

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*на диссертацию Васьковской Марии Игоревны «Факторы, влияющие на долговременную стабильность стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика*

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

Диссертация Васьковской Марии Игоревны посвящена актуальной и востребованной на сегодняшний день тематике – разработке и реализации квантовых стандартов частоты на основе эффектов когерентного пленения населенностей (КПН) с анализом факторов, влияющих на метрологические характеристики стандарта, в частности, на долговременную нестабильность. Явление когерентного пленения населённостей, открытое в 70-х годах прошлого века, находит важные применения в современной науке и технике: спутниковая навигация (гражданского и военного назначения); связь с передачей большого потока данных (широкополосный Интернет и т.д.); высокосоциальная (секретная) связь с быстрой сменой несущей частоты; интеллектуальные сети электроснабжения (SmartGrid); поиск полезных ископаемых, а также прочие геофизические измерения и исследования; финансовые транзакции; многочисленные приложения в области фундаментальной физики (прецизионные измерения вне лаборатории, проверка теоретических гипотез) и т.д.

В большинстве приложений КПН проявляется в виде узких нелинейных резонансов в поглощении лазерного пучка при прохождении ячейки, наполненной парами атомов. В качестве атомов чаще всего используются щелочные металлы (Rb, Cs, K, и Na). В области квантовой метрологии эти резонансы служат реперами для стабилизации частоты генератора в миниатюрных квантовых стандартах частоты (КСЧ) микроволнового диапазона (атомных часах), а также используются для разработки некоторых типов скалярных и векторных атомных магнитометров. Задачи миниатюризации КПН-стандартов частоты предъявляют высокие требования к метрологическим характеристикам квантового дискриминатора, главными компонентами которого являются лазер с вертикальным резонатором VCSEL и атомная ячейка со смесями буферных газов. Технологические решения, положенные в основу процесса изготовления ячеек, существенно влияют и на метрологические свойства КПН-резонанса и, как следствие, на кратковременную и долговременную нестабильность стандарта частоты на основе КПН-эффекта.

Тема диссертационного исследования Васьковской М. И. связана с поисками путей решения для перечисленных выше актуальных проблем на основе реализации следующих задач: минимизация вкладов световых сдвигов в частоту часового перехода, учет температурной зависимости из-за влияния состава и парциальных давлений буферных газов, стабилизация

частоты СВЧ-генератора, повышение контрастности КПН-резонанса, оценка эффективности СВЧ-модуляции тока накачки и т.д.

### **Общая характеристика диссертации.**

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста. Список литературы включает 112 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность диссертационной работы; там же приведены формулировки цели и задач диссертационного исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, а также новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой Главе диссертации автором описано явление КПН и принципы построения стандартов частоты на его основе. Перечислены характеристики КПН-резонанса, а также факторы, влияющие на дрейф частоты. Рассмотрена конструкция квантового дискриминатора, разработанная автором диссертации, а также лабораторная установка для измерений параметров, влияющих на долговременную нестабильность КПН-стандарта.

Основное содержание второй Главы диссертации связано с описанием различных сдвигов частоты КПН-стандарта: световые сдвиги, а также изменения частоты, обусловленные асимметрией резонанса и изменениями магнитных полей. Наиболее интересными результатами данной Главы являются следующие: реализация метода подавления светового сдвига для спектральных компонент излучения, подбор мощности СВЧ-модуляции, необходимой для подавления светового сдвига. Среди других результатов этой Главы отметим результаты наблюдений синфазного и квадратурного откликов КПН-резонанса и их взаимосвязь с параметрами асимметрии КПН-резонанса. На экспериментальной установке автором был получен результат для временной нестабильности, равный  $5,7 \times 10^{-13}$  для времени усреднения 1000 с.

В третьей Главе диссертации описывается процедура измерений спектральных и модуляционных характеристик лазеров с вертикальным резонатором в режиме СВЧ-модуляции. Автором впервые показано, что в общем случае спектр лазера в режиме СВЧ-модуляции тока накачки не обладает свойствами симметрии и степень такой асимметрии зависит от постоянного уровня тока накачки. В заключительной части этой Главы исследована поляризационная нестабильность излучений лазеров с вертикальным резонатором.

Наконец, в четвертой Главе диссертации изложены технологические основы изготовления газовых ячеек с буферным газом, основанные на оригинальном подходе автора. В этой Главе детально описаны различные конструкции газовых ячеек, изготовленные методом лазерной сварки и герметизации. В качестве буферных газов использовались аргон и азот. Для всех ячеек проведено исследование температурной зависимости частоты

КПН-резонанса с фиксацией областей, внутри которых частота не зависит от температуры. Определены и описаны оптимальные значения парциальных давлений буферных газов, а также контрасты и ширины линий изготовленных образцов ячеек. Результаты этой Главы крайне важны для практических приложений.

В Заключение сформулированы основные научные результаты и выводы.

**Новизна научных положений и результатов.** Новизна научных результатов отражена в тексте диссертации, а также в автореферате, и сводится, в основном, к следующему:

1. Впервые в России создана экспериментальная установка, с помощью которой проведено комплексное исследование лазеров с вертикальным резонатором VCSEL (спектральные и модуляционные характеристики), а также получены метрологические характеристики КПН-стандарта.
2. Предложен и реализован метод стабилизации мощности модулирующего СВЧ-сигнала.
3. Разработан подход, позволяющий оптимизировать совокупность характеристик КПН-резонанса в зависимости от парциальных давлений смеси буферных газов, температуры нагреваемой ячейки и параметров мощности лазерного излучения.

**Теоретическая и практическая значимость** результатов диссертационного исследования заключается в комплексном анализе факторов, влияющих и ограничивающих долговременную стабильность стандартов частоты на основе использования КПН-эффекта; при этом учитывались характеристики и свойства используемых лазеров с вертикальным резонатором, а также атомных ячеек со смесями буферных газов. Теоретически и экспериментально исследовались различные сдвиги частоты в квантовом дискриминаторе, а также методы их подавления, анализировались отклики КПН-резонанса (синфазный и квадратурный) на модуляционные характеристики СВЧ-сигнала. Полученные результаты диссертационного исследования могут быть использованы как в конструкциях сверхминиатюрных стандартов частоты на КПН-эффекте, магнетометров и гироскопов, так и в других отраслях науки и техники, где требуется использование ячеек с парами щелочных металлов.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,** обеспечивается постановкой задач диссертационного исследования, применением поверенного научного оборудования, использованием современных методов статистической обработки результатов исследований, проведением сопоставительного анализа с данными авторов, полученными в рамках других альтернативных подходов.

**Замечания по диссертационной работе:**

1. В первой Главе диссертации контраст опорного КПН-резонанса определяется по уровню фоновой засветки. В ряде случаев такое

определение приводит к завышенным оценкам для контраста КПН-резонанса в сравнении с другими определениями для этой физической величины.

2. Основной целью диссертационной работы, отраженной в ее названии, является исследование и анализ физических факторов, ограничивающих долговременную нестабильность стандарта частоты на КПН-эффекте. Между тем, в тексте диссертации не удалось обнаружить график вариации Аллана на интервалах времени усреднения порядка нескольких часов или суток, представляющий принципиальный и практический интерес.
3. В третьей Главе диссертации, посвященной исследованию спектральных и модуляционных характеристик лазеров VCSEL, отсутствуют результаты измерений и их анализ для шумовых характеристик лазера, которые могут оказать влияние на деградацию нестабильности КПН-стандарта на больших временах интервалов усреднения.

**Перечисленные замечания не снижают** общую высокую оценку диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

**Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию**, были представлены на представительных конференциях и симпозиумах в России, а также на Международных конференциях, своевременно опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ.

**Автореферат соответствует содержанию** и структуре диссертации.

Судя по автореферату и тексту диссертации, следует отметить логичность и прослеживаемость подхода автора к решению поставленных задач. К достоинствам диссертационной работы следует также отнести грамотное и корректное изложение полученных результатов.

Результаты диссертационной работы Васьковской Марии Игоревны **можно классифицировать как решение важной научной задачи** в области многофакторного анализа долговременной стабильности стандартов частоты на основе эффекта КПН и методов экспериментальной реализации результатов исследований.

**Заключение по диссертационной работе.** Диссертация Васьковской Марии Игоревны *«Факторы, влияющие на долговременную стабильность стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей»* является законченной научно-квалификационной работой. Представленная диссертация соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук («Положение о присуждении ученых степеней», утвержденное Постановлением Правительством РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 18.03.2023)) и специальности 1.3.19 – Лазерная физика, а ее автор -

Васьковская Мария Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика,

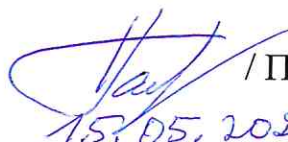
Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., Пальчиков Виталий Геннадьевич,  
главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28

Тел. 8-495-660-57-24

e-mail: [palchikov@vniiftri.ru](mailto:palchikov@vniiftri.ru)

 / Пальчиков В.Г./  
15.05.2023

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича удостоверяю:

Лобова Оксана Алексеевна,

начальник отдела кадров Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 11

Тел. 8-495-546-63-28

e-mail: [lobova@vniiftri.ru](mailto:lobova@vniiftri.ru)

 / Лобова Оксана Алексеевна /



Список публикаций оппонента В.Г. Пальчикова по тематике диссертации М.И. Васьковской за последние пять лет

1. Probe-field-ellipticity-induced Shift in an Atomic clock, Yudin V.I., Taichenachev A.V., Prudnikov O.N., Basalaev M.Yu., Pal'chikov V.G., von Boehn M., Mehlstäubler T.E., Bagayev S.N. //Physical Review Applied– 2023. – Т. 19. – 1. – С. 014022.
2. Анализ неопределенностей стандарта частоты на холодных атомах иттербия с использованием операционных параметров оптической решетки / Семенко А.В., Белотелов Г.С., Сутырин Д.В., Слюсарев С.Н., Юдин В.И., Тайченачев А.В., Овсянников В.Д., Пальчиков В.Г. // Квантовая электроника – 2021. – Т. 51.– 6. – С. 484-489.
3. Lattice light shift in strontium optical clock /Belotelov G.S., Sutyryn D.V., Gribov A.Y., Berdasov O.I., Pal'chikov V.G., Slyusarev S.N., Blinov I.Y., Ovsiannikov V.D. //Laser Physics – 2020. – Т. 30. – 4. – С. 045501
4. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов Rb-87, Квантовая электроника/ Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И., Квашнин Н.Л., Месенцова И.С., Бражников Д.В., Васильев В.А., Тайченачев А.В., Юдин В.И., Багаев С.Н., Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А. // Квантовая электроника – 2020. – Т. 50. – 6. – С. 576-580.
5. Измерение напряженности электрического поля СВЧ излучения на частоте радиационного перехода между ридберговскими состояниями атомов  $^{85}\text{Rb}$  /Стельмашенко Е.Ф., Клезович О.А., Барышев В.Н., Тищенко В.А., Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Овсянников В.Д. //Оптика и спектроскопия – 2020. – Т. 128. – 8. – С. 1063-1069.