

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11

<http://www.mephi.ru>

26.12.2023 № 078/018

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор

Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»
доктор физ.-мат. наук, профессор

Шевченко Владимир Игоревич

«26» декабря 2023 г.



Отзыв ведущей организации

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) на диссертационную работу 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)

Актуальность работы

В настоящее время точность современных оптических стандартов частоты на холодных атомах превосходит на 6-7 порядков точность стандартов для любых других видов измерений. Важно при этом отметить, что наряду с разработками высокоточных оптических стандартов были созданы средства сличений оптических стандартов на основе оптоволоконных линий связи, обеспечивающих передачу оптических частот на расстояния до нескольких тысяч километров практически без потери точности и нестабильности. Единственной альтернативой высокоточной передачи эталонных оптических частот на основе методов оптоволоконной связи является перебазируемый оптический стандарт частоты, основанный на холодных атомах или ионах. Данное обстоятельство стимулировало

ФГУП «ВНИИОТР»
Л. № 23.086
28.12.2023
14 ЛИС
14 ЛИС

принятия «Дорожной карты» Международным бюро мер и весов по переопределению единицы времени – секунды в Международной системе единиц СИ, которое состоится в 2030 г.

Беспрецедентная точность оптических стандартов частоты предъявляет весьма жесткие требования к составу его основных компонент, в первую очередь, к лазерным системам по первичному и вторичному охлаждению атомов в магнитно-оптической ловушке (МОЛ), поскольку от контроля количества атомов в МОЛ зависит уровень метрологических характеристик оптического стандарта. Для перебазируемых стандартов частоты дополнительным условием является поиск компромисса для конструкций распределительных систем лазерного охлаждения атомов при минимальном энергопотреблении и массе этих систем.

Изучению именно этих вопросов посвящена диссертационная работа Г.С. Белотелова, чем и обусловлена ее актуальность.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы

Научная новизна представленной работы заключается в контроле и выявлении максимума атомов в первичной магнитооптической ловушке для проведения экспериментов с атомами стронция и иттербия. В качестве единого отправного пункта диссертационного работы является исследование зависимости количества атомов в первичной магнитооптической ловушке при изменении величины частотной отстройки от частоты перехода первичного охлаждения и величины градиента магнитного поля.

Проведенные исследования показали, что используемый метод оценки количества атомов в ловушке работает на всех этапах лазерного охлаждения, что позволяет использовать его и с другими рабочими средами.

Практическая значимость результатов работы в первую очередь связана с возможностью их применения при разработке перебазируемых оптических стандартов частоты на основе атомов иттербия. Данная

возможность обусловлена тем, что основные элементы экспериментальной установки (вакуумная камера, лазерная система и система распределения излучения), на которой проводилось экспериментальное исследование, могут быть использованы в составе перебазируемого оптического стандарта частоты. Практическая значимость работы обусловлена также выполнением задач, связанных с дорожной картой МБМВ по реализации нового определения единицы времени в системе СИ. Поэтому разработанные методы и подходы, могут иметь практическое применение при разработке оптических стандартов частоты на нейтральных атомах. Оптический стандарт частоты на атомах стронция, основанный на применении систем лазерного охлаждения атомов, разработанных Белотеловым Г.С. успешно внедрен в состав Государственного первичного эталона времени и частоты РФ (ГЭТ1-2022).

Достоверность выводов и научных положений

Достоверность полученных автором результатов подтверждается согласованностью с результатами аналогичных или альтернативных исследований в ведущих лабораториях России и в зарубежных исследовательских центрах. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях и опубликованы в отечественных и зарубежных журналах. Все измерения проводились на сертифицированном оборудовании.

Структура диссертации

Диссертация содержит 146 страниц, включает 79 рисунков, 15 таблиц, и состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы, включающего 185 наименований.

Введение содержит обоснование актуальности темы работы, ее научной новизны и практической значимости, сформулированы цель и задачи работы. Приведены положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 приводится краткое описание основных вариантов оптических стандартов частоты, разрабатываемых в зарубежных лабораториях и исследовательских центрах. Проанализированы стандарты частоты на нейтральных атомах, а также на однократных ионах. Особое внимание уделено описанию метрологических характеристик перебазируемых оптических стандартов частоты. В этой главе проведен обзор литературы непосредственно по теме диссертации, представлено состояние мировых разработок, предложен подход к разработке распределительной лазерной системы.

Глава 2 посвящена оптическому стандарту частоты на холодных атомах стронция. В главе приводится описание разработанной вакуумной камеры оптического спектроскопа, которая использовалась для проведения экспериментов по охлаждению и захвату атомов стронция. Представлены методы определения количества атомов в потоке и в магнитооптической ловушке по снимкам с камеры. Приведены результаты определения количества атомов в потоке и в первичной магнитооптической ловушке. Найден оптимум параметров первичного лазерного охлаждения.

Глава 3 посвящена вторичному лазерному охлаждению атомов стронция. Была показана реализованная схема вторичного охлаждения и описаны частотные отстройки. Были продемонстрированы результаты оптимизации вторичного охлаждения и оценки количества атомов, загруженных во вторичную магнитооптическую ловушку на всех этапах охлаждения. Также представлен метод определения температуры облака захваченных атомов.

Глава 4 посвящена разработке оптического стандарта частоты на холодных атомах иттербия. Представлены описание разработанной вакуумной камеры оптического спектроскопа. Представлена система

распределения лазерного охлаждения, объединяющая в себе первичное и вторичное лазерное охлаждение. Описаны результаты спектроскопии переходов первичного и вторичного охлаждения. Приведены зависимости количества атомов в первичной магнитооптической ловушке при изменении условий проведения эксперимента.

В заключении приведены основные результаты проведенного исследования.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. В чем заключается новизна в схемах лазерного охлаждения? Какие предельные характеристики в оптических стандартах частоты на ультрахолодных атомах стронция и иттербия планируется достичь при полученных экспериментально значениях температуры лазерного охлаждения?

2. Если сравнивать атомы стронция и иттербия, то из текста диссертации следует, что при большем потоке из источника атомов иттербия в магнитооптическую ловушку захватывается меньшее количество атомов. Чем это вызвано?

3. Почему в диссертации используется термин «перебазируемые» стандарты, а не «возимые» или «транспортируемые»?

4. В главе 2, раздел 2.16 и в главе 4, раздел 2.14 представлены оценки неопределенности представленных методов, но не показаны весовые коэффициенты.

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

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 научной задачи в области исследования систем лазерного охлаждения атомов;

- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора; по теме диссертации опубликовано 14 работ в журналах ВАК;

- результаты диссертационных исследований имеют перспективу использования при разработке оптических стандартов частоты нового поколения как в стационарном, так и в перебазированном вариантах исполнения.

Заключение по диссертационной работе

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

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Доклад по материалам диссертации был сделан Белотеловым Глебом Сергеевичем 21 декабря 2023 года на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Отзыв составлен заведующим

кафедрой физико-технических проблем метрологии Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ Борисюком Петром Викторовичем.

Отзыв на диссертацию Г.С. Белотелова обсужден и одобрен на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ протокол №078/017 от «21» декабря 2023 г.

Отзыв составил:

Заведующий кафедрой
физико-технических проблем метрологии
Института лазерных и плазменных
технологий НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.07 –
физика конденсированного состояния,
PVBorisjuk@mephi.ru

Борисюк
Петр Викторович

Директор
Института лазерных и плазменных технологий
НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.21 –
лазерная физика, профессор,
ARKuznetsov@mephi.ru

Кузнецов
Андрей Петрович

Председатель совета по аттестации
и подготовке научно-педагогических кадров
НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н. по специальности 01.01.03
– математическая физика, профессор,
NAKudryashov@mephi.ru

Кудряшов
Николай Алексеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);
115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31
+7 (495) 788 56 99, доб. 9388