

## ОТЗЫВ

официального оппонента Зиброва Сергея Александровича на диссертацию **Белотелова Глеба Сергеевича «Разработка систем лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия в оптических стандартах частоты»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение (технические науки)

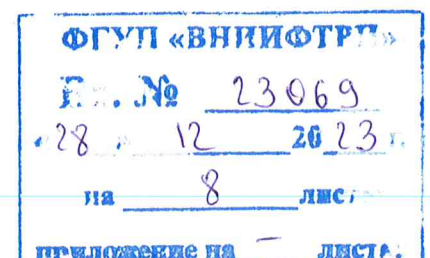
Диссертационная работа Белотелова Г.С. посвящена разработке и исследованию систем первичного и вторичного лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия для стационарных и перевозимых стандартов частоты оптического диапазона.

Оптические стандарты частоты на основе холодных атомов обладают наивысшей на сегодняшний день точностью и наилучшей стабильностью частоты. Такие стандарты частоты находят применения в высокостабильных и высокоскоростных источниках временной синхронизации локальных и удаленных источников, релятивистской геодезии, навигации по гравитационным полям, измерениях фундаментальных физических констант и других приложениях. Точность оптических стандартов частоты уже заметно превзошла точность микроволновых цезиевых стандартов, поэтому в соответствии с дорожной картой Международного бюро мер и весов в 2030 году планируется переопределение единицы времени – секунды – в Международной системе единиц СИ, в котором оптические стандарты частоты будут играть ключевую роль.

Лазерные системы для оптических стандартов частоты (в первую очередь, системы первичного и вторичного лазерного охлаждения атомов) обеспечивают получение необходимого количества атомов в оптической ловушке, и именно от этой величины зависят метрологические характеристики оптического стандарта частоты – нестабильность и неисключенная систематическая погрешность измеряемой частоты. Именно перечисленный круг вопросов, связанный с разработкой систем лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия в оптических стандартах частоты, положен в основу диссертационной работы Белотелова Г.С., что, безусловно, делает её **актуальной и практически значимой**.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 146 страниц текста, включая 79 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 185 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, приводятся положения, выносимые на защиту.



**Первая глава** диссертации посвящена обзору современного состояния в области оптических стандартов частоты. Достаточно подробно описаны оптические стандарты частоты, разрабатываемые в зарубежных лабораториях, представлены вклады в неопределенность и частотные сдвиги подобных установок. Особое внимание уделяется вопросам, связанным с разработкой перевозимых оптических стандартов частоты.

Во **второй главе** диссертации описывается оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция. Приводятся детальные описания вакуумной камеры оптического спектроскопа и системы распределения излучения первичного охлаждения. Подробно описан предложенный метод оценки количества атомов в потоке от теплового источника и в магнитооптической ловушке с помощью ПЗС-камеры. Представлены результаты оценки количества атомов в первичной МОЛ при изменении параметров эксперимента.

**Третья глава** диссертации посвящена описанию разработанной автором системы распределения лазерного излучения для вторичного охлаждения атомов стронция. Детально описаны этапы вторичного охлаждения и метод определения температуры ансамбля холодных атомов.

В **четвертой главе** диссертации приводится описание оптического стандарта частоты на холодных атомах иттербия. В деталях описаны разработанная вакуумная камера оптического спектроскопа и распределительная система лазерного излучения. Представлены результаты спектроскопии переходов первичного и вторичного лазерного охлаждения, а также результаты по определению количества захваченных атомов в зависимости от отстройки частоты лазерного излучения и от градиента магнитного поля. В заключительной части главы приводится сравнение разработанного стационарного оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция и разрабатываемого перевозимого стандарта на атомах иттербия.

В **заключении** диссертационной работы сформулированы основные научные результаты и выводы, среди которых можно выделить следующие:

1. впервые получена зависимость количества атомов стронция в первичной магнитооптической ловушке оптического стандарта частоты из состава Государственного первичного эталона ГЭТ 1-2022 при изменении частотной отстройки лазерного излучения от перехода первичного охлаждения и при изменении градиента магнитного поля;
2. предложена и реализована компактная по размерам конструкция системы распределения лазерного излучения оптического стандарта частоты, объединяющая в себе первичное и вторичное лазерное охлаждение;

3. получена зависимость количества атомов иттербия в первичной магнитооптической ловушке малогабаритного оптического стандарта частоты при изменении частотной отстройке лазерного излучения от перехода первичного охлаждения и при изменении градиента магнитного поля.

Результаты, полученные в диссертации Белотелова Г. С. являются новыми и представляют практическую значимость. **Достоверность** и корректность результатов обеспечивается проведением сравнительного анализа с результатами других коллективов, использованием поверенной аппаратуры, применением проверенных методов статистического анализа. **Новизна** научных результатов в полной мере отражена в тексте диссертации и в автореферате. **Практическая значимость** результатов диссертационного исследования заключается в использовании разработанных систем первичного и вторичного лазерного охлаждения атомов стронция в оптическом стандарте частоты, входящем в состав государственного первичного эталона ГЭТ 1-2022. Результаты разработок и исследований вакуумной камеры оптического спектроскопа и системы распределения лазерного излучения применяются при изготовлении перевозимого оптического стандарта частоты на холодных атомах иттербия.

**Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию**, были представлены на конференциях в России и за рубежом, своевременно опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ. **Автореферат в полной мере соответствует содержанию** и структуре диссертации.

Тем не менее к работе имеются некоторые **замечания**:

1. В формулах (2.26 и далее), используемых в диссертации для оценки количества атомов в ловушках, параметр  $f$  определялся отношением телесного угла, захватываемого системой изображения к полному телесному углу  $4\pi$ . Между тем, в таблицах бюджетов неопределенностей (таблицы 2.2 и 4.2) для оценки количества атомов стронция и иттербия в МОЛ эта же величина уже имеет размерность [мм]. Кроме того, в перечисленных выше таблицах не указаны значения для количества атомов в магнито-оптической ловушке, указаны лишь суммарные значения неопределенностей для этих величин.

2. На рисунке 1.8 приводится схема, адаптированная из работы по ссылке [14], на которой, как мне кажется, некорректно указано направление распространения лазерного излучения, формирующего оптическую решётку. Также в подписи к этому рисунку дана ссылка на источник, в котором этой схемы нет ([13], а не [14]).

3. На странице 85 диссертации и на странице 15 автореферата в формуле для доплеровского предела охлаждения ошибочно присутствует множитель 2.

4. Среди мелких замечаний отмечу некоторый разбой в оформлении списка литературы, а также наличие опечаток (например «отсроченное в красную область») и стилистических неточностей («решётчатый лазер», «поджимание потока атомов»).

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

На основе всего вышесказанного считаю, что диссертация Белотелова Глеба Сергеевича «Разработка систем лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия в оптических стандартах частоты» является законченной научно-исследовательской работой. Представленная диссертация соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук («Положение о порядке присуждения учёных степеней», утвержденное Постановлением Правительством РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021)), а ее автор – Белотелов Глеб Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение (технические науки).

Официальный оппонент:

к.ф.-м.н., Зибров Сергей Александрович,  
старший научный сотрудник Лаборатории стандартов частоты  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук,  
Российская Федерация, 108840, г. Троицк, ул. Физическая 11,  
Лабораторный корпус, к. 22,

Тел. +7-915-088-65-64  
e-mail: zibrovs@lebedev.ru

/Зибров С.А./

Подпись Зиброва Сергея Александровича удостоверяю:

**ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ**  
Ученый секретарь **Зибров А.В.**  
23.12.2023 г.