

На правах рукописи
УДК 621.373.826



Тарабрин Михаил Константинович

**МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО
РЕЗОНАНСАМ НАСЫЩЕННОЙ ДИСПЕРСИИ МЕТАНА**

Специальность 05.11.07
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный руководитель: **Карасик Валерий Ефимович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Цветков Владимир Борисович**,
доктор физико-математических наук,
руководитель Научного центра лазерных материалов и технологий
Института общей физики
имени А. М. Прохорова Российской академии наук

Савкин Константин Борисович
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией метрологии
малоинтенсивного лазерного излучения и волоконно-оптических систем
Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»

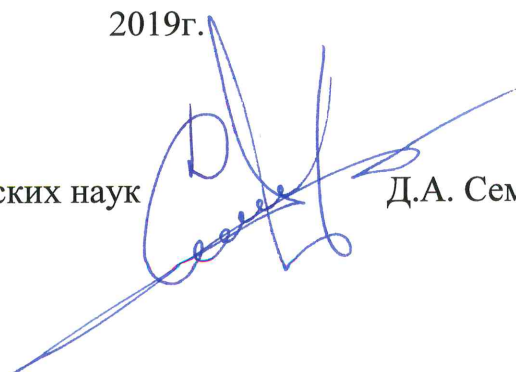
Защита состоится «02» октября 2019 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан « » 2019г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук


Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

За последнее десятилетие произошел резкий скачок в развитии таких областей науки и техники, как прецизионная спектроскопия, навигация и глобальное позиционирование, частотная метрология, в частности, в нашей стране создана и успешно эксплуатируется глобальная навигационная спутниковая система. Модернизация этих систем стала возможна благодаря развитию устройств, обеспечивающих передачу и использование излучения высоко стабилизированных генераторов — стандартов частоты. При этом наблюдается общая тенденция миниатюризации таких технических систем, переход к компактным и малогабаритным устройствам и техническим системам как наземного, так и бортового исполнения. В рамках указанной тенденции одной из приоритетных является задача по разработке компактных задающих генераторов, обладающих кратковременной нестабильностью частоты не ниже $5 \cdot 10^{-15}$, для систем оптических реперов, таких как атомы иттербия, захваченные в оптическую ловушку, с потенциально достижимой нестабильностью частоты $10^{-19} - 10^{-21}$ при времени усреднения 1 с. Другой важной задачей является повышение точностных характеристик частотной аппаратуры системы ГЛОНАСС, в которой для сохранения долговременной стабильности частоты в настоящее время используются водородные мазеры, за счет перехода к использованию оптических стандартов частоты. Лучшим образцом водородного стандарта частоты и времени является Ч1-1033, обладающий низкой кратковременной нестабильностью ($1,5 \cdot 10^{-13}$ при времени усреднения 1 с), но высокой долговременной нестабильностью ($5 \cdot 10^{-16}$ при суточном усреднении). В направлении решения поставленных задач ведутся активные исследования в мире, при этом лучшие результаты получены тремя группами. Группа Claus Braxmaier из Немецкого Аэрокосмического центра занимается разработкой стабилизированного по частоте Nd:YAG лазера с использованием йодной ячейки. Кратковременная нестабильность их компактного задающего генератора составляет $6 \cdot 10^{-15}$, а долговременная — $1 \cdot 10^{-14}$. Группа М. А. Губина из ФИАНа занимается разработкой стабилизированного по частоте He-Ne лазера с использованием метановой ячейки. Кратковременная и долговременная нестабильность частоты их компактного задающего генератора составляет $7 \cdot 10^{-15}$. Группа Benjamin Biedermann из компании Menlo Systems занимается разработкой стабилизированных по частоте эрбиевых лазеров с использованием высокодобротных резонаторов, охлажденных до криогенных температур. При высоких значениях кратковременной нестабильности частоты ($1,5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с) разработка Menlo Systems обладает низкой долговременной стабильностью и представляет собой громоздкую, нетранспортабельную систему. Перечисленные разработки обладают выдающимися характеристиками, однако ни одна из них не

удовлетворяет требованиям по кратковременной и долговременной стабильности частоты в сочетании с компактным исполнением.

Проведенный анализ показывает, что решением данной проблемы может служить разработка метода на основе уже примененного для стабилизации частоты He-Ne лазера по резонансам насыщенной дисперсии метана благодаря характеру кривой нестабильности частоты, возможности компактной реализации и выбору оптимальной линии метана. При этом для повышения стабильности частоты необходимо перейти в другой диапазон длин волн, в котором находятся более сильные линии поглощения метана, не имеющие магнитную сверхтонкую структуру. Наиболее перспективным диапазоном является область около 2,4 мкм, однако переход в данный диапазон сопряжен с проблемой разработки нового лазерного источника излучения и метода стабилизации его частоты по резонансам насыщенной дисперсии метана. Стабилизация частоты такого лазерного источника излучения позволит получить нестабильность частоты на уровне 10^{-15} при времени усреднения 1 с что сопоставимо с лучшими достигнутыми результатами в мире, поэтому тема диссертационной работы является актуальной.

В этой связи, **целью данной диссертационной работы** является разработка метода стабилизации частоты излучения твердотельных лазерных источников по резонансам насыщенной дисперсии метана.

Для достижения поставленной цели в ходе работы были решены следующие **научно-технические задачи**:

- 1) осуществлено исследование перспективных линий поглощения метана для стабилизации частоты излучения задающего генератора;
- 2) обоснована возможность использования активной среды на основе кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ для создания задающего генератора с длиной волны излучения вблизи перехода $E(2)$ полосы $\nu_1 + \nu_4$ метана;
- 3) разработана методика расчета параметров оптических элементов экспериментального макета $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера;
- 4) разработан метод оценки нестабильности частоты излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера;
- 5) разработан и изготовлен лабораторный макет перестраиваемого по частоте $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с внутрирезонаторной метановой ячейкой и проведены на нем экспериментальные исследования.

Объектом исследования является разработанный автором экспериментальный макет перестраиваемого по частоте $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с внутрирезонаторной метановой ячейкой.

Предметом исследования является метод стабилизации частоты твердотельных лазерных источников излучения.

Методы исследований. При решении теоретических и прикладных задач были использованы методы математического моделирования, экспериментальные методы исследований.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

- разработан оригинальный метод стабилизации частоты излучения твердотельных лазерных источников по резонансам насыщенной дисперсии, формируемым в контуре поглощения метана, обеспечивающий высокую кратковременную стабильность частоты (при времени усреднения не более 1 с);

- разработана методика расчета и проектирования внутрирезонаторной метановой ячейки, позволяющая определить оптимальные характеристики резонанса насыщенной дисперсии метана, обеспечивающие предельно достижимые уровни стабильности частоты лазерного излучения;

- предложен модифицированный метод косвенной оценки предельно достижимой нестабильности частоты лазерного излучения, позволивший оценить девиацию Аллана частоты лазерного излучения задающих генераторов при отсутствии эталонных источников.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенный метод стабилизации частоты лазерного излучения по резонансам насыщенной дисперсии позволяет достичь величины девиации Аллана $5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с, что соответствует современным требованиям для компактных оптических стандартов частоты;

- реализация метода стабилизации частоты лазерного излучения по резонансам насыщенной дисперсии достигается наиболее эффективным образом за счет спектральной селекции соседних продольных мод твердотельного лазера в одномодовом режиме и использования метановой ячейки для формирования реперной частоты;

- используемый в схеме твердотельный $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазер с длиной волны излучения 2,36 мкм обеспечивает в режиме частотного сканирования формирование сверхузкого резонанса насыщенной дисперсии E(2) линии метана колебательно-вращательной полосы $\nu_1 + \nu_4$.

Практическая ценность работы:

- результаты работы использованы при создании действующего образца оптического стандарта частоты с девиацией Аллана не более $5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с, разработанного МГТУ им. Н. Э. Баумана совместно с Физическим институтом им. П. Н. Лебедева РАН;

- разработанный и изготовленный экспериментальный макет перестраиваемого по частоте $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с внутрирезонаторной метановой ячейкой может быть использован в качестве источника излучения при создании систем внутрирезонаторной лазерной спектроскопии, оптических лидаров, генерации суперконтинуума в среднем инфракрасном диапазоне.

Достоверность работы основана на анализе выполненных ранее научно-исследовательских работ по предмету исследования и

верификации полученных расчетных соотношений в ходе экспериментального исследования.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на конференциях: 16th International conference Laser Optics 2014 (Санкт-Петербург, 2014 г.); The Siegman International School on Lasers, Stanford University, USA (Stanford, 2014 г.); 28th European Frequency and Time Forum, Switzerland, (Neuchatel, 2016 г.); 7-й Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», (Суздаль, 2014 г.); Conference on Lasers and Electro - Optics USA 2015, California, USA (San Jose, 2015 г.); XVIII Symposium and School on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus (Томск, 2015 г.); XXVII Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине», (Туапсе, 2015 г.); ICONO/LAT 2016, (Минск, 2016 г.); VI Международная конференция «Фотоника и информационная оптика», (Москва, 2017 г.); 2018 Frontiers in Optics + Laser Science conference, USA, (Washington, 2018 г.).

Внедрение и использование результатов работы. Результаты научно-квалификационной работы внедрены и применены в МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН. Материалы научно-квалификационной работы использованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Реализация результатов работы подтверждается соответствующими актами внедрения. Научные исследования в рамках научно-квалификационной работы поддержаны грантом РНФ № 16-19-10694 «Фемтосекундные делители и синтезаторы частоты на холодных молекулах метана», стипендией Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2015-2017 годы.

Публикация результатов. Основные результаты опубликованы в 9 статьях, в том числе в 7 статьях в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 7 из которых входят в международную базу Scopus.

Личный вклад автора заключается в экспериментальном и теоретическом обосновании метода стабилизации частоты излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера по резонансам насыщенной дисперсии метана.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованных источников. Материал изложен на 144 страницах машинописного текста и содержит 103 рисунка, 5 таблиц и список использованных источников из 78 библиографических описаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и практическая применимость результатов.

В первой главе проведено исследование возможных путей повышения стабильности частоты излучения задающих генераторов для создания транспортируемых систем с уровнем нестабильности частоты $5 \cdot 10^{-15}$. Рассмотрены методы стабилизации частоты лазерных источников излучения, на базе которых построены современные задающие генераторы, имеющие наиболее высокие значения кратковременной стабильности частоты в мире. Среди них выделяются основные три метода. Первым из них является метод Паунда-Дривера-Холла, для реализации которого необходимо иметь высокочастотный интерферометр Фабри-Перо, а также электрооптический модулятор для осуществления фазовой модуляции излучения. Одним из рассмотренных вариантов реализации высокостабильного задающего генератора на базе метода Паунда-Дривера-Холла является эрбиевый волоконный лазер, стабилизированный по резонатору с сверхнизким коэффициентом теплового расширения (ULE), который создан компанией Menlo Systems. Девиация Аллана для задающего генератора на базе ULE резонатора компании Menlo Systems при времени усреднения 1 с составляет $1,5 \cdot 10^{-15}$. Вторым из рассмотренных вариантов реализации высокостабильного задающего генератора на базе метода Паунда-Дривера-Холла является задающий генератор на основе эрбиевого лазера, стабилизированного с помощью кремниевого резонатора, который является совместной разработкой JILA и РТВ. Значение нестабильности частоты при времени усреднения 1 с для него составляет $5 \cdot 10^{-17}$. К преимуществу задающих генераторов, стабилизированных с помощью метода Паунда-Дривера-Холла, можно отнести высокий уровень стабильности частоты. Однако данные установки являются нетранспортабельными и не позволяют использовать их в настоящее время в качестве мобильных задающих генераторов для передающих невозмущенную частоту перехода реперов. Поэтому для достижения цели работы необходимо использовать другие методы стабилизации частоты.

Второй метод стабилизации частоты лазерного излучения основан на переносе спектра модуляции. В качестве примера использования данного метода рассмотрен задающий генератор со стабилизацией частоты Nd:YAG лазера по внешней ячейке, заполненной йодом. Нестабильность частоты при времени усреднения 1 с для этого задающего генератора составляет $6 \cdot 10^{-15}$. К преимуществам данной реализации задающего генератора со стабилизацией частоты по методу переноса спектра модуляции можно отнести относительную компактность системы и низкий уровень нестабильности частоты. Вместе с тем отсутствуют возможности

значительного улучшения системы, так как ее теоретический предел лежит на уровне $1 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с, что делает его малоперспективным для задач повышения стабильности частоты малогабаритных задающих генераторов.

К третьей группе относятся частотные методы детектирования с регистрацией резонансов насыщенной дисперсии (частотных резонансов). В них чувствительность регистрации определяется в основном частотными шумами самого лазера, в то время как для амплитудных методов важными являются шумы фотодетектора.

В работе проведен подробный сравнительный анализ перечисленных методов и научно обоснован выбор метода стабилизации частоты по резонансам насыщенной дисперсии. Он является наиболее перспективным для создания компактного лазера с уровнем кратковременной нестабильности частоты $1 \cdot 10^{-16}$ с возможностью транспортировки и использования в качестве задающего генератора в системах воспроизведения невозмущенного перехода для создания оптических реперов. Для его реализации необходимо, чтобы лазер работал в режиме генерации двух соседних продольных мод. При этом расстояние между частотами должно удовлетворять следующему неравенству:

$$\gamma < \nu_{12} = |\nu_1 - \nu_2| < kU,$$

где γ – однородная ширина резонанса, kU – доплеровская ширина линии поглощения.

Необходимо, чтобы одна из частот, например, ν_2 , находилась внутри однородной ширины резонанса, а ν_1 – вне этой ширины. Тогда при изменении длины резонатора происходит нелинейное затягивание частоты ν_2 к центру линии ν_0 , в то время как частота ν_1 будет выступать в роли «идеального» внутреннего гетеродина, как показано на Рисунке 1.

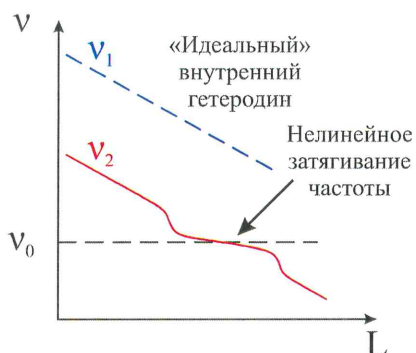


Рисунок 1. Изменение частоты от длины волны для двух мод

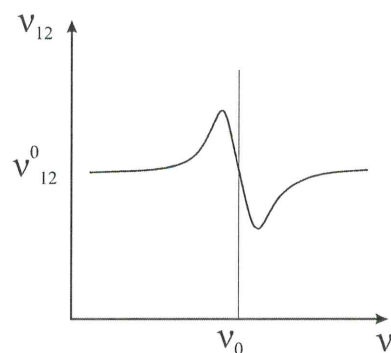


Рисунок 2. Резонанс насыщенной дисперсии

Эффект нелинейного затягивания частоты описывается соотношением Крамерса–Кронига, связывающим изменение коэффициента поглощения с изменением показателя преломления поглощающей среды в окрестности лоренцовского контура. В сигнале биений двух соседних продольных мод резонатора, показанном на

Рисунке 2, будет также наблюдаться сигнал дисперсионной формы с центром на частоте невозмущенного перехода ν_0 .

При этом как видно из Рисунка 2 величина нестабильности частоты, которая может достигаться при использовании данного метода, определяется шумами частоты межмодовых биений лазера $\delta\nu_{12}$, а также крутизной резонанса вблизи частоты ν_0 , которая в свою очередь определяется отношением величины резонанса к его ширине и называется коэффициентом автостабилизации:

$$S = \frac{\Delta\nu_{12}}{\gamma}.$$

Наилучшие результаты в мире по стабилизации частоты по резонансам насыщенной дисперсии были получены с He-Ne лазером с внутрирезонаторной ячейкой, заполненной метаном. Для стабилизации частоты используется моноблочный He-Ne лазер, излучающий на длине волны 3,39 мкм. Стабилизация частоты лазера осуществляется по резонансам насыщенной дисперсии метана. Для внутрирезонаторной внутريدоплеровской спектроскопии метана используется линия поглощения F2(2) перехода P(7), которая обладает магнитной сверхтонкой структурой. Измеренная величина девиации Аллана для He-Ne лазера при времени усреднения 1 с составляет $7 \cdot 10^{-15}$.

К преимуществам реализации стабилизации частоты по резонансам насыщенной дисперсии можно отнести компактность системы, возможность использования ее в качестве задающего генератора для реперов, однако текущий уровень стабильности частоты находится ниже других систем мирового уровня. Это связано с тем, что в данном варианте системы использовался He-Ne лазер, а, следовательно, и соответствующая не самая эффективная линия поглощения метана. Стоит отметить, что в работе указана возможность значительного уменьшения нестабильности частоты за счет использования других линий поглощения метана до уровня $1 \cdot 10^{-16}$.

В работе был научно обоснован выбор наиболее перспективной линии поглощения метана для создания лазера с повышенной стабильностью частоты на длине волны $\lambda = 2,3616$ мкм, которая является переходом с линии 2E на линию 3E ветви R(2) полосы $\nu_1 + \nu_4$ вместо линии F2(2) перехода P(7) полосы ν_3 метана, традиционно используемой в He-Ne стандартах частоты. Было показано, что для уменьшения влияния квадратичного эффекта Доплера необходимо охлаждать ячейку с метаном до криогенных температур. Для разработки задающего генератора на основе метода стабилизации частоты по резонансу насыщенной дисперсии линии E(2) полосы $\nu_1 + \nu_4$ метана был осуществлен выбор активной среды, спектр излучения которой содержит в себе длину волны 2,36 мкм. На основании рассмотрения и сравнительного анализа физических и спектральных характеристик сред был сделан выбор в пользу кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ для использования в качестве активной среды. Для его накачки

был использован тулиевый волоконный лазер с длиной волны излучения $\lambda = 1940$ нм, который из коммерчески доступных вариантов лазеров является ближайшим к максимуму спектральной характеристики поглощения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$.

На основании выбранного метода стабилизации частоты лазерного излучения, линии поглощения метана и активной среды была разработана структурно-функциональная схема двухмодового $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с внутрирезонаторной метановой ячейкой. Рассмотрены особенности построения резонатора для реализации лазерной генерации и возможности расположения кюветы и спектрально-селективных элементов внутри него. Обоснована необходимость применения сразу нескольких спектрально-селективных элементов для одновременной отстройки длины волны генерации от максимума усиления активной среды и для реализации режима генерации двух соседних продольных мод, необходимого для осуществления стабилизации частоты по резонансам насыщенной дисперсии. Предложено использовать охлаждение ячейки с метаном до 77 К для повышения амплитуды резонансов насыщенной дисперсии, а для уменьшения ширины резонанса – вакуумную откачку до уровня 10^{-5} – 10^{-6} атм. Показано, что для детектирования резонансов необходимо использовать две петли обратной связи, сигналы с которых будут подаваться на пьезокерамические пакеты установленные на глухое зеркало резонатора и сканирующий интерферометр Фабри-Перо, соответственно. Методики расчета основных элементов для разработки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с возможностью стабилизации частоты по метановой ячейке приведены во второй главе.

Во второй главе проведена разработка метода стабилизации частоты $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера по резонансам насыщенной дисперсии линии E(2) полосы $\nu_1 + \nu_4$ метана. Для получения стабильного режима генерации $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера была разработана методика расчета четырехзеркального резонатора с компенсацией астигматизма и влияния тепловой линзы. Углы поворота сферических зеркал для компенсации астигматизма предварительно рассчитаны согласно методике Когельника. Для дальнейшего расчета параметров резонатора был учтен эффект возникновения тепловой линзы в твердотельных активных элементах. В результате фокусировки мощного излучения накачки в твердотельной активной среде область вблизи оптической оси, а также передняя грань кристалла нагреваются сильнее удалённых от неё областей, что приводит к возникновению градиента температуры в среде. Ввиду наличия зависимости показателя преломления среды от температуры, такой градиент ведет к возникновению оптической силы у плоскопараллельной пластинки кристалла, что при установке активной среды под углом Брюстера ведет к возникновению дополнительного астигматизма в системе. Расчет эквивалентного фокусного расстояния тепловой линзы, возникающей в активной среде, с учетом мощности нагрева и параметров среды позволяет найти

необходимые углы для компенсации астигматизма и сохранения устойчивости резонатора. Совпадение значений перетяжки, угла расходимости и конфокального параметра показывает правильность разработанной методики расчета.

Для реализации метода стабилизации частоты $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера по резонансам насыщенной дисперсии метана необходимо, чтобы он осуществлял генерацию в режиме двух соседних продольных мод. Поэтому была проведена разработка спектрально-селективных элементов, позволяющих как сдвинуть длину волны излучения от максимума усиления среды, так и сузить спектр излучения до двух соседних продольных мод. Для этого были рассчитаны конструктивные параметры и промоделированы спектры пропускания. С целью смещения длины волны излучения от максимума усиления среды был использован интерференционно-поляризационный фильтр Лио из кристаллического кварца. Предварительное сужение спектра осуществлялось с помощью фильтра Лио из ниобата лития. В свою очередь для сужения спектра пропускания для генерации двух соседних продольных мод лазером использовался воздушный эталон Фабри-Перо. График суммарного пропускания трех спектрально-селективных элементов с учетом числа проходов и четыре продольные моды показаны на Рисунке 3, который подтверждает правильность разработанной методики расчета.

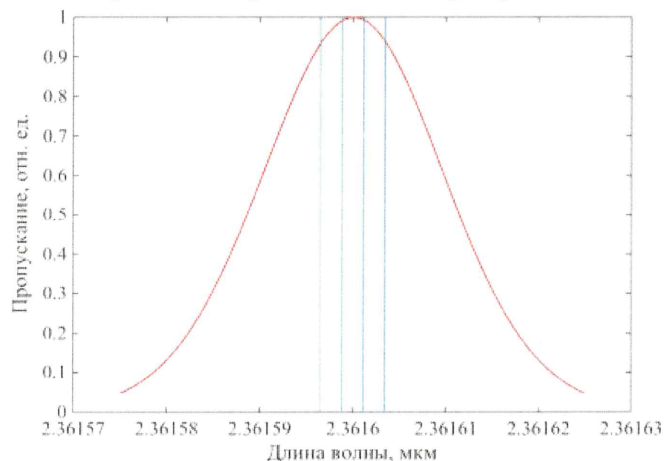


Рисунок 3. Суммарный график пропускания трех спектрально-селективных элементов с учетом числа проходов

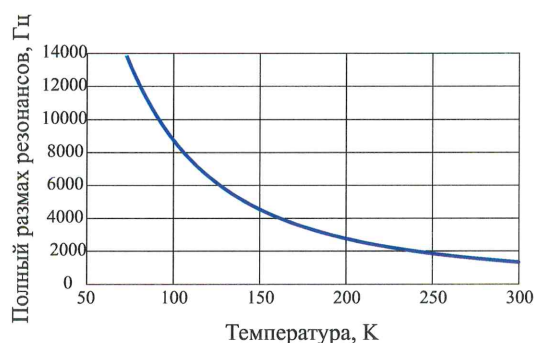


Рисунок 4. Зависимость полного размаха резонанса от температуры ($p=2,2$ мкбар, $l=250$ мм, $L=1200$ мм и $I=0,85$)

Для оценки нестабильности частоты будущего оптического стандарта частоты обычно используется дисперсия Аллана. Для достижения минимальной девиации Аллана и, как следствие, максимальной стабильности частоты для пассивных стандартов в случае белого шума необходимо получать наибольшее возможное значение величины сигнала. В случае стабилизации частоты лазерного излучения по резонансам

насыщенной дисперсии метана она является полным размахом (удвоенной амплитудой) полученного резонанса. Поэтому в диссертации была проведена разработка методики расчета параметров внутрирезонаторной метановой ячейки для достижения максимальной стабильности частоты, определена зависимость амплитуды резонансов насыщенной дисперсии от параметров ячейки и лазерного излучения. Для этого была получена аналитическая формула для вычисления коэффициента поглощения:

$$\alpha_{JJ'} = \frac{\sqrt{2}\pi^2 N_0 T_0 M^{1/2} B_0^{3/2} T^{-3}}{hc \cdot 760} \times \exp\left[\frac{-B_0(J + 1/2)^2}{T}\right] \sigma_{JJ'} g_J \mathcal{R}_{JJ'},$$

где N_0 – константа Лошмидта, h – постоянная Планка, c – скорость света, T_0 – температура соответствующая нормальным условиям, M – молекулярная масса, B_0 – вращательная постоянная основного состояния, T – температура газа, J и J' – вращательные квантовые числа полного углового момента нижнего и верхнего уровня, соответственно, $\sigma_{JJ'}$ – волновое число перехода $J \rightarrow J'$, g_J – ядерный спин статсуммы, который соответственно равен 5, 2 или 3 для переходов А-, Е- и F-симметрии, $\mathcal{R}_{ij}$ – взвешенный квадрат момента перехода.

Итоговая формула для вычисления полного размаха резонанса была получена с учетом параметров ячейки и параметра насыщения:

$$A(T) = \frac{\alpha_{JJ'} p c l}{2\sqrt{2}\pi L} \frac{\sqrt{I+1} - \sqrt{\frac{I}{2}+1}}{\sqrt{I+1} \sqrt{4\sqrt{(I+1)\left(\frac{I}{2}+1\right)} - I}},$$

где p – давление газа, l – длина ячейки; L – длина резонатора, I – параметр насыщения.

Для фиксированных параметров лазерного излучения, геометрических параметров ячейки и давления внутри нее была построена зависимость полного размаха резонанса от температуры, которая показана на Рисунке 4.

Полученная теоретическая зависимость в третьей главе диссертации будет сравнена с экспериментальной для подтверждения правильности теоретических положений и расчетных соотношений.

После разработки элементов задающего генератора и сборки экспериментального стенда необходимо измерить основной параметр, характеризующий стандарты частоты, а именно нестабильность частоты. В работе рассмотрены существующие прямые методы измерения и описаны схемы для их осуществления. Первым вариантом является создание двух идентичных установок для измерения нестабильности их частоты друг относительно друга. Также можно использовать один из двух методов, связанных с использованием фемтосекундной гребенки частот и перехода в радиодиапазон для сравнения с существующими стандартами частоты этого диапазона. Однако каждый из рассмотренных методов является

сложным и предполагает разработку большого числа дополнительных устройств. Поэтому в работе предложено использовать метод косвенной оценки нестабильности частоты по следующей формуле:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\delta\omega_{12}}{S_0 \cdot \nu_0 \sqrt{2\tau}},$$

где $\delta\omega_{12}$ – спектральная плотность шума частоты межмодовых биений, τ – время усреднения, ν_0 – частота излучения, $S_0 = A/\gamma$ – коэффициент автостабилизации, A – полный размах резонанса насыщенной дисперсии метана (удвоенная амплитуда), γ – ненасыщенная однородная ширина резонанса насыщенной дисперсии метана.

В соответствии с предложенным методом, для получения значения максимально достижимой стабильности частоты необходимо провести измерение четырех величин: частоты излучения лазера, спектральной плотности шума частоты межмодовых биений, полный размах и ненасыщенную однородную ширину резонанса насыщенной дисперсии метана.

Значение предельно достижимой нестабильности можно оценить снизу при условии учета шумов Шавлова-Таунса и соотношения A/γ (коэффициента автостабилизации) примерно равного единице. При подстановке типичной для твердотельных лазеров ширины линии излучения порядка 5 МГц, частоты излучения 127 ТГц и предполагаемой выходной мощности порядка 50 мВт получим величину шумов Шавлова-Таунса $0,009 \text{ Гц}/\sqrt{\text{Гц}}$. Оцененная снизу нестабильность частоты в этом случае составит $5,1 \cdot 10^{-17}$ при $\tau = 1 \text{ с}$, что на два порядка превосходит значение для лучших образцов задающих генераторов.

Таким образом, во второй главе были разработаны методики расчета основных элементов $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера для стабилизации его частоты по резонансам насыщенной дисперсии метана. Показано, что ввиду сложности применения прямых методов измерения нестабильности частоты $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера, в работе предложено использовать метод косвенной оценки. При этом необходимо разработать экспериментальный макет и провести исследования и измерения четырех величин, необходимых для расчета нестабильности частоты: частоты излучения лазера, спектральной плотности шума частоты межмодовых биений, полный размах и ненасыщенную однородную ширину резонанса насыщенной дисперсии метана, что будет сделано в главе 3.

В третьей главе проведена разработка экспериментального макета перестраиваемого по частоте $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с внутривибрационной метановой ячейкой на основе структурно-функциональной схемы и расчетных соотношений главы 2. Разработаны конструктивные элементы резонатора и спектрально-селективных элементов. На техническое решение для реализации сканирующего моноблочного интерферометра Фабри-Перо подана заявка на полезную модель. Для обеспечения

необходимых параметров метановой ячейки была разработана и собрана конструкция, обеспечивающая возможность охлаждения газа до 77 К с использованием безазотного криокуллера и создания внутри нее высокого вакуума.

Для подтверждения теоретических положений и расчетных соотношений диссертации был проведен ряд экспериментальных исследований на разработанном макете. В частности, было проведено исследование спектральной характеристики излучения лазера накачки для определения центральной длины волны излучения и ее зависимости от тока накачки. Определен диапазон изменений длины волны излучения тулиевого волоконного лазера в зависимости от величины тока, который показан на Рисунке 5.

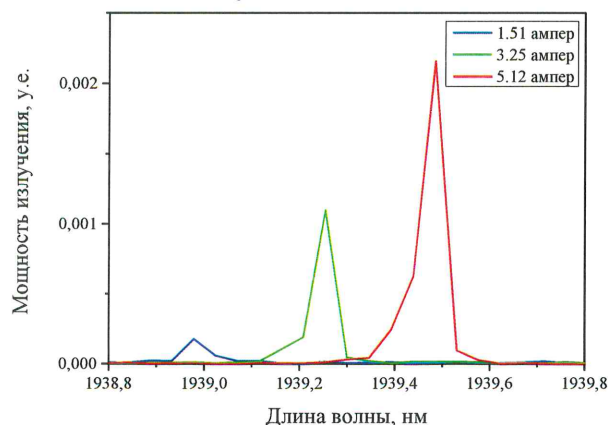


Рисунок 5. Спектральная характеристика излучения тулиевого волоконного лазера при трех значениях тока накачки

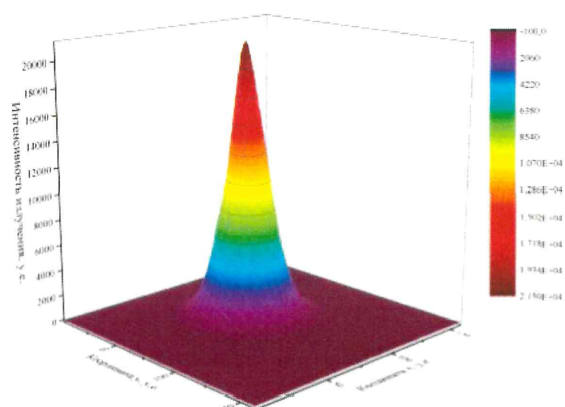


Рисунок 6. Распределение интенсивности в пучке лазера

Показано, что при изменении тока накачки происходит незначительное смещение длины волны, что не окажет влияния на работу лазерной установки. При этом рабочий диапазон выходных мощностей лазера накачки находится значительно выше порога, что гарантирует работу лазера в непрерывном режиме.

Для получения высокой эффективности преобразования мощности излучения накачки в излучение генерации, необходимо совместить по размеру моды обоих пучков. В случае многомодовой накачки может происходить непрерывное изменение профиля пучка за счет перераспределения энергии между модами высших порядков и это приведет к амплитудной модуляции, переходящей в частотные шумы $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера, что скажется на стабильности его частоты. Поэтому важно использовать одномодовый источник накачки. С целью подтверждения паспортных данных накачки необходимо провести измерение профиля пучка накачки, результат которого показан на Рисунке 6 и подтверждает одномодовый режим работы тулиевого лазера накачки.

Частотные шумы $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера сильно зависят от множества факторов, в том числе от амплитудных шумов излучения лазера накачки. В этой связи в работе создан экспериментальный стенд для измерений амплитудных шумов лазера накачки. Были измерены спектральные плотности мощности шума лазера накачки и фотоприемного устройства, показанные на Рисунке 7. На частоте 10 кГц величина шума лазера накачки составила -77 дБ/Гц и, как показал эксперимент по измерению шумов частоты междомодовых биений $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера, он не оказывает серьезного влияния на шумы задающего генератора.

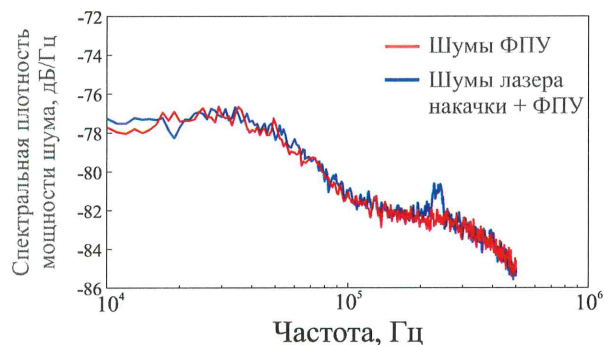


Рисунок 7. Экспериментальная зависимость спектральной плотности мощности шума от частоты

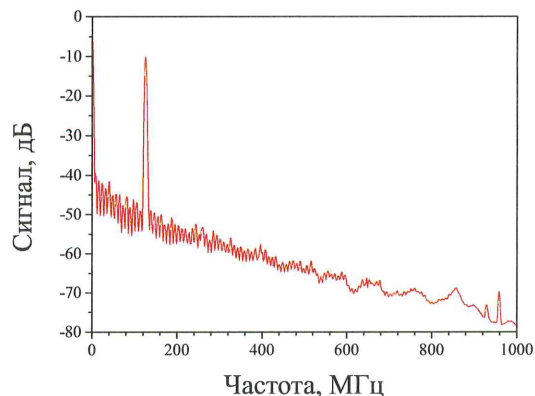


Рисунок 8. Результат измерения радиочастотного спектра излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера

Как было описано в главе 1, для реализации метода стабилизации частоты по резонансам насыщенной дисперсии необходимо достичь работы лазера в режиме двух соседних продольных мод. Поэтому в работе было проведено экспериментальное исследование спектрального состава излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера. Режим работы лазера был подтвержден двумя способами: с помощью внешнего сканирующего интерферометра и с помощью измерения радиочастотного спектра излучения, который показан на Рисунке 8.

Длина волны излучения лазера после предварительной юстировки спектрально-селективных элементов была измерена на измерителе длины волны HighFinesse Angstrom WS6-200 и составила 2361,60 нм, что в частотной области составляет 127 ТГц, и будет использована для получения значения нестабильности частоты, рассчитанной по экспериментальным данным.

Помимо частоты излучения для получения величины нестабильности частоты необходимо провести измерение спектральной плотности шума частоты междомодовых биений, что было также осуществлено на экспериментальном макете. Результаты измерений показаны на Рисунке 9. Как видно из Рисунка 9, частотный шум может быть оценен величиной $0,03 \text{ Гц/Гц}^{1/2}$, что лишь в три раза превышает шумы Шавлова-Таунса.

Данная величина в дальнейшем будет использована для оценки нестабильности частоты $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера.

Значения амплитуд и ширин резонансов насыщенной дисперсии, были получены с использованием экспериментального макета по схеме, показанной на Рисунке 10.

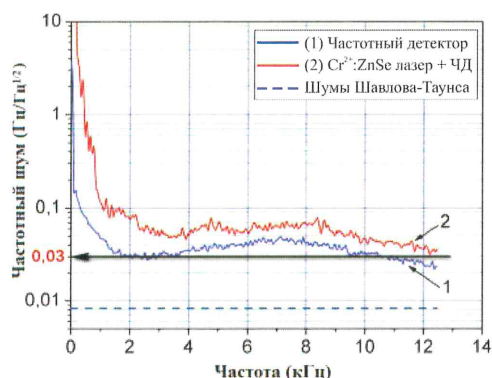


Рисунок 9. Зависимость частотного шума $\delta\omega_{12}$ от частоты в полосе от 4 Гц до 12,5 кГц для $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера

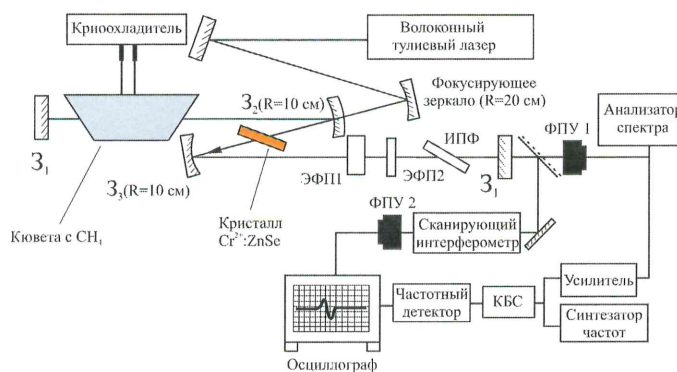


Рисунок 10. Структурная схема для измерения параметров резонансов насыщенной дисперсии

Полученные резонансы насыщенной дисперсии метана при различных температурах показаны на Рисунке 11. Максимальный размах резонансов насыщенной дисперсии наблюдался при температуре 77 K и составил 13,3 кГц. Калибровка по оси отстройки частоты, показанной на Рисунке 11, выполнена с использованием внешнего сканирующего конфокального интерферометра Фабри-Перо. Полная ширина резонансов не изменялась от температуры и составила 400 кГц.

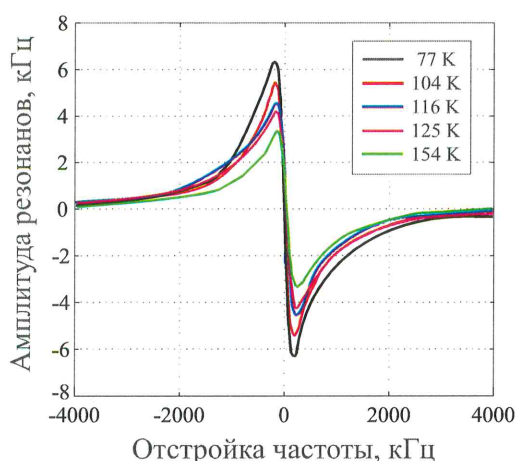


Рисунок 11. Резонансы насыщенной дисперсии, полученные при различных температурах

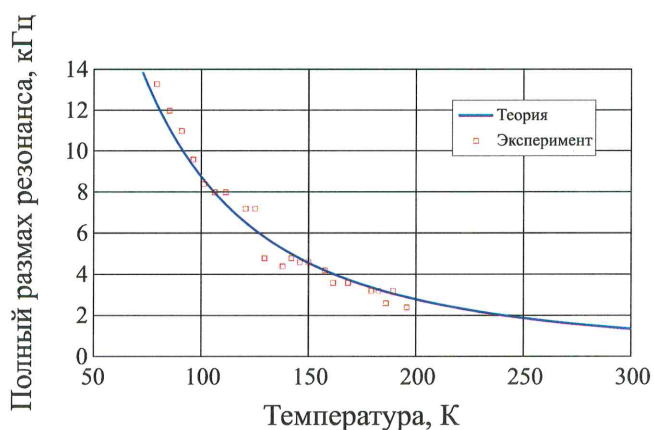


Рисунок 12. Теоретическая и экспериментальная зависимость полного размаха резонансов насыщенной дисперсии метана от температуры

Для подтверждения теоретических положений и расчетных соотношений второй главы диссертации было проведено сравнение экспериментальных данных по измерению амплитуд резонансов насыщенной дисперсии с теоретической зависимостью, результат которого показан на Рисунке 12.

Анализ данных Рисунка 12 показывает хорошее согласование между вычисленными и измеренными значениями полного размаха резонансов (линейный коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,99). Максимальная относительная разность двух наборов значений составляет 20 % вблизи температуры 130 К. Совпадение результатов говорит о том, что температура охлаждающей системы такая же, как и температура газа, что также подтверждает качество проведения эксперимента.

Используя полученные экспериментальные данные, была проведена оценка предельно достижимой нестабильности частоты $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера с внутрирезонаторной метановой ячейкой, которая составила $5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с, что превосходит текущие мировые значения для аналогичных компактных задающих генераторов. В случае устранения эффектов уширения линии метана можно получить резонансы с шириной 40 кГц, что на порядок меньше экспериментальных данных, полученных в этой работе, что позволило бы увеличить на порядок стабильность частоты $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Предложен метод стабилизации частоты твердотельных лазерных источников по резонансам насыщенной дисперсии метана, позволяющий достичь величины нестабильности частоты $5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с, что соответствует современным требованиям для компактных оптических стандартов частоты;

2. Показано, что реализация метода стабилизации частоты лазерного излучения по резонансам насыщенной дисперсии достигается наиболее эффективным образом за счет спектральной селекции соседних продольных мод твердотельного лазера в одномодовом режиме и использования метановой ячейки для формирования реперной частоты;

3. Разработан твердотельный $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазер с длиной волны излучения 2,36 мкм, который обеспечивает в режиме частотного сканирования формирование сверхузкого резонанса насыщенной дисперсии $E(2)$ линии метана колебательно-вращательной полосы $\nu_1 + \nu_4$;

4. Разработан метод косвенной оценки нестабильности частоты лазерного излучения, который обеспечивает получение величины девиации Аллана при отсутствии эталонных источников;

5. Экспериментальные результаты, полученные в ходе исследования лабораторного макета, подтверждают правильность теоретических положений и расчетных соотношений.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Application of the methane saturated dispersion resonance near over the temperature range of 77–300 K for optical frequency standards / M. K. Tarabrin [et al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. Т. 177. С. 241-247. (0,72 п.л./0,65 п.л.)

2. Cr:ZnSe laser generation in two longitudinal modes regime with intracavity monoblock Fabry-Perot interferometer for methane saturation spectroscopy/ M. K. Tarabrin [et al.] // Laser Science. Optical Society of America, 2018. С. JTu3A.141. (0,23 п.л./0,15 п.л.)

3. Высокостабильные оптические стандарты частоты на газовых ячейках для практических применений/ М. К. Тарабрин и др. //Метрология времени и пространства. 2014. С. 19-19. (0,12 п.л./0,06 п.л.)

4. Testing of Cr:ZnSe laser with intracavity methane cell in 77–300 K temperature range/ M. K. Tarabrin [et al.] // 2014 International conference on laser optics. 2014. С. 1. (0,12 п.л./0,10 п.л.)

5. Study of methane saturated dispersion resonances amplitude near 2.36 μm over the temperature range 77–300 K/ M. K. Tarabrin [et al.] // Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2015 Conference on. IEEE, 2015. С. 1-2. (0,23 п.л./0,15 п.л.)

6. Thermo-optical and lasing characteristics of Cr^{2+} -doped CdSe single crystal as tunable coherent source in the mid-infrared/ M. K. Tarabrin [et al.] // Optical Materials Express. 2017. Т. 7. №. 11. С. 3815-3825. (1,32 п.л./1,0 п.л.)

7. Continuous-wave broadly tunable diode laser array-pumped mid-infrared Cr^{2+} :CdSe laser/ M. K. Tarabrin [et al.] // Laser Physics Letters. 2015. Т. 12. №. 12. С. 125003-125007. (0,6 п.л./0,5 п.л.)

8. Применение резонансов насыщенной дисперсии метана вблизи 2,36 мкм в температурном диапазоне 77-300 К для оптических стандартов частоты / М. К. Тарабрин [и др.] // Лазеры в науке, технике, медицине. – 2015. – С. 187-189. (0,34 п.л./0,3 п.л.)

9. Наблюдение резонансов насыщенной дисперсии метана в полосе $\nu_1 + \nu_4$ в диапазоне температур 77-300 К / М. К. Тарабрин [и др.] // Лазеры в науке, технике, медицине. – 2014. – С. 88-91. (0,46 п.л./0,4 п.л.)