

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
спектроскопии Российской академии
наук (ИСАН)

д.ф.-м.н. Задков Виктор Николаевич

« 28 » апреля 2023 г.

Отзыв ведущей организации

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

Диссертационная работа Васьковской М.И. посвящена детальному изучению влияния различных факторов на частоту резонанса когерентного пленения населённостей (КПН) и на долговременную стабильность стандарта частоты на основе эффекта КПН. Актуальность данного исследования определяется, в первую очередь, необходимостью создания компактных и точных стандартов частоты микроволнового диапазона. Такие стандарты частоты востребованы при использовании их в мобильных платформах, включая спутниковые системы, для обеспечения точной синхронизации.

Структура и содержание диссертации

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

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

В *первой главе* описаны эффект КПН, устройство и принцип работы стандарта на основе данного эффекта с использованием диодных лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL). Описываются основные характеристики опорного КПН-резонанса, формулируются требования к ним для достижения

наилучшей частотной стабильности. Детально представлена схема созданной в ходе работы экспериментальной установки.

Вторая глава посвящена сдвигам частоты КПН-резонанса и методам их подавления. Рассмотрены различные типы сдвигов: сдвиги, обусловленные асимметрией резонанса и изменением магнитного поля. Исследованы световые сдвиги для ^{87}Rb , возникающие под действием полихроматического лазерного излучения, полученного в результате СВЧ-модуляции тока накачки лазера VCSEL. Показано, что при использовании одного и того же лазера с неизменными рабочими параметрами величина светового сдвига меняется для атомных ячеек с разным наполнением буферными газами. Продемонстрирован эффект подавления линейного отклика частоты КПН-резонанса на изменения внешнего магнитного поля. Эффект реализуется при определённом значении магнитного поля из-за конкуренции между затягиванием частоты соседними резонансами и квадратичным зеemanовским сдвигом. Обнаружено, что процесс обладает ориентационной асимметрией и подавление возможно только при определённой комбинации поляризации оптического поля и направления рабочего 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. Исследована поляризационная нестабильность лазеров такого типа. Показано, что недостаточное подавление побочной поляризационной моды ограничивает возможность применения лазеров с такими характеристиками в составе КПН-стандарта частоты. Экспериментально показано, что эффективность СВЧ-модуляции VCSEL в зависимости от постоянного тока накачки лазера имеет максимум, связанный с частотой релаксационных колебаний.

В *четвёртой главе* приведено описание методов изготовления и наполнения атомных ячеек, использующихся в составе КПН-стандарта частоты. Исследовались характеристики ячеек, произведённых методом лазерной сварки и герметизации, заполненных ^{87}Rb и буферными газами: аргоном и азотом. Предложен алгоритм оптимизации характеристик КПН-резонанса, позволяющий одновременно максимизировать параметр качества резонанса и подавить температурную зависимость его частоты. Оптимизируемыми параметрами являются суммарное и парциальные давления буферных газов в ячейке, рабочая температура ячейки и интенсивность лазерного излучения.

В *заключении* приведены основные результаты работы.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Все результаты, представленные в диссертации Васьковской М.И., являются достоверными и обоснованными. Выводы диссертации и положения, выносимые на защиту, основаны на результатах экспериментальных

исследований, выполненных на сертифицированном научном оборудовании. Экспериментальные результаты находятся в согласии с теоретическими расчётами.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Результаты работы являются новыми и имеют высокую научную значимость. В частности, были получены следующие результаты:

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

4. Впервые предложен алгоритм оптимизации характеристик КПН-резонанса, включающий в себя выбор парциальных давлений буферных газов, напускаемых в ячейку, её рабочей температуры и интенсивности лазерного излучения.

Полученные результаты могут быть использованы для создания малогабаритного стандарта частоты на основе эффекта КПН с улучшенными характеристиками, также 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 вовлечённых в работу КПН-стандарта эффектов.

Общая оценка работы

Диссертация Васьковской М.И. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Диссертация написана понятным языком и хорошо структурирована. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.19 – «Лазерная физика». Автореферат корректно представляет общее содержание диссертации и полученные результаты. Результаты работы прошли апробацию

на международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Замечания по работе

Несмотря на несомненно положительное впечатление о работе, в ней присутствуют ряд неточностей.

1. Первое защищаемое положение диссертационной работы выглядит общим и не отражает достигнутые в работе результаты. “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.” То, что использование комплексных амплитуд позволяет производить учёт фазы – известно. Так же очевидно, что для полного описания работы лазера необходимо учитывать фазовые соотношения. Более того, это необходимо делать не только для лазеров с вертикальным резонатором, но и вообще для любых типов лазеров.

2. В главе 1, при описании эффекта когерентного пленения населённости (КПН), отсутствует рассмотрение релаксационных членов. Это вызывает вопросы относительно полуширины резонанса КПН, которая используется при описании работы часов. Из изложения не ясно, какими процессами она обусловлена. Этот вопрос изучен давно и для полноты картины должен быть описан в первой, вводной, главе.

3. В формуле 2.3 допущена ошибка. Должно быть: $E = E_0 \cos(\omega_0 t + a \sin[(\Omega t + b \sin \omega_m t)])$ в соответствии со статьёй [D.S. Chuchelov et al 2018 Phys. Scr. 93 114002], в которой автор диссертации является соавтором.

4. Ряд параметров не объяснён или не указан в работе. Так, параметр отстройки Δ_L , который присутствует на рисунке 2.4 и далее в тексте никак не объяснён. Понятно, что это отстройка от точного резонанса, но это становится понятным только после нескольких прочтений. При исследовании влияния буферного газа на сдвиг линии КПН-резонанса в Главе 2 указано его давление, но не указано конкретно какой газ использовался в конкретном эксперименте.

5. Для полноты картины можно было бы привести аналитические выражения для амплитуд синфазного и квадрупольного отклика, которые исследуются в Главе 2.

6. Так же в Главе 2 было определено значение частоты модуляции, которое соответствует невозмущённому световым сдвигом частоте КПН-резонанса. Определение производилось посредством экстраполяции сдвига к нулевым значениям мощности излучения. В работе не достаёт графика, который бы показывал измеренные значения частоты КПН-резонанса в зависимости от мощности излучения с кривой экстраполяции.

7. На рисунках 2.11 и 2.12 представлены зависимости частоты КПН резонанса от глубины модуляции СВЧ-поля. При этом производилась

модуляция интенсивности лазерного излучения. Наблюдаются точки, в которых подавляется зависимость частоты КПН-резонанса от интенсивности лазерного поля. Основной вопрос, который возникает при анализе представленных кривых: почему при малых давлениях буферного газа наблюдается несколько точек компенсации светового сдвига? Из текста диссертационной работы не до конца понятна физическая картина. Более того, чтобы понять теоретическое обоснование данного эффекта, необходимо ознакомиться с работой [20] по списку литературы диссертационной работы. В частности, выражение (2.5) приведено из данной работы. Однако данное выражение не объясняет причину возникновения двух точек. Более того, спорным выглядит трактовка движения точек навстречу друг другу при увеличении давления буферного газа, приведённая в диссертационной работе: “Из-за этого с ростом давления БГ для подавления светового сдвига требуется всё большая мощность старших боковых компонент, т.е. более развитый спектр. Это и обуславливает смещение первой точки НСС в область больших мощностей СВЧ-сигнала и второй – в область меньших мощностей.” Данное рассуждение, основанное на выражении (2.5), объясняет движение первой точки к высоким интенсивностям, но из выражения (2.5) не понятно, почему вторая точка движется в сторону меньших интенсивностей.

8. Часть рисунков в диссертационной работе представлены неудачно. На рисунках 2.11 и 2.12 при одинаковых определениях осей ординат, указаны разные значения сдвига КПН-резонанса. На рисунке 2.11 сдвиг составляет порядка 3,5 кГц, в то время как при схожих параметрах на рисунке 2.12 сдвиг уже составляет значения вблизи нуля. Только из таблицы № 1 статьи [20] можно догадаться в чём разница. Неудачное представление графиков можно продолжить и рисунком 3.10б. В тексте диссертационной работы указано: “Видно, что ортогональная мода смещена в высокочастотную область на величину, близкую к 3.4 ГГц.” Сам рисунок построен в координатах “мА”. Только зная спектр атомов рубидия можно понять в какую сторону и на какую величину происходит смещение.

9. Выражение (3.3) получено теоретически. Однако ни вывода этого выражения, ни ссылки на работы, где его можно найти, не приведено.

Приведённые замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости её вклада для развития лазерной спектроскопии щелочных металлов в приложениях атомных стандартов частоты.

Заключение

Диссертация Васьковской Марии Игоревны «Факторы, влияющие на долговременную стабильность стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей» полностью удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её

автор, Васьковская Мария Игоревна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Доклад Васьковской М.И. по материалам диссертации был заслушан и обсуждён на семинаре № 1136 Отдела лазерной спектроскопии ИСАН 19 апреля 2023 года. Отзыв подготовлен старшим научным сотрудником Лаборатории лазерной спектроскопии, кандидатом физико-математических наук Афанасьевым А.Е. и одобрен на заседании семинара № 1136 Отдела лазерной спектроскопии.

Старший научный сотрудник Отдела лазерной спектроскопии Лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Афанасьев Антон Евгеньевич/

Председатель семинара:

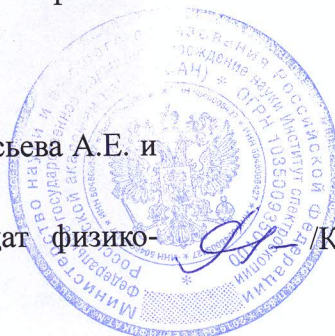
Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Отделом лазерной спектроскопии ИСАН, доктор физико-математических наук

/Рябов Евгений Артурович/

Подписи сотрудников ИСАН Афанасьева А.Е. и Рябова Е.А. заверяю.

Учёный секретарь ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Кильдиярова Римма Рифовна/



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5.

Телефон: +7 (495)851-05-79

E-mail: isan@isan.troitsk.ru

Список работ сотрудников ведущей организации Института спектроскопии РАН по тематике диссертации Васьковской М. И.

1. Afanasiev A.E., Kalmykov A.S., Kirtaev R.V., Kortel, A.A., Skakunenko P.I., Negrov D.V., Balykin V.I. Single-layer atom chip for continuous operation: Design, fabrication and performance. *Optics & Laser Technology*, 148, 107698 (2022).
2. Afanasiev A.E., Balykin V.I. Zero ac Stark frequency shift of an atom trapped in pulsed laser light. *Quantum Electronics*, 51(3), 248 (2021).
3. Afanasiev A.E., Meysterson A.A., Mashko A.M., Melentiev P.N., Balykin V.I. Atom femto trap: experimental realization. *Applied Physics B*, 126, 26 (2020).
4. Afanasiev A.E., Mashko A.M., Meysterson A.A., Balykin V.I. Spectroscopy of atoms in an optical dipole trap using spectrally selective heating by a probe laser field. *Quantum Electronics*, 50, 206 (2020).
5. Afanasiev A.E., Mashko A.M., Meysterson, A.A., Balykin V.I. Spectroscopy of Rubidium Atoms in a Femtosecond Pulsed Optical Dipole Trap. *JETP Letters*, 111, 608 (2020).
6. A.M. Mashko, A.A. Meysterson, A.E. Afanasiev, V.I. Balykin, "Atom femtosecond optical trap based on spectrally filtered laser radiation", *Quantum Electronics*, 50, 530 (2020)
7. Afanasiev A.E., Melentiev P.N., Kuzin A.A., Kalatskiy, A.Yu., Balykin V.I. Quantum transport of a single photon through a subwavelength hole by a single atom. *JETP*, 125, 372 (2017).
8. Kalatskiy A.Yu., Afanasiev A.E., Melentiev P.N., Balykin V.I. Frequency stabilization of a diode laser on the $5P \rightarrow 5D$ transition of the Rb atom, *Laser Physics*, 27, 055703 (2017).