонстрирована возможность создания компактных транспортируемых He-Ne/CH₄ переносчиков оптической частоты, хранящих значение частоты с погрешностью 3×10^{-14} на интервалах времени до 3 лет.

4. Описаны и оценены сдвиги частоты He-Ne/CH₄ лазера от внутренних паразитных обратных отражений.

5. Измерена зависимость сдвига частоты He-Ne/CH₄ лазера от перестройки телескопического резонатора по области устойчивости.

6. Доказана возможность создания на основе He-Ne/CH₄ лазера и волоконного фемтосекундного лазера радио генератора, превосходящего по кратковременной стабильности лучшие кварцевые генераторы.

Научная и практическая ценность:

1. Созданный малогабаритный стационарный лазерный спектрометр позволяет проводить спектроскопические исследования сверхузких резонансов насыщенной дисперсии F₂⁽²⁾ линии метана в условиях полного разрешения дублета отдачи и оценивать возможности дальнейшего развития стандартов частоты на основе методов спектроскопии насыщения с газовыми ячейками.

2. Разработанный компактный транспортируемый переносчик оптической частоты, способен синхронизовывать удаленные шкалы оптических частот с точностью 3×10^{-14} без использования систем спутниковой и волоконно-оптической связи.

3. Абсолютное значение частоты созданных переносчиков использовано для калибровки шкал оптических частот в нескольких ведущих лабораториях мира.

4. Результаты исследований сдвигов частоты He-Ne/CH₄ лазера от внутренних паразитных обратных отражений и перестройки по области устойчивости телескопического резонатора позволяют сформулировать отдельные требования для разработки метановых ОСЧ нового поколения с прогнозируемой стабильностью 10^{-15} - 10^{-16} .

5. Лабораторный макет радио генератора на основе He-Ne/CH₄ лазера и фемтосекундного оптоволоконного лазера продемонстрировал возможность создания компактных радио генераторов нового типа с высокой кратковременной стабильностью частоты и низким уровнем фазовых шумов.

Результаты работы в настоящее время используются для выполнения НИР и ОКР по созданию КСЧ на оптических принципах в ФИАН, ИЛФ СО РАН, ФГУП «ВНИИФТРИ».

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Созданный малогабаритный стационарный лазерный спектрометр позволяет регистрировать и исследовать резонансы насыщенной дисперсии на $F_2^{(2)}$ линии метана со спектральным разрешением 10^{-11} - 10^{-12} .

2. Сдвиги частоты лазера, стабилизированного по резонансу насыщенной дисперсии метана в условиях полного разрешения дублета отдачи, от давления метана и насыщающей мощности, не превышают величины 5×10^{-15} при условии поддержания величины обоих параметров с точностью 5%.

3. Повторяемость частоты созданного транспортируемого He-Ne/CH₄ оптического стандарта составляет 3×10^{-14} на интервале времени до 3 лет.

4. Величина измеренного сдвига частоты He-Ne/CH₄ лазера от внутренних паразитных обратных отражений соответствует расчетному значению, полученному на основе теории, включающей в уравнение для поля граничные условия с потерями на всех элементах резонатора.

5. Перестройка телескопического резонатора по области устойчивости при наличии поперечной неоднородности усиливающей среды и больших дифракционных потерь приводит к сдвигам частоты транспортируемого He-Ne/CH₄ ОСЧ, достигающим величины $\sim 4 \times 10^{-12}$.

6. Созданный лабораторный макет радиогенератора на основе He-Ne/CH₄ лазера и оптоволоконного фемтосекундного лазера превосходит по стабильности частоты водородный мазер пассивного типа на временах усреднения $\tau \leq 30$ с.

Авторский вклад.

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором лично или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке, проведении и обработке результатов всех экспериментов.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, определяется: комплексным подходом, заключающимся в проведении исследований параметров резонансов в широком

диапазоне спектрального разрешения ($10^{-9} - 10^{-12}$); подтверждением основных экспериментальных зависимостей результатами расчетов; корреляцией с данными, полученными иными экспериментальными методами; прямыми сличениями со стандартами частоты ведущих зарубежных лабораторий.

Апробация результатов.

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и отчетных совещаниях:

1. International Symposium “Modern problems of laser physics”, Novosibirsk, Russia, August 28 - September 2, 1995.
2. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 96), Braunschweig, Germany, 17-20 June, 1996.
3. 9th International Conference on Laser Physics, St.Petersburg, Russia, June 22-26, 1998.
4. 16th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Moscow, Russia, June 29-July 3, 1998.
5. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 98), Washington DC, USA, July 6-10, 1998.
6. International Quantum Electronics Conference, Conference of Lasers, Applications, and Technologies (IQEC/LAT), Moscow, Russia, June 22-27, 2002.
7. XXIII Съезд по спектроскопии, г.Звенигород, Московская обл., 17-21 октября 2005 г.
8. European Frequency and Time Forum (EFTF 08), Toulouse, France, 21-25 April, 2008.
9. European Frequency and Time Forum (EFTF 09), Besancon, France, 23-28 April, 2009.
10. Отчетные совещания по Программе Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения»: 3-4 декабря 2009, 16-17 декабря 2010г., 26-27 декабрь 2011 г.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, включая 7 статей в реферируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ: «Квантовая электроника», “Laser Physics”, “IEEE J. Quantum Electron.”, “IEEE Trans. Instr. Meas.”, “Applied Physics B” и 5 статей в трудах ведущих международных

конференций. По материалам работы получены 3 патента на изобретение. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения и изложена на 163 страницах машинописного текста, включая 57 рисунков, 3 таблицы и список литературы, содержащий 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и важность работы, определены цели и задачи диссертации, отмечена научная новизна и значимость результатов, полученных в диссертации, их практическая ценность, сформулированы защищаемые положения.

Глава 1 посвящена созданию малогабаритного стационарного лазерного спектрометра и исследованию внутридоплеровских резонансов насыщенной дисперсии $F_2^{(2)}$ линии метана в условиях полного разрешения дублета отдачи (рис. 1).

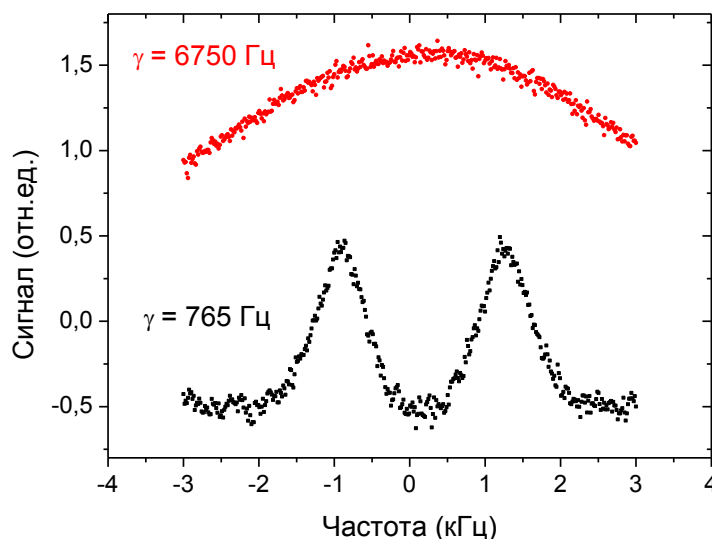


Рис. 1. Запись дублета отдачи в стационарном He-Ne/CH₄ лазере с диаметром луча в поглощающей ячейке – 170 мм (первая гармоника резонанса насыщенной дисперсии, нижняя спектрограмма). Для сравнения (верхняя спектрограмма) одновременно записана вершина центральной компоненты магнитной сверхтонкой структуры линии в транспортируемом He-Ne/CH₄ лазере с диаметром луча в ячейке – 30 мм.

Дано описание спектрометра в целом, особенностей оптической схемы и конструкции He-Ne/CH₄ лазера с внутривибраторным 60-кратным телескопическим расширителем пучка, схемы регистрации сигнала. Минимальная достигнутая относительная ширина резонансов насыщенной дисперсии составила 4×10^{-12} . Приведены результаты измерения параметров резонансов и сдвигов частоты лазера (рис. 2,3) от давления метана и насыщающей мощности в диапазоне ширин реперных резонансов 400-900 Гц.

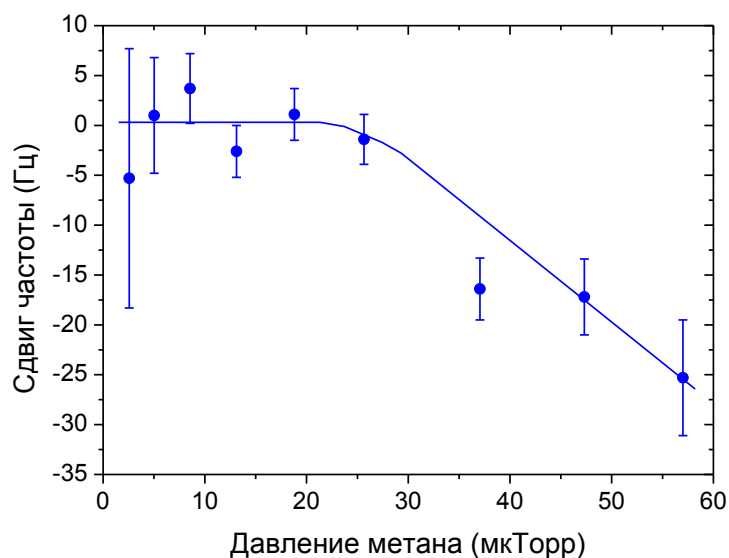


Рис. 2. Зависимость сдвига центра линии в условиях дублетного расщепления от давления метана.

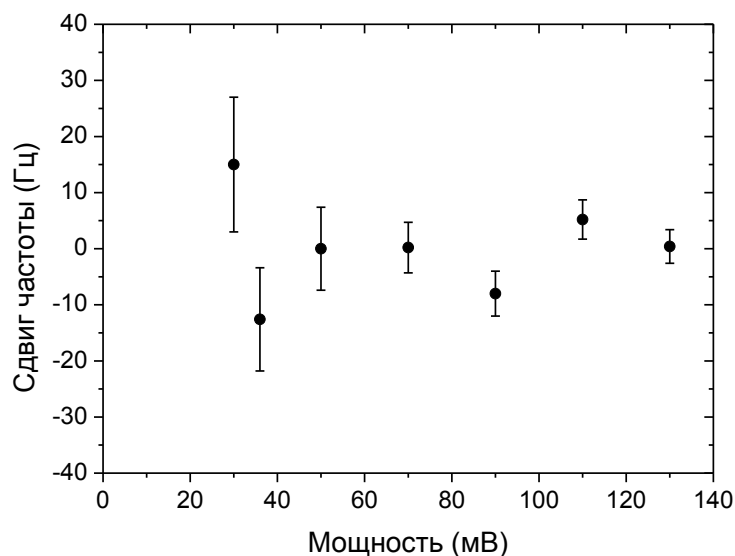


Рис. 3. Зависимость сдвига центра линии в условиях дублетного расщепления от мощности лазера.

Приведены данные по измерению с погрешностью 3 Гц частотных расщеплений между компонентами магнитной сверхтонкой структуры (МСТС) $F_2^{(2)}$ линии метана.

В Главе 2 приведен материал по разработке транспортируемого оптического стандарта частоты на основе He-He/ CH_4 лазера (ТОСЧ-60), стабилизированного по центральной компоненте разрешенной МСТС $F_2^{(2)}$ линии метана (относительная ширина резонансов насыщенной дисперсии - 3×10^{-11}). Созданные образцы ТОСЧ-60 испытывались и калибровались на традиционном радиооптическом частотном мосту Физико-технического института Германии (РТВ, г. Брауншвейг) относительно цезиевого репера. Были определены основные характеристики ТОСЧ-60: стабильность и повторяемость частоты (рис. 4,5).

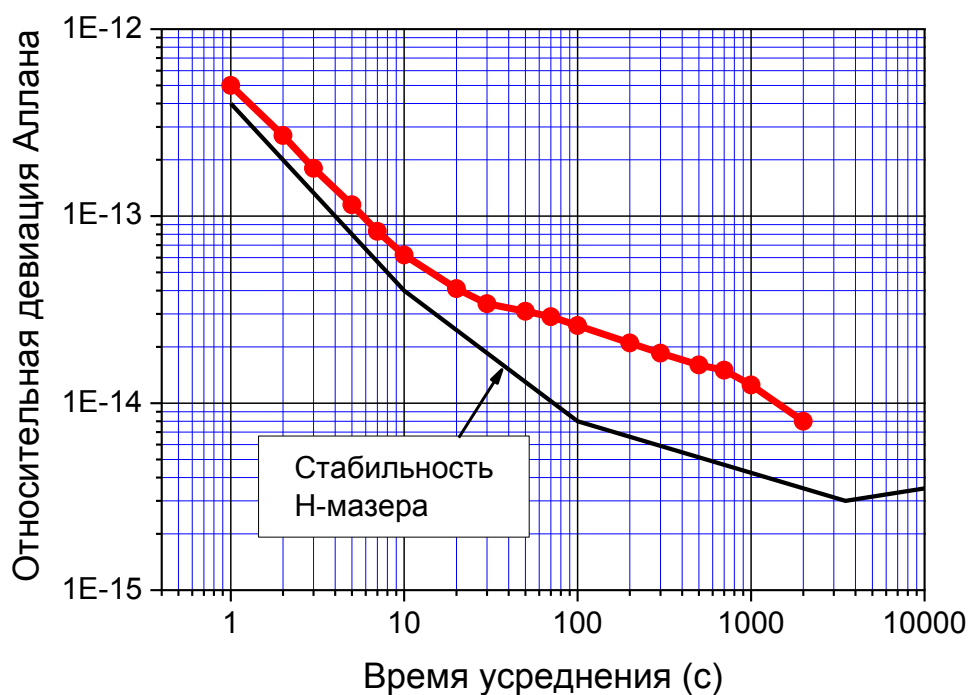


Рис. 4. Относительная девиация Аллана ТОСЧ-60, измеренная на радиооптическом мосту (РТВ, г.Брауншвейг, Германия) относительно активного водородного лазера (Ч1-75А).

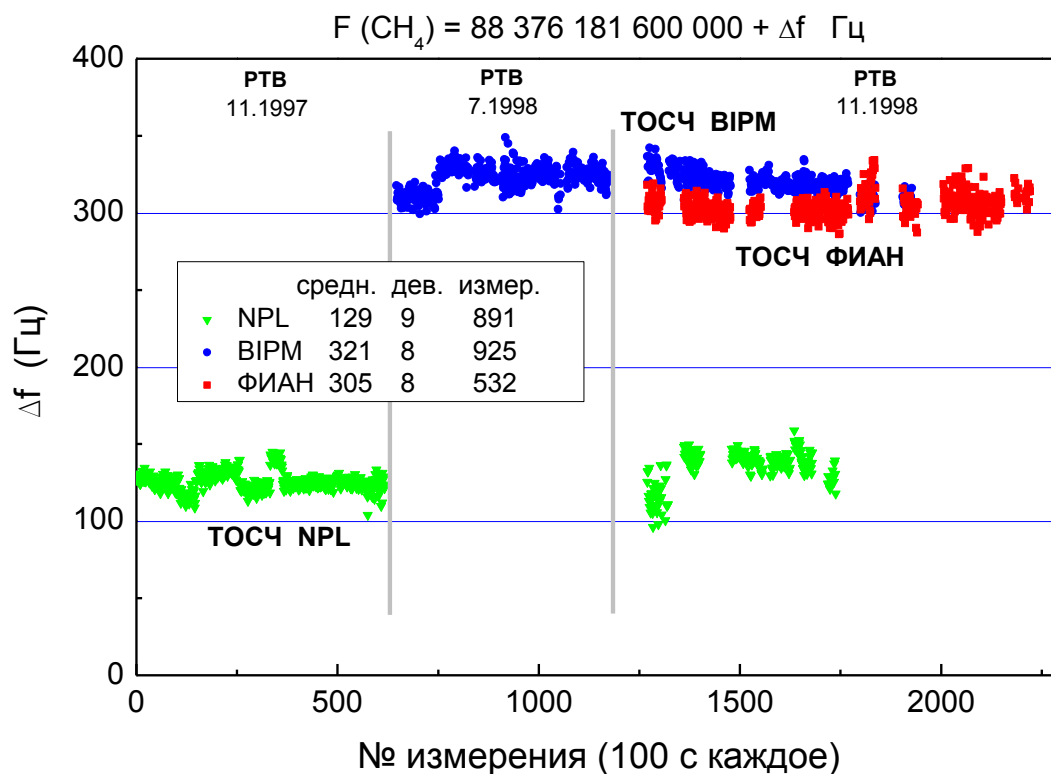


Рис. 5. Данные абсолютных частотных измерений трех образцов ТОСЧ-60 на радиооптическом мосту РТВ в 1997 - 1998г.

Повторяемость частоты излучения созданных образцов ТОСЧ-60 измерялась для разных экземпляров на интервалах времени от нескольких месяцев до 3-х лет. Данные приведены в таблицах 1,2.

Таблица 1. Результаты измерений частоты излучения.

$$F = 88\,376\,181\,600\,000 + \Delta \text{ (Гц)}$$

Экземпляр ТОСЧ-60	Дата	Частота (Δ , Гц) (3 последние цифры)	Стандартное отклонение (Гц)
NPL	Ноябрь 1997	126	6
	Ноябрь 1998	136	11
BIPM	Июль 1998	323	9
	Ноябрь 1998	320	7
ФИАН	Ноябрь 1998	273	10

Таблица 2. Результаты всех измерений ТОСЧ-NPL, не подвергавшегося модификации за весь период измерений.

$$F = 88\,376\,181\,600\,000 + \Delta \text{ (Гц)}$$

Дата	Частота (Δ , Гц) (3 последние цифры)	Стандартное отклонение (Гц)
Ноябрь 1997	126	6
Ноябрь 1998	136	11
Декабрь 2000	130	8

В результате многократных абсолютных частотных измерений был определен наиболее важный параметр для переносчика – повторяемость частоты на длительных интервалах. Из полученных данных следует, что для ТОСЧ-NPL на интервале 3 года разброс частоты составил 10 Гц ($1 \cdot 10^{-13}$), а для ТОСЧ-BIPM – 3 Гц на интервале 5 месяцев.

Созданные образцы ТОСЧ-60, откалиброванные относительно первичного Cs репера Германии, далее использовались для калибровки шкалы оптических частот в совместных спектроскопических и метрологических экспериментах с зарубежными лабораториями.

С их участием было выполнено:

- Измерение частоты E – линии метана (РТВ, г. Брауншвейг, Германия).
- Измерение частоты 1S - 2S перехода водорода (Макс-Планк-Институт Квантовой оптики, г. Гаршинг, Германия). Применение ТОСЧ-60 позволило значительно повысить точность определения частоты перехода без создания полномасштабного радиооптического моста.
- Сравнение погрешностей радиооптических цепей РТВ и LPTF (г. Париж, Франция).

В ходе абсолютных частотных измерений было установлено, что, несмотря на высокую повторяемость частоты созданных образцов ТОСЧ-60, разброс их средних значений доходил до 200 Гц. Исследованию возможных причин таких отличий посвящена Глава 3.

Глава 3. Несмотря на простоту схемы лазеров с поглощающими ячейками, в них существует целый ряд трудно делимых «физических» (связанных с фундаментальными свойствами квантового перехода) и

«методических» (связанных с особенностями выбранного метода выделения резонанса) факторов, приводящих к искажениям формы и сдвигам вершины реперного резонанса. Изучению причин, ограничивающих долговременную стабильность, повторяемость и воспроизводимость частоты лазеров, стабилизированных по нелинейным внутридоплеровским резонансам, посвящено большое количество работ [10,14-26].

В диссертационной работе рассмотрены два вида частотных сдвигов, имеющих место в лазерах, стабилизированных по резонансам, выделяемым методами внутридоплеровской спектроскопии насыщения. Первый обусловлен наличием паразитных обратных отражений, второй – изменением пространственного распределения поля в лазерах с внутрирезонаторными телескопами при перестройке резонатора по области устойчивости.

Найдены два механизма сдвигов из-за обратных отражений: (1) возникающая при детектировании производных резонансов частотнозависимая «паразитная» амплитудная модуляция излучения лазера; (2) изменение пьедестала под резонансом в двухмодовом режиме. Эксперимент количественно подтвердил теоретические оценки сдвигов из-за обратных отражений.

Установлено, что сдвиги частоты от изменения конфигурации поля моды, задаваемой настройкой телескопов в транспортируемых He-Ne/CH₄ ОСЧ с высоким спектральным разрешением в «пролетной» области параметров и при больших дифракционных потерях могут достигать величины $5 \cdot 10^{-12}$. Это объясняет разброс частот отдельных образцов транспортируемого оптического стандарта частоты, описанного в Главе 2.

Глава 4 посвящена созданию компактного задающего радиогенератора на основе He-Ne/CH₄ лазера и фемтосекундного делителя оптической частоты.

Проблема задающих генераторов с предельно низким уровнем частотных и фазовых шумов является одной из центральных для успешной реализации КСЧ наивысшей точности. В отличие от применения сверхдобротных СВЧ и оптических резонаторов, в диссертационной работе исследуется другой подход к созданию задающих генераторов с высокой кратковременной стабильностью частоты. В качестве репера используются нелинейные резонансы на переходах молекулы метана.

В настоящей работе в качестве источника стабильной частоты применен He-Ne/CH₄ лазер, стабилизированный по резонансу насыщенной дисперсии F₂⁽²⁾

линии метана с относительной шириной 10^{-9} и обладающий кратковременной стабильностью частоты $1 \cdot 10^{-14}$ (при времени усреднения 1 с). В качестве делителя оптической частоты использовался специально разработанный фемтосекундный оптоволоконный Er^{3+} лазер¹ (центральная длина волны 1550 нм, $\nu = 212$ ТГц), частота следования импульсов которого с помощью созданного нелинейно-оптического интерфейса, стабилизировалась по частоте He-Ne/ CH_4 ОСЧ.

Спектр излучения импульсных фемтосекундных лазеров с пассивной синхронизацией мод представляет собой широкую гребёнку эквидистантных спектральных компонент, отстоящих друг от друга на частоту повторения импульсов. Центр гребенки определяется несущей частотой фемтосекундного лазера, частота повторения f_{rep} - временем обхода импульсом резонатора, а полная ширина гребенки - длительностью отдельного импульса.

Частота n -ой линии оптической гребёнки ν_n с точностью до 10^{-19} определяется простым соотношением:

$$\nu_n = n f_{\text{rep}} + f_0,$$

где целое число $n \sim 10^5 - 10^6$, а f_0 – сдвиг гребенки как целого относительно нуля, причём $0 < f_0 < f_{\text{rep}}$. Важно, что частоты f_{rep} и f_0 лежат в радиодиапазоне и могут быть измерены методами радиоэлектроники с точностью, определяемой существующими микроволновыми стандартами частоты, а целочисленное значение n определяется из более грубых интерферометрических измерений длины волны с помощью « λ -метра». Таким образом устанавливается связь оптической частоты ν_n с легко измеряемыми микроволновыми частотами.

В зависимости от взаимного расположения частоты ОСЧ и спектра гребенки возможны различные схемы измерения оптической частоты или переноса стабильности оптического стандарта в радиодиапазон.

В первых работах использовались фемтосекундные титан-сапфировые (Ti:Sa) лазеры ($\lambda = 800$ нм, $\nu = 375$ ТГц), нелинейные оптические волокна с поперечной структурой типа фотонных кристаллов и схема регистрации прямых радиочастотных биений измеряемой оптической частоты с одной из компонент гребенки. В этом случае требуются точные значения обоих параметров f_{rep} и f_0 . Для измерения f_0 использовались фемтосекундные лазеры со спектром суперконтинуума шириной в октаву и схема измерений на основе “ f - $2f$ ” интерферометра [27].

¹ лазер производства ООО «Авеста», модернизированный совместно с А.В.Тausеневым

Схема деления существенно упрощается, если частота используемого ОСЧ меньше ширины спектра гребёнки, при этом частота стандарта может лежать вне спектра фемтосекундного лазера. Упрощение схемы связано с исключением из процесса измерения частоты f_0 путем генерации разностных частот между компонентами спектра фемтосекундного лазера в нелинейном кристалле (рис. 6).

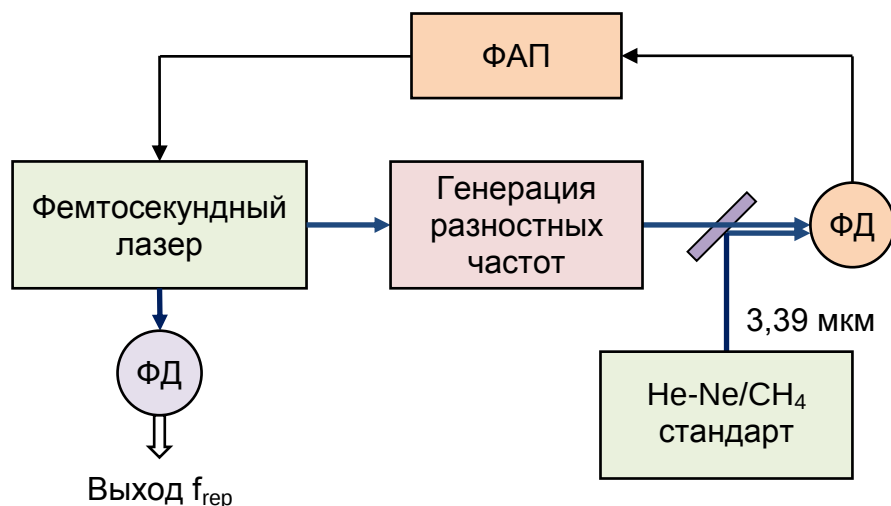


Рис.6. Общая схема метанового задающего радио генератора на основе генерации спектра разностных частот. ФД – фотодетектор, ФАП – система фазовой автоподстройки частоты, $f_{\text{реп}}$ – частота повторения фемтосекундных импульсов.

Оптическая схема установки для получения гребенки разностных частот в области длин волн 3,39 мкм приведена на рис. 7.

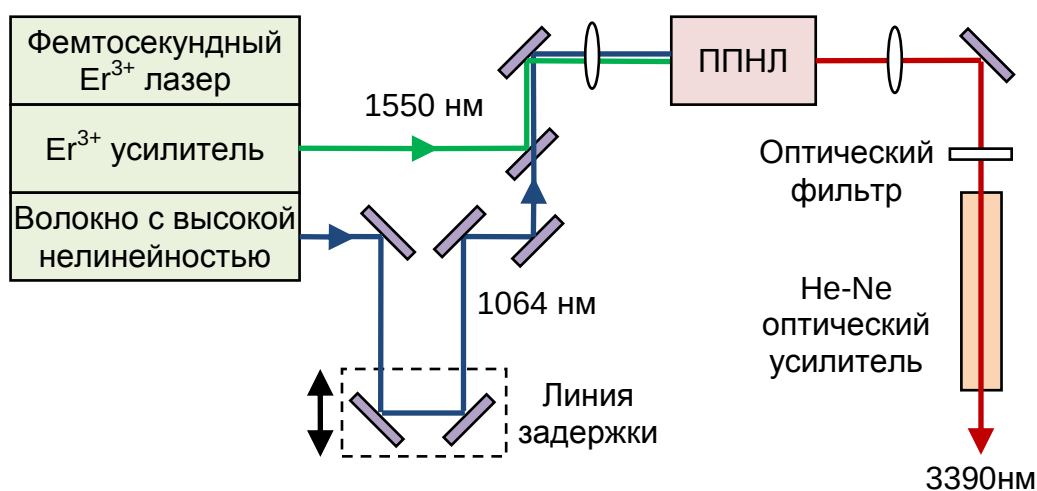


Рис. 7. Оптическая схема установки для генерации разностной частоты. ППНЛ – кристалл периодически поляризованного ниобата лития.

Компоненты гребенки разностных частот в области 3,39 мкм смешивалась с излучением метанового стандарта частоты на фотодетекторе. Полученный сигнал биений приведен на рис. 8.

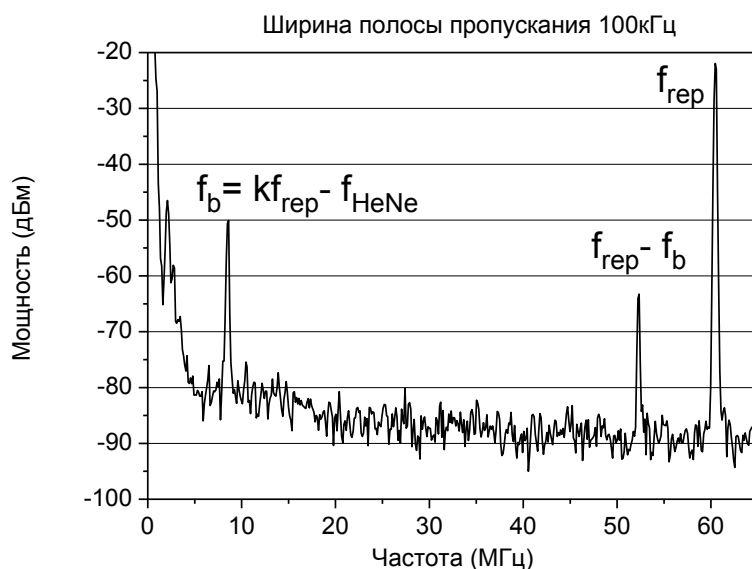


Рис. 8. Радиочастотный спектр биений излучения He-Ne гетеродинного лазера и ближайшей компоненты гребенки разностных частот.

Данный сигнал, отношение С/Ш в котором составляло 25÷30 дБ в полосе 100 кГц, подавался на систему частотно-фазовой автоподстройки для управления длиной резонатора фемтосекундного лазера, т.е. стабилизации частоты повторения импульсов f_{rep} . Таким образом, стабильность оптической частоты метанового стандарта переносится на частоту повторения фемтосекундных импульсов, что и требуется для реализации метанового задающего генератора.

Сигнал метанового задающего радио генератора, представленный стабилизированной частотой $f_{rep} \sim 62$ МГц, детектировался непосредственно с волоконного выхода фемтосекундного Er^{3+} генератора. Его стабильность определялась сравнением с водородным мазером «Ч1-1006».

Остаточные флуктуации сигнала, зарегистрированные частотомером при времени усреднения 1 с, показаны на рис. 9. Соответствующая стандартная девиация сигнала составляет 0,059 мГц (при частоте несущей ~ 62 МГц).

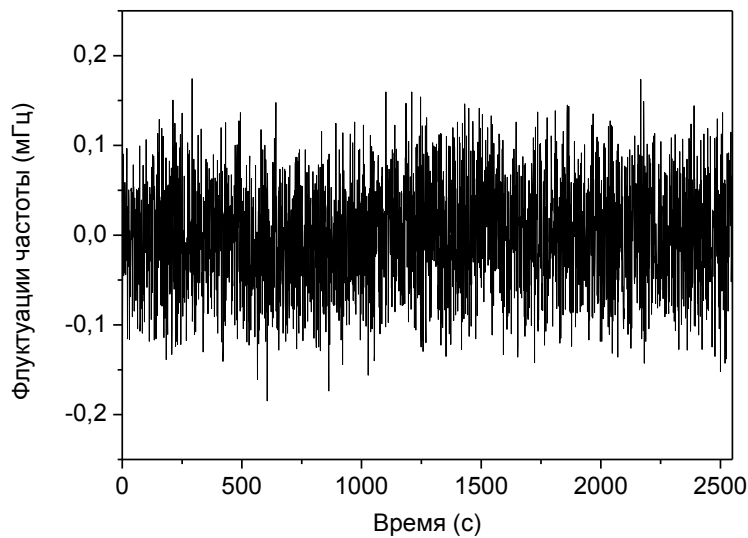


Рис. 9. Флуктуации частоты повторения импульсов стабилизированного Er^{3+} лазера.

Зависимость стабильности частоты f_{rep} метанового задающего радио генератора от времени усреднения τ показана на рис. 10 кружками. Квадраты соответствуют собственной нестабильности мазера «Ч1-1006». Для сравнения приведен результат сличения частот двух He-Ne/ CH_4 ОСЧ (треугольники), один из которых использовался в данном эксперименте.

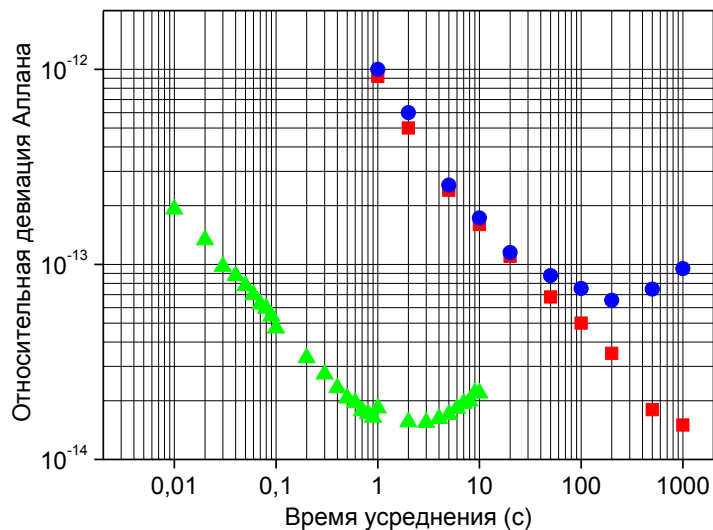


Рис. 10. Относительная девиация Аллана сигнала метанового задающего генератора относительно мазера (●). Собственная стабильность мазера (■) и He-Ne/ CH_4 ОСЧ (▲).

Из приведенных данных видно, что измеренная относительная стабильность частоты изменяется от 1×10^{-12} при $\tau = 1$ с до $6,5 \times 10^{-14}$ при $\tau = 200$ с. На временах усреднения $\tau \leq 50$ с она полностью определяется стабильностью используемого в измерениях Н-мазера «Ч1-1006». На больших временах усреднения преобладают дрейфы частоты использовавшегося в эксперименте He-Ne/CH₄ ОСЧ. Вклад синтезатора частоты и частотомера в измеренную стабильность проверялся и был малым. При экстраполяции зависимости собственной стабильности He-Ne/CH₄ ОСЧ (кривая (▲) на рис. 10) в область времен усреднения $\tau > 200$ с видна тенденция к ее совпадению с сигналом задающего генератора (кривая (●)) в этой же области. Это позволяет предположить, что разработанный фемтосекундный волоконный делитель оптической частоты не ухудшает собственной стабильности ОСЧ и для более коротких времен усреднения, оставляя ее на уровне $\sim 1 \cdot 10^{-14}$ при $\tau \sim 1$ с.

Для объективной оценки кратковременной стабильности метанового задающего генератора при $\tau \leq 30$ с необходим второй экземпляр генератора, либо более стабильный, чем Н-мазер источник.

В **Приложении** выполнен расчет параметров гауссова пучка в резонаторе с телескопическим расширителем и приведены удобные для расчетов формулы.

В **Заключении** сформулированы **основные результаты** работы.

1. На основе высокочувствительного двухмодового метода нелинейной лазерной спектроскопии разработан и создан уникальный малогабаритный стационарный лазерный спектрометр, позволяющий исследовать резонансы насыщенной дисперсии $F_2^{(2)}$ линии метана со спектральным разрешением 10^{-11} - 10^{-12} .

2. Проведены спектроскопические исследования сверхузких резонансов насыщенной дисперсии $F_2^{(2)}$ линии метана в условиях полного разрешения дублета отдачи, измерены сдвиги частоты стабилизированного лазера от давления и насыщающей мощности в области ширин реперных резонансов 400-900 Гц.

3. На базе выполненных исследований созданы компактные транспортируемые He-Ne/CH₄ переносчики частоты, стабилизированные по резонансам насыщенной дисперсии метана с относительной шириной 3×10^{-11} . Выполнены абсолютные измерения их частоты относительно цезиевого репера, доказавшие, что повторяемость частоты созданных образцов достигает 3×10^{-14} .

4. Разработана модель сдвигов частоты He-Ne/CH₄ лазера от паразитных обратных отражений. Определен диапазон сдвигов частоты лазера от перестройки телескопического резонатора по области устойчивости в условиях разрешенной магнитной сверхтонкой структуры. Сформулированы требования на ряд параметров лазера (уровень дифракционных потерь, величина обратных отражений, величина поперечной неоднородности активной среды и др.), выполнение которых открывает возможность создания стандартов частоты нового поколения с прогнозируемой стабильностью 10^{-15} - 10^{-16} .

5. На основе метода генерации разностных частот в нелинейном кристалле разработана эффективная схема связи спектров He-Ne/CH₄ и фемтосекундного волоконного эрбиевого лазеров, позволившая осуществить фазовую стабилизацию частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера по реперной линии метана. В результате, впервые создан уникальный компактный радио генератор, превосходящий по кратковременной стабильности частоты лучшие кварцевые генераторы.

Список основных публикаций автора по теме диссертации.

1. Alekseev V.A., Gubin M.A., Krylova D.D., Tyurikov D.A., **Shelkovnikov A.S.** "Methane frequency standard ($\lambda = 3.39 \mu\text{m}$) with the bandwidth of the reference line of 800 Hz", Laser Physics, **4**, p.356-363 (1994).
2. Gubin M.A., Tyurikov D.A., **Shelkovnikov A.S.**, Koval'chuk E.V., Kramer G., Lipphardt B. "Transportable He-Ne/CH₄ optical frequency standard and absolute measurements of its frequency", IEEE J. Quantum Electron., **31**, 2177-2182 (1995).
3. Tyurikov D.A., Gubin M.A., **Shelkovnikov A.S.**, Koval'chuk E.V. "Accuracy of the computer-controlled laser frequency standards based on resolved hyperfine structure of a methane line", IEEE Trans. Instr. Meas., **44**, 166-169 (1995).
4. Gubin M.A., Tyurikov D.A., Kireev A.N., Kovalchuk E.V., **Shelkovnikov A.S.**, Depatie D. "New approaches towards high precise, compact methane optical frequency standard ($\lambda = 3.3 \mu\text{m}$)", Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology, Woods Hole, Massachusetts USA, October 15-19, 1995, p.305-309.
5. Gubin M., **Shelkovnikov A.**, Kovalchuk E., Krylova D., Petrukhin E., Tyurikov D. "Present performance of the transportable He-Ne/CH₄ optical frequency standards", Proceedings of the 13th European Frequency and Time Forum, Besancon, France, April 13-16, 1999, pp.710-713.

6. Acef O., Clairon A., Rovera D., Ducos F., Hilico L., Kramer G., Lipphardt B., **Shelkovnikov A.**, Kovalchuk E., Petrukhin E., Tyurikov D., Petrovskiy M., Gubin M., Felder R., Gill P., Lea S. "Absolute frequency measurements with a set of transportable methane optical frequency standards", Proceedings of the 13th European Frequency and Time Forum, Besancon, France, April 13-16, 1999, pp.742-745.
7. Gubin M., Petrukhin E., Krylova D., Kovalchuk E., Tyurikov D., **Shelkovnikov A.**, "Physical and technological aspects of compact He-Ne/CH₄ optical frequency standards of a highest performance", Proceedings of SPIE Symposium 2001: Laser Frequency Stabilization, Standards, Measurements, and Applications, John L. Hall, Jun Ye Editors, **4269**, 272-276 (2001).
8. Gubin M., Kovalchuk E., Petukhin E., **Shelkovnikov A.**, Tyurikov D., et al "Absolute frequency measurements with a set of transportable He-Ne/CH₄ OFS and prospects for future design and applications", in Proceedings of the 6th International Symposium on Frequency Standards and Metrology, 9 - 14 September 2001, St.Andrews, Scotland, World Scientific Publishing Ltd, editor P.Gill, pp.453-460.
9. Крылова Д.Д., **Шелковников А.С.**, Петрухин Е.А., Губин М.А. «Влияние обратных отражений внутри резонатора на точность и стабильность оптических стандартов частоты», Квантовая Электроника, **34**, 554-558 (2004).
10. Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Tyurikov D.A., **Shelkovnikov A.S.** "Femtosecond Er³⁺ fiber laser for application in an optical clock", Laser Physics, **17**, 1286-1291 (2007).
11. 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, **38**, 613-614 (2008).
12. Губин М.А., Киреев А.Н., Конященко А.В., Крылова Д.Д., Крюков П.Г., Таусенев А.В., Тюриков Д.А., **Шелковников А.С.** «Создание компактного задающего генератора и оптических часов на основе ИК перехода метана и фемтосекундного лазера», с.400-415, т.3 «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты» под ред. Е.А. Виноградова и Л.Н. Сеницы, Томск: изд. Института оптики атмосферы СО РАН, 2009.
13. Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., **Shelkovnikov A.S.**, Tausenev A.V., Tyurikov D.A. "Femtosecond fiber laser based methane optical clock", Applied Physics B, **95**, p.661-666 (2009).

14. Петрухин Е.А., Губин М.А., Крылова Д.Д., **Шелковников А.С.**, «Способ стабилизации частоты двухмодового He-Ne/CH₄ лазера». Патент РФ на изобретение № 2316863, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Зарегистрировано в Государственном реестре 10.02.2008 г., приоритет от 30.06.2006 г.
15. Губин М.А., Крылова Д.Д., Тюриков Д.А., **Шелковников А.С.**, «Способ стабилизации частоты лазера и устройство для его осуществления». Патент РФ на изобретение № 2318278, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Зарегистрировано в Государственном реестре 27.02.2008 г., приоритет от 18.09.2006 г.
16. Губин М.А., Трушковский Э.В., Тюриков Д.А., **Шелковников А.С.**, «Стабилизированный двухмодовый He-Ne/CH₄ лазер». Патент РФ на изобретение № 2343611, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Зарегистрировано в Государственном реестре 10.01.2009 г., приоритет от 05.09.2007 г.

Список цитируемой литературы.

1. Басов Н.Г., Прохоров А.М. «Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул», ЖЭТФ, **27**, 431-438 (1954); «Молекулярный генератор и усилитель», УФН, **57**, 458-501 (1955).
2. Gordon J.P., Zeiger H.J., Townes C.H. "Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH₃", Phys. Rev., **95**, 282–284 (1954).
3. Goldenberg H.M., Kleppner D., Ramsey N.F. "Atomic hydrogen maser", Phys.Rev.Lett., **5**, 361-365 (1960).
4. Одуан К., Гино Б. «Измерение времени. Основы GPS». пер с франц., М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
5. Риле Ф., «Стандарты частоты. Принципы и приложения», пер с англ., М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с.
6. Басов Н.Г., Летохов В.С. «Оптические стандарты частоты», УФН, **96**, 585-631 (1968).
7. Hall J.L. "Nobel lecture: Defining and measuring optical frequencies", Rev. Mod. Phys., **78**, 1279-1295 (2006); Hansch T.W. "Nobel lecture: Passion for precision", Rev. Mod. Phys., **78**, 1297-1309 (2006). Перевод в УФН, **176**, 1353-1367, 1368-1380 (2006).

8. Летохов В.С., Чеботаев В.П. «Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения». М.: Наука, 1990. 512 с.
9. Hall J.L. «Frequency-stabilized lasers: from the beginning toward the future», *Laser Physics*, **4**, 306–318 (1994).
10. Bagayev S.N., Chebotayev V.P., Titov E.A. “Saturated absorption lineshape under transit-time conditions”, *Laser Physics*, **4**, 224-292 (1994).
11. Дмитриев А.К. «Нелинейная лазерная спектроскопия, свободная от квадратичного эффекта доплера». Дисс. д.ф.-м.н., Новосибирск, Институт лазерной физики, 1995. – 98 с.
12. Kovalchuk E.V., Döringshoff K., Möhle K., Nagel M., Reggentin M., Peters A. "Towards a New Generation of Ultra-Stable Molecular Optical Frequency Standards," in *Proceedings of the International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2011*, 28 August – 1 September 2011, Sydney, Australia, paper I1001, pp.2100-2102.
13. Губин М.А., Киреев А.Н., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Пнев А.Б., Подмарьков Ю.П., Тюриков Д.А., Фролов М.П., Шелестов Д.А., Шелковников А.С. «Перестраиваемый двухмодовый $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер со спектральной плотностью частотных шумов $0,03 \text{ Гц/Гц}^{1/2}$ », *Квантовая электроника*, **42**, 509-513 (2012).
14. Borde C.J., Hall J.L., Kunasz C.V., Hummer D.G. “Saturated absorption line shape: calculation of the transit-time broadening by a perturbation approach”, *Phys.Rev.A*, **14**, 236-263 (1976).
15. Татаренков В.М. «Квантовые стандарты частоты инфракрасного диапазона и их применение в метрологии». Дисс. д.т.н., М: ВНИИФТРИ, 1982. – 246 с.
16. Alekseev V.A., Gubin M.A., Protsenko E.D. “High-precision optical frequency standards”, *Laser Physics*, **1**, 221-260 (1991).
17. Титов А.Н. «О предельной точности метода насыщенного поглощения», *Квантовая электроника*, **8**, 2040-2042 (1981).
18. Cérez P, Felder R “Gas-lens effect and cavity design of some frequency-stabilized He-Ne lasers”, *Applied Optics*, **22**, 1251-1256 (1983).
19. Никульчин А.В., Ковальчук Е.В. «Резонансное влияние характеристик активной среды на форму частотных резонансов в двухмодовом He-Ne/ CH_4 лазере», *Квантовая электроника*, **16**, 1799-1805 (1989).
20. Алексеев В.А., Крылова Д.Д. «Влияние неоднородности коэффициента усиления на сдвиг частоты лазерного стандарта», *Квантовая электроника*, **17**, 869-872 (1990). Алексеев В.А., Крылова Д.Д. «Моды резонатора с

поперечной неоднородностью активной среды и их применение в нелинейной лазерной спектроскопии», М.: Препринт ФИАН №12, 1990г. - 28с.

21. Крылова Д.Д., Шелковников А.С., Петрухин Е.А., Губин М.А. «Влияние обратных отражений внутри резонатора на точность и стабильность оптических стандартов частоты», Квантовая электроника, **34**, 554-558 (2004).
22. Титов А.Н., Малышев Ю.М., Расторгуев Ю.Г. «Сдвиги частоты из-за линейного и квадратичного эффекта Допплера в лазерах с насыщенным поглощением», Исследования в области измерений времени и частоты. – М. изд. ВНИИФТРИ, 1987, с.40.
23. Титов Е.А. «Эффекты неортогональности поперечных мод из-за насыщенного поглощения в лазере с нелинейной поглощающей ячейкой», Оптика и спектроскопия, **67**, 1183-1187 (1989).
24. Качалова Н.М., Романенко В.И., Яценко Л.П. «Влияние эффектов пространственной неоднородности на асимметрию и сдвиги частотных резонансов в двухмодовых лазерах», Квантовая электроника, **17**, 428-434 (1990).
25. Базаров Е.Н., Герасимов Г.А., Губин В.П., Старостин Н.И., Фомин В.В. «Асимметрия резонанса и сдвиги частоты стабилизированного CO_2/OsO_4 -лазера в условиях самофокусировки излучения в нелинейно-поглощающей среде», Квантовая электроника, **12**, 1567-1573 (1985).
26. Acef O. "Metrological properties of CO_2/OsO_4 optical frequency standard", Opt. Commun., **134**, 479–486 (1997).
27. Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R.S., Hall J.L., Cundiff S.T. "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis", Science, **288**, 635-639 (2000).