

ОТЗЫВ

официального оппонента Гончарова Андрея Николаевича на диссертацию Жаднова Никиты Олеговича «Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Диссертация Жаднова Н. О. «Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором» посвящена созданию и исследованию высокостабильных источников лазерного излучения с предельными характеристиками по ширине линии генерации и кратковременной стабильности частоты, практической реализации «часовых» лазеров для оптического стандарта частоты на основе ультрахолодных атомов стронция, локализованных в оптической решетке.

Оптические стандарты частоты на основе узких оптических переходов в ультрахолодных атомах и ионах в настоящий момент демонстрируют метрологические характеристики на два порядка превышающие аналогичные характеристики наилучших первичных стандартов частоты на основе фонтанов холодных атомов цезия и рубидия в СВЧ диапазоне. Впечатляющий прогресс в этой области исследований связан с прогрессом последних трех десятилетий в исследованиях по лазерному охлаждению и локализации атомов и ионов и в создании лазерных источников с шириной линии генерации на уровне 10 - 100 мГц и относительной кратковременной нестабильностью частоты на уровне 10^{-16} – $10^{-17}/\tau^{1/2}$ (τ – время измерения/усреднения). Высокостабильные источники лазерного излучения представляют большой интерес как для фундаментальных исследований, так и для различных приложений в метрологии, геодезии, мониторинге окружающей среды и тд. Из вышесказанного следует, что тема диссертационной работы Жаднова Н. О. является актуальной. Практическая значимость диссертационного исследования подтверждается тем, что в результате исследований были созданы источники излучения с шириной линии менее 1.5 Гц и кратковременной относительной нестабильностью частоты $2 \cdot 10^{-15}$ для оптического репера частоты на основе ультрахолодных атомов стронция, разработанного в национальном метрологическом институте России ФГУП «ВНИИФТРИ» и являющегося составной частью государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, списка литературы из 144 наименований. Полный объем диссертации составляет 148 страниц машинописного текста.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описываются цель и задачи диссертационной работы, научная и практическая значимость исследований, формулируются выносимые на защиту положения, научная новизна полученных результатов, представлены списки публикаций автора по теме диссертации и докладов на конференциях, на который были доложены основные результаты исследований.

В первой главе диссертации автор представляет обзор методов стабилизации частот лазеров, анализирует полученные различными методами результаты по кратковременной и долговременной стабильности частоты, достигнутые в мире на настоящий момент. Особое внимание в этой главе уделяется методам стабилизации частоты лазерного излучения с использованием в качестве частотного репера полос пропускания/отражения высокочастотных и изолированных от внешних возмущений оптических интерферометров. В первой главе автор подробно рассматривает и анализирует физические и технические причины, ограничивающие предельную стабильность частоты при использовании различных методов стабилизации по полосе пропускания/отражения высокочастотных интерферометров, уделяя особое внимание методу Паунда-Дривера-Холла, который дает возможность при узкой полосе пропускания интерферометра обеспечивать широкую полосу системы обработки возмущений частоты лазера.

Вторая глава диссертации посвящена описанию и подробному исследованию одной из основных физических причин, ограничивающих получаемую кратковременную стабильность при использовании в качестве частотного репера полос пропускания/отражения «опорных» резонаторов Фабри-Перо - тепловых флуктуаций элементов опорного интерферометра. В этой главе автор представляет и обосновывает первое защищаемое положение диссертации – возможность частичной компенсации флуктуаций частоты лазера, обусловленных тепловыми шумами LG_{00} моды опорного резонатора Фабри-Перо при использовании двух «пробных» мод того же резонатора – лаггерр-гауссовой моды LG_{10} и лаггерр-гауссовой моды с орбитальным моментом LG_{03} . К сожалению, автором не осуществлена экспериментальная реализация предложенного нового метода, а представлены результаты численного моделирования, показавшего теоретическую возможность уменьшения тепловых шумов на 50%. Во второй главе автором предложено также использовать новый кристаллический материал для тела и зеркал интерферометра - арсенид галлия.

Третья глава диссертации посвящена описанию разработки и исследованию часовых лазерных систем на длине волны 698 нм для оптического репера частоты на основе холодных атомах ^{87}Sr , созданного в национальном метрологическом институте ВНИИФТРИ. В этой главе автор представляет и обосновывает второе защищаемое

положение диссертации. Исследуются и подробно описываются две реализации опорного интерферометра – с вертикальной и горизонтальной оптической осью резонатора. Результаты исследований, представленные в третьей главе, составляют наибольшую практическую ценность работы и трудоемкость. Ценность исследований, представленных в этой главе обусловлена тем, что автор очень подробно описывает процесс изготовления интерферометров, их конструкции, вакуумные и электронные системы установки и тд., представлены результаты обширных метрологических исследований созданных высокостабильных лазерных систем.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследований по стабилизации частоты излучения волоконного лазера Koheras ADJUSTIC с длиной волны 1542 нм по пикам пропускания высокостабильного интерферометра с базой из кристаллического кремния, охлажденного до температуры 124 К. Так же как и в третьей главе, детально описывается конструкция интерферометра, криогенная вакуумная камера, системы термостабилизации интерферометра, оптоэлектронная система привязки частоты. Особое внимание уделено исследованиям по уменьшению влияния паразитной амплитудной модуляции лазерного излучения на результат стабилизации частоты лазера по пикам пропускания/отражения высокостабильного опорного интерферометра. Удалось экспериментально уменьшить влияние флуктуаций остаточной амплитудной модуляции на нестабильность частоты лазерной системы до уровня $<2 \cdot 10^{-16}$, соответствующего пределу тепловых шумов криогенных кремниевых монокристаллических резонаторов. Этот результат лег в основу третьего защищаемого положения.

В пятой главе автор представил результаты анализа и численного моделирования своего предложения «температурнонезависимого» резонатора Фабри-Перо из недорогих материалов с относительно большим коэффициентом теплового расширения. В предложенном интерферометре температурное расширение тела эталона из кварца компенсируется температурным расширением обжимающего кольца из алюминия. Численное моделирование показало возможность создания такого опорного интерферометра, который даже будет иметь преимущество перед интерферометром из ULE. В точке нулевого температурного расширения чувствительность кварцевого резонатора с алюминиевым кольцом к флуктуациям температуры по расчетам оказалась в два раза меньше, чем у резонатора из ULE-стекла. Результаты исследований, описанных в пятой главе, легли в основу четвертого защищаемого положения диссертации. К сожалению, экспериментальной реализации своего предложения автор пока не осуществил.

В заключении диссертации приводится перечень основных полученных результатов. В приложения А и В автор вынес полезные, дополнительные материалы, не вошедшие в

главы 1-5 по стабилизации частоты лазера по опорному резонатору (А) и измерению характеристик стабильности и шумов частоты излучения лазеров (В).

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. Научная новизна (стр 9 п.2) – не очень понятно, в чем состоит новизна – в том, что лазерные системы созданы с опорным резонатором 48 см ? или они созданы для оптического репера частоты на холодных атомах стронция, включенном в государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1 Российской Федерации? Хотелось бы более четкой формулировки этого пункта новизны. Аналогичное замечание к пункту 5 новизны – стабилизация температуры электрооптического модулятора и управление паразитной амплитудной модуляцией использовалась ранее (см например Vol. 2, No. 9/September 1985/J. Opt. Soc. Am. B, OPTICS LETTERS / Vol. 39, No. 7 / April 1, 2014 и другие)
2. Основным результатом работы является создание лазерной «часовой системы» с относительной кратковременной нестабильностью частоты порядка 10^{-15} на временах усреднения 30 мс -20 с. (см стр. 9). Было бы полезно привести обоснование, почему именно выбран этот интервал усреднения, тем более что на стр. 10 приводится интервал усреднения 30 мс -10 с., на стр 8. – интервал усреднения 10 мс – 10 с.
3. Стр 114 - «Измеренная спектральная ширина на полувысоте сигнала биений указанных лазерных систем составляет <1.5 Гц и ограничена временем измерения» Было бы целесообразно привести в тексте диссертации объяснение почему она ограничена временем измерения и какое это было время.
4. На стр 13 дается определение – «ультрастабильными лазерами принято называть источники излучения ближнего инфракрасного, оптического или ультрафиолетового диапазона». Возникает вопрос - является ли стабилизированный CO_2 -лазер 10. 6 мкм с шириной линии 1 Гц ультрастабильным лазером? Это замечание относится к ряду встречающимся в тексте диссертации не совсем точных определений и утверждений. См. например стр. 16 –«Описанные методы позволяют как сузить линию генерации лазера, так и подавить шумы лазерного излучения при помощи внешнего элемента, способного контролировать его частоту (например, акустооптического модулятора)». Подавить шумы и означает сузить линию генерации.
5. Есть замечания, связанные со ссылками на источники, например, стр. 16 - «Необходимость в создании лазеров с шириной спектральной линии, составляющей несколько герц и меньше, возникла с развитием оптических стандартов частоты [35]» – ссылка [35] - *Diddams S.A. et al. An optical clock based on a single trapped 88Hg^+ ion // Science, 2001, vol. 293, № 5531, P. 825–828.* Полагаю, что необходимость в лазерах с узкой

линией возникла гораздо раньше 2001 г. Было бы лучше, если бы автор ссылался на исторически первые, пионерские работы в этой области.

6. Стр.20 - ссылка [53] приводится и для стабилизации *Nd:YAG* лазера по переходам в молекулярном йоде и для *He-Ne* лазера со стабилизацией по метану [53], для *He-Ne* лазера это не совсем корректная ссылка, хотя в работе [53] *He-Ne* лазер на 3.39 мкм используется.
7. На рис. 1.2 (стр. 17) автором представлена «Минимальная относительная нестабильность частоты лазерных систем со стабилизацией по опорному резонатору (исторический прогресс)». На представленном рисунке с 1999 г по 2009 г стабильность ухудшалась, что представляется странным.
8. В тексте диссертации содержится некоторое количество «научного жаргона», например, эффективность каплинга – надо полагать, что это эффективность согласования пучка с модой резонатора, сайдбэнды -боковые полосы, сервоуши.

Сделанные замечания не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации. Работа выполнена на очень высоком научно-техническом уровне, диссертация хорошо иллюстрирована, структурирована, написана хорошим языком. Полученные автором результаты по стабильности частот лазеров сопоставимы с результатами ведущих лабораторий мира.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Жаднова Никиты Олеговича в целом, можно сделать следующее заключение:

- тема диссертации актуальна, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение важной задачи в области экспериментальных и теоретических исследований, направленных на создание лазерных источников излучения с предельными характеристиками по ширине линии и кратковременной стабильности частоты;
- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;
- достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается повторяемостью экспериментальных данных и использованием апробированных и протестированных измерительных приборов, достоверность теоретических выводов обеспечивается обоснованностью использованных физических моделей и приближений и

результатами компьютерного моделирования.

Представленная диссертация «Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором» соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.13 г, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Жаднов Никита Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Отзыв составил:

Кандидат физико-математических наук, Гончаров Андрей Николаевич,
Заведующий лабораторией квантовых сенсоров Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт лазерной физики Сибирского
отделения Российской академии наук» (ФГБУН ИЛФ СО РАН),



/Гончаров Андрей Николаевич/

14.03.2022

Российская федерация, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б,
ФГБУН ИЛФ СО РАН
тел.: 8-913-947 29 19
e-mail: gonchar@laser.nsc.ru

Подпись Гончарова Андрея Николаевича заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской Академии Наук» (ФГБУН
«ИЛФ СО РАН») к.ф.м.н.



/ Покасов Павел Викторович /

Российская федерация, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б,
ФГБУН ИЛФ СО РАН
тел.: 8-(383) 30-89-21

Список основных публикаций оппонента кандидата физико-математических наук
А. Н. Гончарова по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за
последние 5 лет:

1. D. V. Brazhnikov, V. I. Vishnyakov, S. M. Ignatovich, I. S. Mesenzova and A. N. Goncharov, High-contrast level-crossing resonances in a small cesium vapor cell for applications in atomic magnetometry, *Appl. Phys. Lett.* **119**, 024001 (2021)
2. Гончаров А.Н., Барауля В.И., Бонерт А.Э., Тропников М.А., Источник излучения на длине волны 457 нм на основе полупроводникового лазера для прецизионной спектроскопии атомов магния, *Квантовая Электроника*, **Т.50**, N 3, 272 (2020)
3. Taichenachev A.V., Goncharov A.N., Bonert A.E., Baraulya V.I., Tropnikov M.A., Kuznetsov S.A., Prudnikov O.N., Bagayev, S.N., Atom interferometry with ultracold Mg atoms: Frequency standard and quantum sensors, *Journal of Physics: Conference Series*, **V.1508**.- A.n. 012002. (2020)
4. A. N. Goncharov, O A Klimacheva, A O Melnikova, Study of saturated-absorption resonances on the 3P0, 1, 2 – 3D1, 2, 3 transitions of magnesium atoms in a hollow-cathode discharge cell, *Quantum Electronics* **50(6)**, 561 (2020)
5. Santagata R., Tran D.B.A., Argence B., Lopez O., Tokunaga S.K., Wiotte F., Mouhamad H., Goncharov A, Abgrall M., Le Coq Y., Alvarez-Martinez H., Le Targat R., Lee W.K., Xu D., Pottie P.E., Darouie B., Amy-Klein A, High-precision methanol spectroscopy with a widely tunable SI-traceable frequency-comb-based mid -infrared QCL, *OPTICA* **V.6**, N 4, 411 (2019).
6. Гончаров А.Н., Бонерт А.Э., Барауля В.И., Тропников М.А., Кузнецов С.А., Тайченачев А.В., Багаев С.Н., Стабилизация частоты лазерного излучения по узким резонансам холодных атомов магния на переходе 1S0–3P1, *Квантовая электроника* **48** (5), 410 (2018),