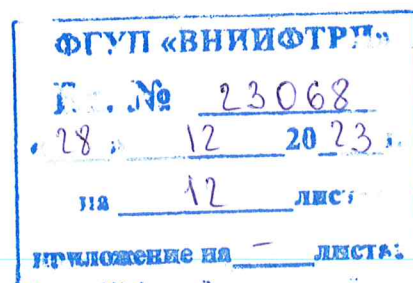


## ОТЗЫВ

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

Диссертация Белотелова Г. С. посвящена решению актуальной научной проблемы – разработке систем лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия, используемых для реализации оптических стандартов частоты на нейтральных атомах. Важно отметить, что создание систем лазерного охлаждения является основой разработки оптических стандартов частоты, так как с помощью подобных систем подготавливается ансамбль холодных атомов к загрузке в оптическую решетку и дальнейшему опросу с помощью «часовой» лазерной системы. Кроме того, диссертация посвящена исследованию режимов охлаждения, позволяющих добиться максимизации числа холодных атомов, загруженных в первичную и вторичную магнитооптические ловушки, а также в оптическую решетку, что является важной и актуальной задачей, поскольку определяет предельно достижимую нестабильность оптического стандарта частоты. Предварительные оценки нестабильности оптических стандартов частоты на атомах стронция и иттербия, выполненные во ВНИИФТРИ, показали, что данные оптические стандарты потенциально могут воспроизводить единицы времени и частоты на уровне нескольких единиц восемнадцатого знака для стационарных стандартов и нескольких единиц семнадцатого знака для перебазируемых стандартов, что соответствует передовому мировому уровню. Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования не вызывает сомнений, поскольку результаты, представленные в работе, могут быть использованы, например, в следующих важных областях:



- в разработках высокоточных оптических стандартов частоты нового поколения, основанных на применении современных технологий лазерного охлаждения, включая перебазируемые варианты;
- в фундаментальных исследованиях, включающих оценки постоянства фундаментальных констант во времени;
- в создании стационарных и перебазируемых оптических стандартов частоты для участия в переопределении единицы времени – секунды – в системе СИ на основе оптических квантовых переходов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 146 страниц, включая 79 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 185 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, ее научная и практическая значимость. Там же описываются основные направления исследований, проведенных автором диссертации, направленных на улучшение метрологических характеристик разрабатываемых систем.

Первая глава содержит описание разработанных в зарубежных лабораториях оптических стандартов частоты на атомах и ионах. В ней представлены вклады в бюджет неопределенностей и частотные сдвиги для подобных установок. Наиболее подробно описаны разработанные мировым сообществом перебазируемые оптические стандарты частоты. В той же главе представлен основной подход к разработке распределительной системы лазерного излучения для перебазируемой установки, используемой в диссертационной работе.

Вторая глава диссертации посвящена описанию оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция. Представлен основной принцип работы оптического стандарта частоты и основные сдвиги в определении частоты часового перехода. Детально описаны свойства атома стронция, используемого в данной диссертационной работе. Представлен оригинальный подход автора к разработке вакуумной камеры оптического спектрометра оптического стандарта частоты, в которой производятся охлаждение и захват атомов. Также приведено детальное описание лазерной системы первичного охлаждения и перекачивающих лазерных систем. В той же главе описаны методы определения количества атомов в потоке из



источника атомов и количества атомов, захваченных в магнитооптическую ловушку. Приведены результаты оценки количества атомов в потоке. Новизна подхода автора заключается в анализе зависимости количества атомов в первичной магнитооптической ловушке при изменении частотной отстройке от частоты перехода первичного охлаждения и изменения величины градиента магнитного поля. В заключительной части главы приведены расчеты неопределенности используемого метода для атомов стронция.

В третьей главе диссертации было представлено описание разработанной автором системы вторичного охлаждения атомов стронция. Описана распределительная схема и реализуемые частотные отстройки. Представлен метод стабилизации частоты лазерной системы вторичного охлаждения, используемый при проведении экспериментов. Также представлены результаты оптимизации вторичного охлаждения и оценки количества атомов, загруженных во вторичную магнитооптическую ловушку. В той же главе проведены оценки температуры облака захваченных атомов и, в заключении, представлена оценка количества атомов, загруженных в оптическую решетку при таких условиях.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию оптического стандарта частоты на холодных атомах иттербия. Детально описаны свойства атома иттербия, используемого в данной диссертационной работе. Подробно изложена конструкция вакуумной камеры оптического спектроскопа, разработанного в рамках диссертационного исследования. Представлена система распределения лазерного излучения, объединяющая в себе первичное и вторичное лазерное охлаждение. Описаны частотные отстройки и способ доставки излучения в рабочую зону. Проанализированы результаты проведенной спектроскопии переходов первичного и вторичного лазерного охлаждения, приведены результаты оценки количества атомов в потоке. Описаны зависимости количества атомов в первичной магнитооптической ловушке при изменении частотной отстройки от частоты перехода первичного охлаждения и изменения величины градиента магнитного поля. Также приведены расчеты неопределенности используемого метода для атомов иттербия.

Главным результатом четвертой главы является анализ возможности разработки перебазируемого оптического стандарта частоты на холодных атомах

иттербия. Представлен сравнительный анализ характеристик разработанного стационарного оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция и разрабатываемого перебазированного оптического стандарта частоты на холодных атомах иттербия. В дополнение представлен сравнительный анализ этапов охлаждения атомов стронция и иттербия и оценка захвата атомов в оптическую решетку. На основании этого приведен расчет предельно достижимой нестабильности для этих установок.

В **заключении** суммируются основные выводы и итоги работы, а также приведён перечень основных результатов.

#### **Замечания по содержанию диссертационной работы:**

1. По всему тексту диссертации автор использует термин «перебазированные» стандарты частоты. В литературе обычно используются термины «транспортируемые», «мобильные», «возимые». В чем причина введения нового термина?

2. В первой главе при описании результатов зарубежных лабораторий в тексте автор использует термин «НСП», а в приведенных таблицах используется термин «неопределенность».

3. Во второй и третьей главах представлены методы «оценки» количества атомов и температуры. С учетом детального описания метода, почему не использовать термин «определение»?

4. В первой главе диссертации следовало бы уделить больше внимания описанию теоретических основ лазерного охлаждения атомов.

Сделанные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации.

Достоверность результатов диссертационной работы Белотелова Г. С. подкреплена согласованностью с данными других авторов, полученных в рамках независимых альтернативных подходов, а также с результатами теоретических расчетов. Полученные в работе результаты, основные положения и выводы являются обоснованными. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы.



К достоинствам диссертации следует отнести четкость и ясность изложения представленных в ней результатов, а также наличие значительного числа ссылок на работы других авторов. Основные результаты автора докладывались на представительных конференциях и семинарах, своевременно опубликованы в отечественной и зарубежной печати.

### **Заключение**

Оценивая диссертационную работу Белотелова Глеба Сергеевича 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 разработки систем лазерного охлаждения для создания оптических стандартов частоты;

- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;

- результаты диссертационных исследований имеют перспективу использования при разработке оптических стандартов частоты нового поколения при использовании нейтральных атомов стронция и иттербия в качестве рабочей среды;

- диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.13 г, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Белотелов Глеб Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение (технические науки).

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н. Прудников Олег Николаевич,

главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук,

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева 15Б

тел. +7 905 935 2095

e-mail: [oleg.nsu@gmail.com](mailto:oleg.nsu@gmail.com)

/Прудников Олег Николаевич/

Подпись главного научного сотрудника ИЛФ СО РАН, доктора физико-математических наук Прудникова Олега Николаевича удостоверяю

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН



/Покасов Павел Викторович/

18 декабря 2023