

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Российской академии наук

На правах рукописи

Васьковская Мария Игоревна

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОВРЕМЕННУЮ  
СТАБИЛЬНОСТЬ СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА  
ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ  
НАСЕЛЕННОСТЕЙ**

Специальность: 1.3.19 —  
Лазерная физика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Зибров Сергей Александрович**

Официальные оппоненты: **Пальчиков Виталий Геннадьевич**,  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»,

**Саакян Сергей Арамович**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН,

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт спектроскопии» Российской академии наук

Защита состоится 5 июня 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.1.262.01,  
доктор физико-математических наук

А.С. Золотко

## Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время для работы космических аппаратов, синхронизации систем спутниковой геолокации, улучшения систем связи, осуществления фундаментальных научных экспериментов и многих других применений необходимо постоянное улучшение точности измерения частоты и временных интервалов. С середины XX века наиболее точными часами являются квантовые стандарты частоты, в которых в качестве источника колебаний используются квантовые переходы частиц (атомов, молекул, ионов).

Идея работы квантового стандарта заключается в связи частоты макроскопического генератора с частотой перехода квантовой частицы, что обеспечивает перенос стабильности частоты опорного квантового перехода (диапазон частот ГГц-ТГц) на частоту генератора (диапазон частот МГц) и уже ее использования в ряде применений. Задача повышения стабильности частоты квантовых стандартов, то есть их способности генерировать сигнал со слабо изменяющейся частотой, с начала их использования не теряет своей актуальности, а наряду с ней приобретает значимость и проблема миниатюризации высокотехнологичных устройств такого типа.

Наибольшим потенциалом для минимизации габаритов при сохранении относительно высокого уровня стабильности частоты обладают микроволновые стандарты на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПН) [1]. Коммерчески доступные устройства уже сейчас обладают объемом не более  $16 \text{ см}^3$  при стабильности на уровне  $10^{-11}(\tau)^{-1/2}$  [2]. В ряде технических задач требуется повышенная долговременная стабильность, недостижимая кварцевыми генераторами, поэтому КПН-стандарты частоты, способные обеспечить требуемые характеристики, уже производятся серийно [2, 3] и продолжают активно разрабатываться как за рубежом [4, 5], так и в России [6–8].

Эффект КПН заключается в том, что под действием двух оптических полей, резонансных двум смежным атомным переходам с общим верхним уровнем, ансамбль атомов переходит в непоглощающую оптическое излучение суперпозицию состояний. Экспериментально эффект наблюдается в зависимости пропускания атомной среды от разности частот оптических полей. Если разность совпадает с частотным интервалом между нижними уровня-

ми системы, то в сигнале пропускания наблюдается пик – КПН-резонанс, который используется в качестве опорного в стандарте частоты. В данной работе рассматривается КПН-резонанс в атомах  $^{87}\text{Rb}$ , частота которого, соответствующая сверхтонкому расщеплению основного состояния  $5S_{1/2}$ , лежит в СВЧ-диапазоне и равна примерно 6.8 ГГц. КПН-резонанс может формироваться на подуровнях с различными значениями проекции магнитного момента ( $m_F$ ), однако в стандарте используется резонанс, сформированный на подуровнях с  $m_F = 0$  из-за его меньшей чувствительности к магнитному полю.

Для наблюдения эффекта КПН, кроме равенства разности частот оптических полей частотному интервалу между нижними уровнями атомной системы с точностью до их ширины, необходимо также выполнение условия корреляции фазовых флуктуаций этих полей [9]. Одним из наиболее удобных и распространенных способов создания двух фазово-скоррелированных полей является модуляция частоты лазерного излучения. В результате такой модуляции спектр лазера становится многочастотным, при этом флуктуации фазы происходят одинаковым образом во всех спектральных компонентах.

Наиболее подходящим для малогабаритных устройств способом модулировать частоту лазерного излучения является СВЧ-модуляция тока накачки диодного лазера с вертикальным резонатором, излучающего с поверхности (англ. VCSEL – vertical-cavity surface-emitting laser). Такие лазеры отличаются от других типов диодных лазеров своей эффективной модуляцией тока накачки на высоких частотах, одномодовым режимом генерации и очень малым энергопотреблением. Эти особенности делают VCSEL чрезвычайно удобным инструментом для данного применения. Лазер является критически важным элементом стандарта, поскольку от его свойств зависят характеристики лазерного излучения, взаимодействующего с атомами и формирующего, в конечном итоге, метрологический резонанс.

Другим важным элементом КПН-стандарта частоты является атомная ячейка: кювета, заполненная щелочным металлом и вспомогательными газами, называемыми буферными газами (БГ). Технология изготовления ячеек и их наполнение определяют метрологические свойства КПН-резонанса и, как следствие, кратковременную и долговременную стабильность частоты стандарта.

Одним из основных факторов, ограничивающих долговременную стабильность является световой сдвиг, то есть сдвиг энергетических уровней атома под действием внешнего переменного электрического поля световой волны [10]. Световой сдвиг частоты резонанса КПН возникает из-за отличия световых сдвигов рабочих уровней. Изменение интенсивности излучения, мощности модулирующего ток СВЧ-сигнала и других рабочих параметров может приводить к флуктуациям и дрейфам частоты КПН-резонанса. Световой сдвиг может изменяться не только из-за прямого изменения перечисленных параметров, но и за счет косвенного их изменения под влиянием, например, температурных эффектов окружающей среды.

Кроме светового сдвига существуют и другие факторы, влияющие на частоту КПН-резонанса: температурная зависимость из-за влияния БГ, зависимость от величины магнитного поля, асимметрия контура резонанса и другие. Все эти эффекты связаны между собой через характеристики основных элементов КПН-стандарта – лазера и атомной ячейки. Поэтому задача исследования факторов, влияющих на долговременную стабильность частоты КПН-стандарта, является достаточно обширной и должна решаться посредством комплексного исследования характеристик используемых лазеров и атомных ячеек, влияния их на основные метрологические свойства КПН-резонанса, а также технических аспектов взаимосвязи между рабочими узлами КПН-стандарта.

**Целью** работы являлось детальное изучение факторов, оказывающих влияние на долговременную стабильность стандарта частоты на основе эффекта КПН и поиск возможностей уменьшения этого влияния.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Создать экспериментальную установку для исследования лазеров с вертикальным резонатором, характеристик КПН-резонансов в атомных ячейках, наполненных  $^{87}\text{Rb}$  и буферными газами ( $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ), а также для измерения стабильности частоты макета разрабатываемого КПН-стандарта.
2. Разработать методику поиска уровня СВЧ-модуляции тока накачки диодного лазера, обеспечивающего подавление светового сдвига. Исследовать поведение светового сдвига в зависимости от давления буферных газов в ячейке. Найти способ оценки изменения парциальных давлений буфер-

ных газов в ячейках, возникающего вследствие локального разогрева при лазерной герметизации.

3. Исследовать особенности спектральных и модуляционных характеристик используемых лазеров. Разработать методику оценки эффективности СВЧ-модуляции тока накачки лазера.
4. Определить характеристики КПН-резонанса, влияющие на стабильность, проанализировать взаимосвязи между ними. Выделить наиболее важные параметры, определяющие эти характеристики. Разработать алгоритм оптимизации характеристик КПН-резонанса.

**Научная новизна.** Все полученные в работе результаты являются оригинальными и имеют важное практическое и научное значение.

1. Проведено экспериментальное исследование характеристик лазеров типа VCSEL, включая эффективность СВЧ-модуляции тока накачки. Впервые описаны требования к характеристикам лазеров такого типа для применения их в составе КПН-стандартов частоты.
2. Впервые показано, что в случае формирования резонанса бихроматическим оптическим полем, полученным в результате СВЧ-модуляции тока накачки VCSEL, принципиальная возможность зануления светового сдвига зависит от суммарного давления буферных газов в атомной ячейке. Начиная с некоторого предельного давления, световой сдвиг частоты будет отличен от нуля для всех допустимых уровней СВЧ-модуляции.
3. Предложен метод стабилизации мощности модулирующего СВЧ-сигнала, основанный на использовании атомных ячеек с предельным значением суммарного давления буферных газов. В этом случае, существует значение мощности СВЧ-сигнала, при котором одновременно будет подавлено влияние на частоту КПН-резонанса флуктуаций как интенсивности лазерного излучения, так и мощности СВЧ-сигнала. Данный метод был опробован экспериментально и обеспечил улучшение стабильности частоты макета КПН-стандарта в два раза при времени измерения  $\tau = 1000$  секунд.
4. Впервые экспериментально показано, что зависимость частоты метрологического КПН-резонанса от величины магнитного поля имеет разный характер при формировании резонанса оптическим полем правой и левой циркулярной поляризации. При определенной комбинации поляризации

излучения и направления рабочего магнитного поля можно найти такое его значение, при котором будет подавлен линейный отклик на его флуктуации.

5. Впервые предложен алгоритм оптимизации характеристик КПН-резонанса, включающий в себя выбор парциальных давлений буферных газов, напускаемых в ячейку, ее рабочей температуры и интенсивности лазерного излучения.
6. Разработан оригинальный макет квантового дискриминатора КПН-стандарта частоты. С использованием произведенных в лаборатории атомных ячеек было достигнуто значение стабильности частоты КПН-резонанса  $\sigma(1000 \text{ с}) = 5.7 \cdot 10^{-13}$ , что превосходит аналогичные показатели коммерчески доступных устройств такого типа зарубежного производства.

**Научная и практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для создания малогабаритного стандарта частоты на основе эффекта КПН с улучшенными характеристиками, могут быть полезны в других областях науки и техники, где требуется использование атомных ячеек с щелочными металлами и лазеров типа VCSEL (магнитометрия, передача данных и т.п.). Кроме того, полученные результаты позволяют глубже понять суть вовлеченных в работу КПН-стандарта эффектов. Результаты, касающиеся особенностей работы исследованных лазеров, могут улучшить прогнозируемость и надежность их производства. Результаты исследования атомных ячеек могут быть использованы для усовершенствования технологических процессов производства атомных ячеек методом лазерной сварки и герметизации.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Для корректного описания экспериментальных спектров излучения лазера с вертикальным резонатором в режиме слабой СВЧ-модуляции необходим анализ на основе уравнений для комплексных амплитуд полей, позволяющих, в отличие от скоростных уравнений, учитывать фазовые соотношения.
2. Существует такое суммарное давление буферных газов, при котором для фиксированного уровня СВЧ-модуляции тока накачки диодного лазера

одновременно подавлена чувствительность частоты КПН-резонанса к вариациям интенсивности и спектрального состава излучения.

3. Линейный отклик частоты метрологического КПН-резонанса на вариации внешнего магнитного поля можно подавить при использовании определенной комбинации циркулярной поляризации лазерного излучения и направления заданного магнитного поля: в случае совпадения направлений распространения лазерного излучения и индукции магнитного поля ( $k \uparrow B$ ) требуется правая циркулярная поляризация, в случае  $k \downarrow B$  – левая.
4. Предложенный алгоритм выбора температуры, наполнения атомной ячейки и интенсивности лазерного излучения позволяет одновременно максимизировать отношение контраста КПН-резонанса к его ширине и подавить влияние температурных флуктуаций на его частоту.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием калиброванных и протестированных измерительных приборов. Результаты эксперимента воспроизводятся и находятся в соответствии с теоретическими расчетами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных конференциях: Лазерные и плазменные технологии 2017, 2019, 2020, 2021 (г. Москва), Modern Problems of Laser Physics-2021 (г. Новосибирск), Laser Physics-2022 (г. Аштарак, Армения).

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 5 статьях в рецензируемых печатных изданиях, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus, и в 7 тезисах докладов международных конференций. Список приведен на стр. 20–21.

**Личный вклад.** Все результаты, представленные в работе, получены автором лично или при его непосредственном участии. В публикациях [A1, A3-A5] автором были проведены экспериментальные исследования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 130 страницы с 52 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 112 наименований.



## Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследования и улучшения характеристик КПН-стандартов частоты, формулируется цель работы, ставятся задачи. Приводятся основные защищаемые положения, личный вклад диссертанта, а также научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

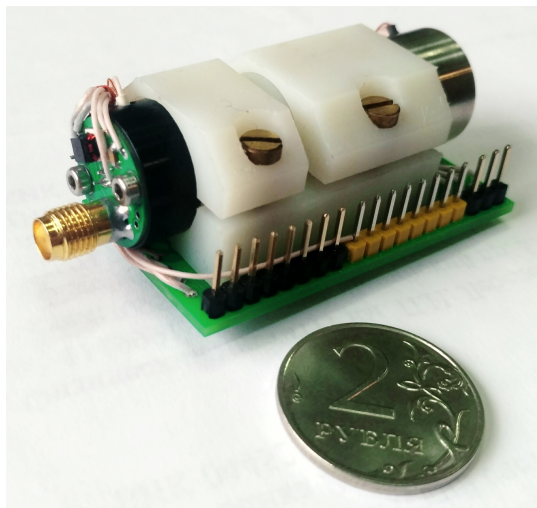
В первой главе описаны эффект КПН, устройство и принцип работы стандарта на основе данного эффекта. Рассматриваются требования к характеристикам опорного КПН-резонанса, а также детально представлена схема созданной в ходе работы экспериментальной установки.

Опорный КПН-резонанс в теории описывается лоренцевским контуром и главными его параметрами являются ширина на полувысоте ( $\Delta\nu$ ), амплитуда ( $A$ ) и контраст  $C = \frac{A}{A+B}$ , где  $B$  – уровень фоновой засветки. Перечисленные характеристики определяют один из основных показателей качества КПН-стандарта – стабильность его частоты. Для количественной оценки стабильности частоты обычно используют девиацию Аллана [11]. Принято различать два типа стабильности: кратковременную (на временах  $\tau < 100$  секунд), и долговременную ( $\tau > 100$  секунд), однако, эти границы довольно условны.

Для достижения наилучшей кратковременной стабильности необходимо, чтобы опорный КПН-резонанс обладал наибольшим контрастом и наименьшей шириной. Долговременная стабильность чаще всего определяется медленными дрейфами частоты резонанса, вызванными, например, изменением внешней температуры, мощности, частоты или спектра лазерного излучения, величины магнитного поля, мощности СВЧ-сигнала и др. Для контроля долговременной стабильности необходимо исследование влияния на частоту резонанса множества рабочих параметров, а также их взаимного влияния друг на друга.

Стандарт частоты на основе эффекта КПН условно можно разделить на две основные части: физический модуль, или квантовый дискриминатор, и блок электроники, обеспечивающий работу дискриминатора и выдачу необходимых частотных сигналов потребителю.

Квантовый дискриминатор – модуль, содержащий в себе ячейку с атомами, источник излучения, с помощью которого происходит формирование



а)



б)

*Рис. 1. а) Макет квантового дискриминатора, разработанный в Лаборатории стандартов частоты ТОП ФИАН в сборе. б) Составные элементы квантового дискриминатора (только часть с атомной ячейкой).*

требуемого состояния атомной среды и ее зондирование, и детектор излучения, сигнал с которого поступает в блок электроники на системы стабилизации основных рабочих параметров. На рис. 1 показан макет квантового дискриминатора, разработанный в ходе выполнения данной работы. Лазерным источником служит корпусированный VCSEL компании ULM Photonics, а атомная ячейка имеет цилиндрическую форму с диаметром 5 мм и длиной 8 мм (изготовлена в лаборатории).

В стандарте на основе эффекта КПН промежуточным звеном между частотой атомного перехода и частотой кварцевого генератора является частота модуляции тока накачки лазера. Перенос стабильности атомной частоты на частоту кварцевого генератора осуществляется за счет обратной связи, подстраивающей частоту СВЧ-модуляции тока лазера так, чтобы уровень пропускания лазерного излучения атомной ячейкой постоянно соответствовал вершине КПН-резонанса.

В работе использовалась экспериментальная установка, функционально повторяющая КПН-стандарт, но собранная в лабораторных условиях без минимизации габаритов. Установка состоит из двух частей – оптической и приборной; приборная часть представляет собой набор электронных приборов, необходимых для управления компонентами оптической части.

Схема оптической части экспериментальной установки представлена на рис. 2. В работе используется лазер VCSEL, излучающий в окрестно-

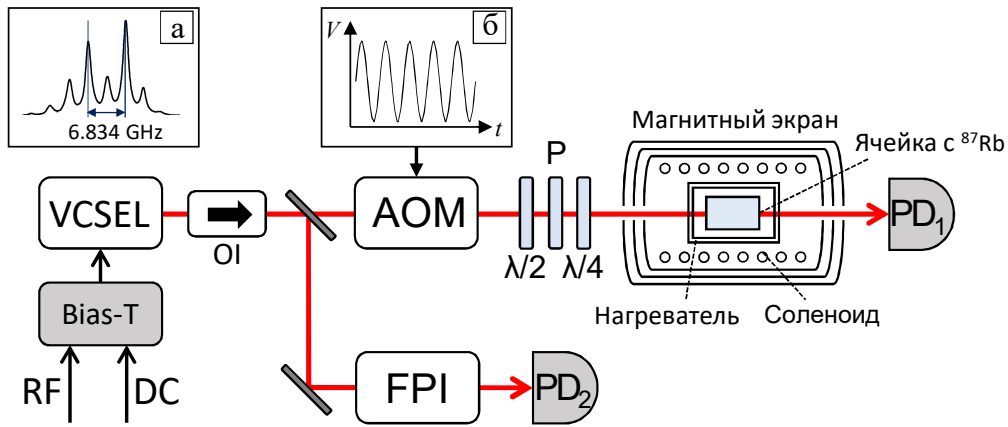


Рис. 2. Схема оптической части экспериментальной установки. VCSEL – лазер, Bias-T – смеситель для постоянного тока накачки (DC) и СВЧ-сигнала (RF), OI – оптический изолятор, АОМ – акусто-оптический модулятор (используется только для части задач),  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка, P – поляризатор,  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка, FPI – интерферометр Фабри-Перо, PD – фотоприемники. Вставка (а) – типичный вид спектра лазера, полученный в результате модуляции его тока накачки. Вставка (б) – управляющее напряжение, регулирующее мощность излучения, проходящего через АОМ.

сти длины волны  $\lambda = 795$  нм. Для формирования требуемого спектра лазерного излучения ток СВЧ-модуляции (RF) смешивается с постоянным током накачки (DC) в развязке-смесителе (bias-T). Развязка используется для предотвращения нежелательного воздействия источника постоянного тока и СВЧ-генератора друг на друга. Линейно поляризованное излучение лазера с полихроматическим спектром (рис. 2, а) коллимируется в параллельный пучок и, проходя через четвертьволновую пластинку, приобретает циркулярную поляризацию. Прошедшее через ячейку излучение регистрируется фотоприемником PD, сигнал с которого поступает на другие приборы экспериментальной установки. АОМ используется для модуляции мощности излучения, проходящего через атомную ячейку. После прохождения оптического изолятора часть излучения направляется на плоскопараллельный интерферометр Фабри-Перо (ИФП) с областью свободной дисперсии 25-30 ГГц. Одно из зеркал ИФП установлено на пьезокерамику. Изменение подаваемого на нее напряжения позволяет сканировать длину базы интерферометра и, тем самым, прописывать спектры исследуемых лазеров.

**Вторая глава** посвящена сдвигам частоты КПН-резонанса и методам их подавления. Рассмотрены различные типы сдвигов: световые сдвиги, сдвиги обусловленные асимметрией резонанса и изменением магнитного поля.

Изучены световые сдвиги КПН-резонанса в  $^{87}\text{Rb}$  под действием полихроматического лазерного излучения, полученного в результате СВЧ-модуляции тока накачки VCSEL. Известно, что в случае СВЧ-модуляции на частоте, соответствующей половине сверхтонкого расщепления атома, суммарный световой сдвиг частоты КПН-резонанса, являющийся суммой сдвигов от каждой спектральной компоненты излучения, может быть подавлен [12]. Для этого необходимо подобрать определенный вид спектра, то есть найти значение мощности модулирующего СВЧ-сигнала, при котором оптическая мощность старших боковых компонент ( $n \geq 2$ ) сравнима с суммарной мощностью несущей и первых боковых компонент.

Предложена и реализована экспериментальная методика поиска мощности СВЧ-модуляции, обеспечивающей подавление светового сдвига, использующая одновременное медленное сканирование мощности СВЧ-сигнала и модуляцию интенсивности лазерного излучения. Модуляция интенсивности при этом дает информацию о величине светового сдвига: частота КПН-резонанса будет откликаться на изменение интенсивности и величина отклика прямо пропорциональна величине сдвига. В общем случае, в зависимости частоты КПН-резонанса от мощности СВЧ-сигнала есть две точки без отклика на модуляцию, т.е. точки нулевого светового сдвига (для краткости – НСС). Было обнаружено, что точки НСС не всегда имеют одинаковую частоту, что связано с асимметрией резонанса.

Исследованы синфазный и квадратурный отклики КПН-резонанса на модуляцию частоты модулирующего СВЧ-сигнала на частоте, сравнимой с шириной резонанса. Продемонстрировано, что метод стабилизации светового сдвига на нулевом уровне, использующий совмещение нулей синфазного и квадратурного сигналов, применяемый в ДРОР [13] не может быть применен в случае эффекта КПН. Показано, что для случая КПН изменение интервала между нулями откликов при варьировании мощности СВЧ-сигнала не имеет строгой корреляции с нулем светового сдвига, а скорее указывает на наличие асимметрии резонанса.

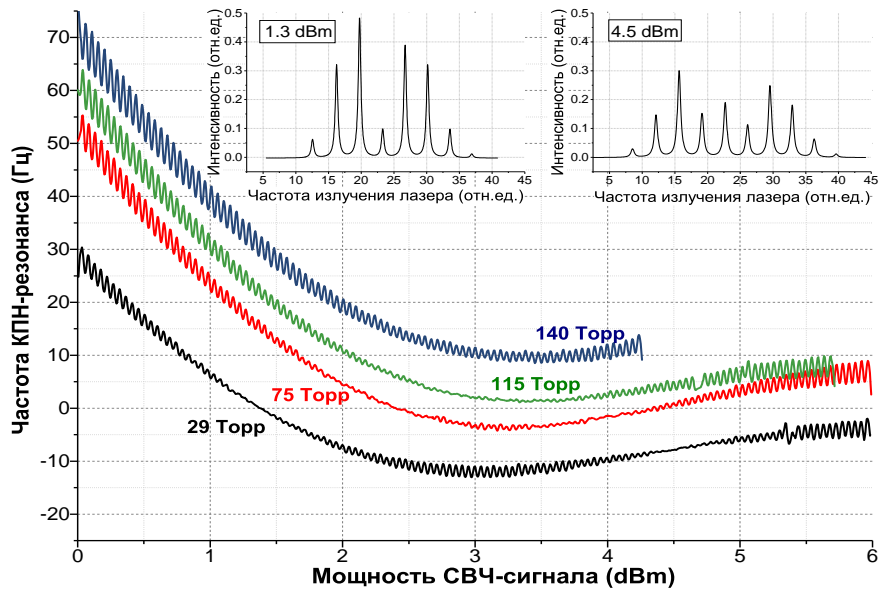


Рис. 3. Зависимость частоты КРН-резонанса от мощности СВЧ-сигнала при одновременной модуляции интенсивности излучения для четырех ячеек с различными давлениями БГ. Каждая кривая смещена по вертикальной оси вниз на  $(6\ 834\ 682\ 611 + \nu)$  Гц, где  $\nu$  – сдвиг от БГ. На вставки показаны спектры лазерного излучения в режиме модуляции для двух значений СВЧ-сигнала (1.3 dBm и 4.5 dBm), соответствующих нулям светового сдвига для ячейки 29 Торр.

В эксперименте было установлено, что при использовании одного и того же лазера с неизменными рабочими параметрами величина светового сдвига меняется для атомных ячеек с разным наполнением буферными газами. На рис. 3 приведены зависимости частоты КРН-резонанса от мощности СВЧ-поля при одновременной модуляции интенсивности излучения для ячеек с различными давлениями БГ. Видно, что по мере увеличения давления две точки НСС смещаются навстречу друг другу по горизонтальной оси, и, при давлении 115 Торр, сливаются. При дальнейшем увеличении давления (140 Торр) отклик частоты на модуляцию интенсивности не зануляется ни при каких значениях мощности СВЧ-сигнала, что означает, что световой сдвиг не сводится к нулю.

На основании этого результата был предложен новый метод реализации петли обратной связи для контроля подавления светового сдвига, основанный на использовании ячеек с таким суммарным давлением БГ (около 100 Торр), при котором есть только одна точка НСС, совпадающая с минимумом зависимости частоты КРН-резонанса от мощности СВЧ-сигнала. В такой конфигурации, стабилизация мощности СВЧ-сигнала в минимуме за-

висимости частоты КПН-резонанса от мощности СВЧ-сигнала обеспечивает одновременно подавление влияния флуктуаций как интенсивности излучения, так и мощности СВЧ-сигнала (спектра).

На макете квантового дискриминатора, использующего ячейки  $8 \times 15$  мм, при времени измерения  $\tau = 1000$  с было достигнуто значение девиации Аллана, равное  $\sigma(1000 \text{ с}) = 5.7 \cdot 10^{-13}$ , что превосходит аналогичные показатели, демонстрируемые коммерчески доступными устройствами такого типа.

Продемонстрирован эффект подавления линейного отклика частоты КПН-резонанса на изменения внешнего магнитного поля. Эффект реализуется при определенном значении магнитного поля из-за конкуренции между затягиванием частоты соседними резонансами и квадратичным зеемановским сдвигом. Обнаружено, что процесс обладает ориентационной асимметрией и подавление возможно только при определенной комбинации поляризации оптического поля и направления рабочего магнитного поля. Правильная конфигурация электромагнитных полей может значительно уменьшить частотные сдвиги, вызванные флуктуациями магнитного поля.

**Третья глава** посвящена исследованию спектральных и модуляционных характеристик лазеров VCSEL.

Сформулированы требования к спектру VCSEL в режиме СВЧ-модуляции его тока накачки для работы КПН-стандарта частоты. Спектр должен обладать:

- максимально достижимой степенью симметрии;
- минимально достижимой амплитудой несущей компоненты;
- суммарной оптической мощностью старших спектральных компонент ( $k \geq 2$ ), сравнимой или превышающей мощность несущей и первых боковых компонент.

Для количественной оценки возможности подавления светового сдвига выведено условие на амплитуды спектральных компонент для тонкого и толстого оптических слоев. Для тонкого слоя, при условии  $\Gamma \ll \Omega$  ( $\Gamma$  – константа релаксации когерентности, обусловленная столкновениями с атомами буферных газов,  $\Omega$  – частота СВЧ-модуляции), световой сдвиг занулится при

выполнении равенства:

$$I_0 + (I_1 + I_{-1})/4 = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{I_k + I_{-k}}{(k-1)(k+1)}, \quad (1)$$

где  $I_k$  – интенсивность  $k$ -й компоненты спектра. Для толстого оптического слоя, реализующегося на практике значительно чаще, данное равенство преобразуется в неравенство:

$$I_0 + \Sigma_1/4 < \Sigma_2/3 + \Sigma_3/8 + \Sigma_4/15 + \Sigma_5/24 + \dots, \quad (2)$$

где  $\Sigma_k = I_k + I_{-k}$ . Для подавления светового сдвига условие (2) является необходимым, но не достаточным.

Проведено исследование эффективности СВЧ-модуляции VCSEL. Экспериментально подтверждено, что теоретический подход, основанный на уравнениях Максвелла позволяет корректно описать спектральный состав и зависимость эффективности модуляции лазеров от уровня постоянного тока для различных частот модуляции. Сравнение теории и эксперимента представлено на рис. 4.

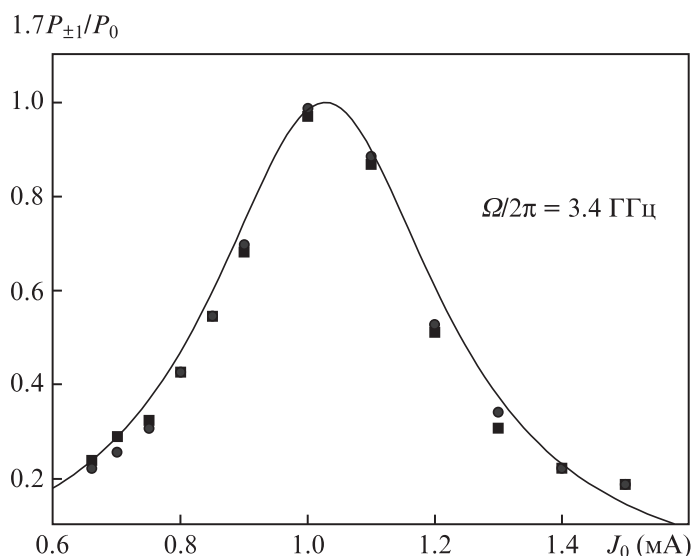


Рис. 4. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) зависимости отношения мощностей  $P_{\pm 1}/P_0$  от тока накачки для частоты СВЧ-модуляции, равной 3.4 ГГц (квадраты –  $P_{-1}$ , круги –  $P_{+1}$ ).

Обнаружено, что в общем случае спектр VCSEL в режиме СВЧ-модуляции тока накачки асимметричен, и степень асимметрии зависит от по-

стоянного уровня тока накачки. Наиболее симметричный спектр наблюдается вблизи тока, соответствующему максимуму эффективности СВЧ-модуляции.

Исследована поляризационная нестабильность излучения лазеров. Продемонстрировано, что при недостаточном подавлении побочной поляризационной моды возможно периодическое изменение поляризации генерирующей моды на ортогональную под действием оптической обратной связи. Показано, что изменение уровня модулирующего СВЧ-сигнала или рабочей температуры лазера приводит к увеличению области сосуществования двух поляризационных мод, что приводит к невозможности использования лазера с такими характеристиками в составе КПН-стандарта частоты.

В четвертой главе приведено описание методов изготовления и наполнения атомных ячеек, использующихся в составе КПН-стандарта частоты. Исследовались характеристики ячеек, произведенных методом лазерной сварки и герметизации, заполненных  $^{87}\text{Rb}$  и буферными газами: аргоном и азотом. Фотография изготовленных ячеек приведены на рис. 5.



*Рис. 5. Ячейки, изготовленные методом лазерной сварки и герметизации.*

При герметизации ячеек с помощью излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, из-за сильного локального нагрева стенок ячейки часть напускаемых БГ выбрасывается из ячейки. Отсутствие точной информации о наполнении ячейки ухудшает прогнозируемость ее характеристик, и, как следствие, характеристик всего стандарта частоты. По итогам исследований, было обнаружено, что во время герметизации ячеек  $8 \times 15$  мм из них истекает в среднем 27% изначально напущенных газов, а из ячеек  $5 \times 8$  мм – 48%. При этом изменение отношения парциальных давлений газов после герметизации не превышает 8%.



Проведено исследование температурной зависимости частоты КПН-резонанса в ячейках, наполненных БГ. Определены свободный  $\beta$  и линейный  $\delta$  коэффициенты температурной зависимости частоты КПН-резонанса для сочетаний аргона и азота с  $^{87}\text{Rb}$ . Полученные данные использовались для изготовления атомных ячеек с заданными параметрами.

Предложен алгоритм оптимизации характеристик КПН-резонанса, позволяющий одновременно максимизировать параметр качества резонанса  $q = C/\Delta\nu$  и подавить температурную зависимость его частоты. Оптимизируемыми параметрами являются суммарное и парциальные давления БГ в ячейке, рабочая температура ячейки и интенсивность лазерного излучения. Основные этапы алгоритма заключаются в получении зависимости:

1. темновой (без полевого уширения) ширины резонанса от суммарного давления БГ ( $P_\Sigma$ );
2. максимального контраста от  $P_\Sigma$  (при фикс. интенсивности  $I$ , варьируя температуру ячейки  $T$ );
3. отношения контраста к темновой ширине от  $P_\Sigma$  – нахождение оптимального суммарного давления БГ;
4. отношения максимального контраста (варьируя  $T$ ) к ширине от  $I$  – нахождение оптимальных интенсивности и температуры,  $I_{opt}$ ,  $T_{opt}$ ;

Последним этапом является подбор оптимального отношения парциальных давлений,  $r_{opt}$  при котором  $T_{opt}$  совпадает с вершиной температурной зависимости.

Найдены оптимальные диапазоны значений указанных параметров для ячеек  $8 \times 15$  мм:  $P_\Sigma = 23 - 50$  Торр,  $I_{opt} = 80 - 240$  мкВт/см<sup>2</sup>,  $T_{opt} = 63 - 69^\circ\text{C}$ ,  $r_{opt} = 1.54 - 1.65$ .

При 29 Торр,  $66^\circ\text{C}$ ,  $I=130$  мкВт/см<sup>2</sup> получены следующие характеристики КПН-резонанса: контраст 4%, ширина 300 Гц, температурная чувствительность –  $\Delta\nu/\nu_T = 5 \cdot 10^{-14}$  при  $\Delta T = 0.01^\circ\text{C}$ .

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем.

1. Создана экспериментальная установка для исследования лазеров с вертикальным резонатором VCSEL, характеристик КПН-резонансов в атомных ячейках, наполненных  $^{87}\text{Rb}$  и буферными газами ( $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ), а также для измерения стабильности частоты макета разрабатываемого КПН-стандарта.

2. Экспериментально показана зависимость величины светового сдвига частоты КПН-резонанса от суммарного давления буферных газов, напущенных в атомную ячейку. При превышении определенного предельного значения уширения оптической линии перехода (или давления газов, поскольку основной вклад в уширение дают столкновения с буферными газами) световой сдвиг не может быть подавлен. Это объясняется уменьшением вклада вторых боковых компонент модуляционного спектра лазера в суммарный световой сдвиг. Описанная зависимость величины светового сдвига от давления буферных газов позволила реализовать петлю обратной связи для стабилизации мощности модулирующего СВЧ-сигнала, которая обеспечит одновременно подавление влияния на частоту КПН-резонанса флуктуаций как интенсивности излучения, так и мощности СВЧ-сигнала, то есть изменения спектрального состава излучения.

3. Обнаружено, что зависимость частоты метрологического КПН-резонанса, образованного на магнитных подуровнях  $m_F = 0$ , от магнитного поля имеет разный характер для излучения с правой и левой циркулярными поляризациями при заданном направлении постоянного магнитного поля. В одном случае зависимость имеет минимум, а в другом – возрастает во всем диапазоне магнитного поля. Наличие минимума объясняется компенсацией сдвига от затягивания частоты метрологического резонанса соседним магнитозависимым резонансом с большей амплитудой сдвигом за счет квадратичного эффекта Зеемана. Использование магнитного поля, соответствующего минимуму частотной зависимости КПН-резонанса, обеспечивает подавление линейного отклика частоты на флуктуации магнитного поля, что в определенных условиях может улучшить долговременную стабильность КПН-стандарта.

4. Исследованы особенности спектральных и модуляционных характеристик используемых лазеров. Сформулированы критерии отбора диодных лазеров с вертикальным резонатором для применения в составе КПН-стандарта. Одним из главных требований к лазеру является одномодовая генерация в режиме глубокой СВЧ-модуляции тока накачки лазера. Экспериментально подтверждена корректность разработанной (А.П. Богатов, А.Е. Дракин) на базе уравнений Максвелла теории, описывающей спектральное распределение излучения в случае «слабого» сигнала СВЧ-модуляции.

Показано, что эффективность СВЧ-модуляции, т.е. отношение мощности первых боковых компонент к мощности несущей, имеет максимум в зависимости от тока накачки лазера.

5. Исследованы характеристики атомных ячеек, произведенных в Лаборатории стандартов частоты ТОО ФИАН по технологии лазерной сварки и герметизации. Для оценки качества их наполнения буферными газами экспериментально получены значения коэффициентов  $\beta$  и  $\delta$  температурной зависимости частоты КПН-резонанса для двух используемых буферных газов Ar и N<sub>2</sub>:

$$\begin{aligned}\beta_{Ar} &= -64.1 \pm 0.7 \text{ Гц/Торр}, \quad \delta_{Ar} = -0.362 \pm 0.003 \text{ Гц/Торр/}^\circ\text{C}, \\ \beta_{N_2} &= 560.2 \pm 2.9 \text{ Гц/Торр}, \quad \delta_{N_2} = 0.608 \pm 0.004 \text{ Гц/Торр/}^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

С использованием полученных коэффициентов были измерены и рассчитаны суммарные давления и отношения парциальных давлений буферных газов для наборов изготовленных ячеек двух размеров: 8×15 мм и 5×8 мм. Экспериментально оцененные суммарные давления оказались меньше заявленных при изготовлении на  $27 \pm 4\%$  для ячеек 8×15 мм и на  $48 \pm 3\%$  для 5×8 мм, что связано с истечением газов из ячейки при ее локальном нагреве во время герметизации лазерным излучением. Полученные результаты позволяют усовершенствовать лабораторную установку и технологические процессы производства атомных ячеек.

6. Предложен алгоритм оптимизации характеристик КПН-резонанса, позволяющий одновременно максимизировать параметр качества резонанса  $q$  и подавить температурную зависимость его частоты. Оптимизируемыми параметрами являются суммарное и парциальные давления буферных газов в ячейке, рабочая температура ячейки и интенсивность лазерного излучения. Найдены оптимальные значения указанных параметров для ячеек 8×15 мм:

- Суммарное давление буферных газов, напущенных в ячейку,  $P_{tot} = 23 - 50$  Торр.
- Интенсивность лазерного излучения,  $I = 80 - 240$  мкВт/см<sup>2</sup>.
- Диапазон рабочих температур,  $T = 63 - 69^\circ\text{C}$ .
- Отношение парциальных давлений буферных газов,  $r = 1.54 - 1.65$ .

Предложенный алгоритм может быть использован для оптимизации параметров КПН-резонанса, регистрируемого как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

7. На разработанном макете КПН-стандарта частоты с ячейками  $8 \times 15$  мм проведены измерения стабильности частоты с учетом результатов, полученных в ходе работы. Лучшее значение стабильности, полученное экспериментально при  $\tau = 1000$  с на лабораторном макете составляет  $5.7 \cdot 10^{-13}$ , что примерно в два раза превосходит характерные значения зарубежных аналогов.

## Список публикаций по теме диссертации

### А. Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

- A1. *М.И. Васьковская, В.В. Васильев, С.А. Зибров, В.Л. Величанский, И.В. Акимова, А.П. Богатов, А.Е. Дракин* Амплитудно-фазовая модуляция и спектр излучения диодного лазера с вертикальным резонатором // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 9. – С. 835.
- A2. *М.И. Васьковская, В.В. Васильев, С.А. Зибров, В.П. Яковлев, В.Л. Величанский* Спектрально-модуляционные характеристики лазеров с вертикальным резонатором // Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44. – №. 1. – С. 20-23.
- A3. *Chuchelov D.S., Vassiliev V.V., Vaskovskaya M.I., Velichansky V.L., Tsygankov E.A., Zibrov S.A., Petropavlovsky S.V., Yakovlev V.P.* Modulation spectroscopy of coherent population trapping resonance and light shifts // Physica Scripta. – 2018. – Т. 93. – №. 11. – С. 114002.
- A4. *Vaskovskaya M.I., Tsygankov E.A., Chuchelov D.S., Zibrov S.A., Vassiliev V.V., Velichansky V.L.* Effect of the buffer gases on the light shift suppression possibility // Optics express. – 2019. – Т. 27. – №. 24. – С. 35856-35864.
- A5. *Tsygankov E.A., Vaskovskaya M.I., Chuchelov D.S., Zibrov S.A., Vassiliev V.V., Velichansky V.L., Yakovlev V.P.* Polarization asymmetry of the dark-resonance frequency dependence on the magnetic field // JOSA B. – 2021. – Т. 38. – №. 5. – С. 1742-1747.

### В. Публикации в материалах научных конференций

- B1. *Васьковская М.И., Зибров С.А., Васильев В.В., Величанский В.Л., Дьячков Н.В., Дракин А.Е., Богатов А.П.* Спектральные и модуляционные характеристики лазеров, излучающих с поверхности // III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" (Москва, 24-27 января 2017 г.). Сборник научных трудов. — НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 278.

- В2. Васьковская М.И., Зибров С.А., Величанский В.Л., Цыганков Е.А., Петропавловский С.В., Яковлев В.П. Долговременная стабильность стандарта частоты на эффекте КПП в атомах  $87\text{Rb}$  // III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" (Москва, 24-27 января 2017 г.). Сборник научных трудов. — НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 279.
- В3. Васьковская М.И., Чучелов Д.С., Егоров А.Б., Зибров С.А., Васильев В.В., Величанский В.Л. Исследование и оптимизация параметров атомных ячеек для КПП-стандартов частоты // V Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" (Москва, 12-15 февраля 2019 г.). Сборник научных трудов. — НИЯУ МИФИ, 2019. — С. 28–29.
- В4. Васьковская М.И., Цыганков Е.А., Чучелов Д.С., Зибров С.А., Васильев В.В., Величанский В.Л. Влияние давления буферных газов на световой сдвиг в атомных ячейках для КПП-стандарта частоты // VI Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" (Москва, 11-14 февраля 2020 г.). Сборник научных трудов. — НИЯУ МИФИ, 2020. — С. 40–41.
- В5. Васьковская М.И., Цыганков Е.А., Зибров С.А., Чучелов Д.С., Васильев В.В., Величанский В.Л., Яковлев В.П. Поляризация асимметрия зависимости частоты КПП-резонанса от величины магнитного поля // VII Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" (Москва, 23-26 марта 2021 г.). Сборник научных трудов. — НИЯУ МИФИ, 2021. — С. 40–41.
- В6. Vaskovskaya M.I., Tsygankov E.A., Chuchelov D.S, Zibrov S.A., Vassiliev V.V., Velichansky V.L. Dependence of the CPT resonance frequency on the buffer gases pressure in atomic mini-cells // The IX International Symposium "Modern Problems of Laser Physics" (Novosibirsk, Russia, 22–28 August, 2021). — ILP, Siberian branch of the RAS, 2021. — P. 159.
- В7. Vaskovskaya M.I., Tsygankov E.A., Chuchelov D.S, Zibrov S.A., Vassiliev V.V., Velichansky V.L. Suppression of the light shift of the CPT resonance frequency in  $87\text{Rb}$  atoms // Book of Abstracts International conference Laser Physics 2022 (Ashtarak, Armenia, 14–16 September, 2022) — Institute for Physical Research of NAS of Armenia, 2022. — P. 31.

## Список литературы:

1. Lutwak R., Vlitas P., M. Varghes et al. The MAC – a miniature atomic clock // *Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. — 2005. — P. 6.

2. *Microsemi Corp.* Chip Scale Atomic Clock SA.45s. <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>.
3. *Deng J. et al.* A commercial CPT rubidium clock // *Proc. European Frequency and Time Forum (EFTF)*. — 2008. — Pp. E3B01–0099.
4. *Knappe S., Shah V., P.D. Schwindt et al.* Microfabricated atomic frequency references // *Appl.Phys. Lett.* — 2004. — Vol. 85. — P. 1460–1462.
5. *T. Guo et al.* Atomic clock based on transient coherent population trapping // *Appl.Phys. Lett.* — 2009. — Vol. 94. — P. 151108.
6. *Zibrov S. A. et al.* Coherent-population-trapping resonances with linearly polarized light for all-optical miniature atomic clocks // *Physical Review A*. — 2010. — Vol. 81. — P. 013833.
7. *Блинов И.Ю. и др.* О наблюдении КПН-эффекта в природной рубидии // *Альманах современной метрологии*. — 2020. — Т. 3. — С. 115–127.
8. *Скворцов М.Н. и др.* Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов  $87\text{ Rb}$  // *Квантовая электроника*. — 2020. — Т. 50, № 6. — С. 576–580.
9. *Б. Д. Агапьев и др.* Когерентное пленение населённости в квантовых системах // *Успехи физических наук*. — 1993. — Т. 163, № 9. — С. 1–36.
10. *Beloy K.* Theory of the ac Stark Effect on the Atomic Hyperfine Structure and Applications to Microwave Atomic Clocks. — Ph.D. dissertation, University of Nevada, Reno, 2009.
11. *Ф. Риле.* Стандарты частоты. Принципы и приложения. — ФИЗМАТ-ЛИТ, Москва, 2009.
12. *Zhu M., Cutler L.S.* Theoretical and experimental study cell frequency standard of light shift in a CPT-based Rb vapor // *32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*. — 2000.
13. *McGuyer B. H., Jau Y. Y., W. Happer.* Simple method of light-shift suppression in optical pumping systems // *Applied Physics Letters*. — 2009. — Vol. 94, no. 25. — P. 251110.