

На правах рукописи



Белотелов Глеб Сергеевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ
СТРОНЦИЯ И ИТТЕРБИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СТАНДАРТАХ
ЧАСТОТЫ

Специальность: 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Менделеево - 2023 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

Научный руководитель	Пальчиков Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ»
Официальные оппоненты	Прудников Олег Николаевич - доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник теоретической группы ФГБУН «Институт лазерной физики СО РАН», г. Новосибирск Зибров Сергей Александрович - кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник Лаборатории стандартов частоты Троицкого обособленного подразделения ФГБУН Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московская область, г. Троицк
Ведущая организация	Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт (НИЯУ МИФИ), г. Москва

Защита диссертации состоится «__» _____ 20__ г. на заседании диссертационного совета 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская обл., тел. 8(495) 526-63-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» www.vniiftri.ru:

<https://www.vniiftri.ru/upload/iblock/12b/p2srhd03wg2vtck5f4or4vg4juvcb6xg.pdf>.

Отзывы на автореферат в 2-х экз., заверенные печатью, просим направлять по адресу: 141570 п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская обл. ФГУП «ВНИИФТРИ» Ученому секретарю.

Автореферат разослан «__» ноября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Балаханов

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке и исследованию систем лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия в стационарных и перебазлируемых оптических стандартах частоты (ОСЧ). Такие разработки и исследования необходимы для модернизации стационарных ОСЧ и будут положены в основу создания перебазлируемых ОСЧ.

Актуальность темы диссертации

Точностные характеристики современных ОСЧ на холодных атомах и ионах достигли уровня единиц 10^{-18} в относительном выражении для неисключенной систематической погрешности (НСП) воспроизведения частоты. Работы по созданию и совершенствованию ОСЧ проводятся во многих метрологических центрах и ведущих лабораториях мира (PTB, JILA, NIST, Токийский университет и др.) и России (ИЛФ, ФИАН, ВНИИФТРИ).

ОСЧ обеспечивают высокую точность и единство измерений частот в оптическом диапазоне, так как созданы не только ОСЧ, но и системы сравнения частот по волоконным линиям с погрешностью, меньшей 10^{-18} , высокостабильных источников оптического излучения, территориально удаленных на расстояние до двух тысяч километров. Кроме того, высокая точность ОСЧ может быть перенесена с погрешностью, меньшей 10^{-18} , в радиодиапазон с помощью переносчиков частоты на основе фемтосекундных лазеров. Это позволяет уже сейчас использовать результаты сравнений частот микроволновых и оптических стандартов частоты, имеющих в составе национальных эталонов, при формировании международной атомной шкалы времени ТАИ. Экспериментально продемонстрированная высокая точность ОСЧ дала импульс к принятию решения о необходимости перехода к новому определению единицы времени – секунды в системе СИ. Отметим, что ОСЧ находят применение не только в метрологии, но также в других областях науки и техники: в навигации, релятивистской геодезии, и в фундаментальной физике, например, в экспериментах по проверке стабильности фундаментальных констант.

С момента разработки в 2000 году ОСЧ на холодных ионах [1] и в 2001 году на холодных нейтральных атомах [2] были достигнуты большие успехи. Например, работы по созданию ОСЧ на ионе алюминия, симпатически охлаждаемого ионом бериллия или магния, продемонстрировали уровень НСП $9,4 \cdot 10^{-19}$ у таких ОСЧ, что является

одним из лучших показателей для ионных оптических стандартов [3]. Другим примером может быть разработка и исследование экспериментального ОСЧ на ионах кальция, рабочая камера которого помещалась в криогенную среду для снижения влияния излучения черного тела, вызванного стенками камеры [4]. В такой экспериментальной установке уровень НСП составил $3,0 \cdot 10^{-18}$ в относительном выражении [4]. Также хорошим примером является высокоточный ОСЧ на ионе иттербия [5]. В нем смогли достигнуть уровня НСП $3,2 \cdot 10^{-18}$ в относительном выражении, что сопоставимо с описанным выше стандартом частоты на ионе кальция, но, ввиду отсутствия криогенного охладителя, данная установка является более компактной [5].

Прогресс в разработке ОСЧ не ограничивается только развитием ионных стандартов. Он был достигнут на установках с охлажденными нейтральными атомами, помещенными в оптическую решетку. Самым распространенным вариантом ОСЧ с удерживаемыми в оптической решетке атомами является установка с атомами стронция. Оптическая решётка в таких ОСЧ получается при интерференции лазерного излучения, распространяющегося во встречных направлениях, что создает пространственно-периодический потенциал. На подобных установках был достигнут уровень НСП $2,0 \cdot 10^{-18}$ [6], что сопоставимо с лучшими ОСЧ на ионах. Вторым по распространенности вариантом является ОСЧ на нейтральных атомах иттербия, в котором достигнут уровень НСП $1,4 \cdot 10^{-18}$ [7].

Все описанные выше установки являются стационарными, что накладывает определенное ограничение на их использование. В соответствии с дорожной картой МБМВ планируется к 2030 году обеспечить готовность к переопределению единицы времени – секунды – в системе СИ на основе оптических квантовых переходов [8]. Но для практической реализации нового определения секунды необходимо иметь не только стационарные ОСЧ, но и перебазируемые варианты ОСЧ, конструкция систем которых обеспечивает возможность перемещения их транспортными средствами без разборки. Создание таких перебазируемых ОСЧ является одним из ключевых условий дорожной карты МБМВ [9].

В связи с этим ведущие лаборатории мира помимо модернизации стационарных установок направили свои усилия на разработку компактных перебазируемых ОСЧ, имеющих ограничения по объему (до

4-6 мЗ), энергопотреблению (не выше 5-7 кВт) и массе (не более 1 000-1500 кг). Важным примером разработки подобных установок, обеспечивающих возможность территориального перемещения, является перебазированный ОСЧ на ионе кальция [10]. Уровень его НСП составил $1,3 \cdot 10^{-17}$ [10].

Примером установок на нейтральных атомах является работа группы ученых из РТВ (Германия), которые разработали перебазированный ОСЧ на атомах стронция [11]. НСП такой установки составила $7,4 \cdot 10^{-17}$, что несколько хуже стационарного варианта, за счет снижения размеров установки [11]. Еще одним интересным примером является эксперимент, проведенный в Японии, на Токийской телекоммуникационной башне высотой 450 м с двумя ОСЧ. Один перебазированный ОСЧ располагался у подножия башни, второй – на смотровой площадке. С помощью таких ОСЧ были проведены измерения гравитационного красного смещения, при сравнении частот ОСЧ, размещенных на разных высотах телекоммуникационной башни [12].

Суммируя все вышеизложенное, можно сделать вывод, что разработка как стационарных, так и перебазированных ОСЧ, является актуальной задачей для реализации повышения точности измерений частот в оптическом диапазоне, обеспечения единства измерений времени и частоты и создания тем самым условий для принятия нового определения секунды на основе эталонного квантового перехода в оптическом диапазоне.

При разработке и создании ОСЧ прежде всего необходимо обеспечить подготовку атомов, оптический квантовый переход в которых будет использоваться в качестве рабочего, так называемого, «часового» перехода. Такая подготовка проходит в несколько этапов. Прежде всего атомы, летящие из источника, надо предварительно охладить. Для этого в ОСЧ используются зеемановское замедление и секция, коллимирующая поток атомов. Далее используется лазерное излучение с частотой, соответствующей частоте перехода первичного охлаждения. Затем с помощью вторичного лазерного охлаждения атомы дополнительно охлаждаются до температур в пределах от одного до десяти мК. И только после этого такие холодные, то есть медленные атомы, помещаются в оптическую решетку и производится опрос их «часового» перехода.

При создании перебазированных ОСЧ требуется разработка конфигурации компактных систем первичного и вторичного лазерного

охлаждения, чтобы охладить атомы и получить их в таком количестве, которое будет обеспечивать заданные метрологические характеристики ОСЧ. Следовательно, решение задачи разработки систем лазерного охлаждения является основой для создания ОСЧ и востребовано и актуально. В случае с перебазируемым ОСЧ, необходимо изменить конфигурацию структуры ОСЧ таким образом, чтобы уменьшить его габаритные размеры при сохранении эффективности охлаждения атомов.

Цель работы

Разработка и исследование систем первичного и вторичного лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия в стационарном и перебазируемом ОСЧ.

Объект исследований

ОСЧ на холодных атомах стронция, входящий в состав первичного эталона времени и частоты ГЭТ 1-2022, и компактные системы перебазируемого ОСЧ на атомах иттербия: вакуумная камера оптического спектроскопа и система распределения лазерного излучения охлаждения атомов.

Предмет исследований

Методы оценки уровня потока атомов стронция и иттербия из источника горячих атомов и количества холодных атомов стронция и иттербия, удерживаемых в первичной и вторичной магнитооптических ловушках ОСЧ.

Основная научная задача

Анализ и оценка количества атомов, удерживаемых в первичной и вторичной магнитооптических ловушках, необходимого для функционирования ОСЧ с требуемыми метрологическими характеристиками.

Частные научные задачи

- разработать вакуумную камеру оптического спектроскопа, для проведения экспериментов по охлаждению и захвату атомов стронция и оценить уровень потока атомов, создаваемого в ней источником горячих атомов стронция;
- разработать и исследовать системы первичного охлаждения атомов стронция;
- разработать и исследовать системы вторичного охлаждения атомов стронция;
- разработать компактную вакуумную камеру оптического спектроскопа, для проведения экспериментов по охлаждению и захвату

атомов иттербия и оценить уровень потока атомов, создаваемого в ней источником горячих атомов иттербия;

- разработать и исследовать систему распределения лазерного излучения, осуществляющую его разделение по мощностям, частотным отстройкам и необходимым направлениям для охлаждения атомов иттербия.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная система первичного лазерного охлаждения обеспечивает захват не менее $4 \cdot 10^7$ атомов стронция в первичную магнитооптическую ловушку из потока $1,2 \cdot 10^{12}$ атомов в секунду за счет оптимизации магнитного поля и частотной отстройки лазерного излучения от квантового перехода первичного охлаждения.

2. Разработанная система вторичного лазерного охлаждения обеспечивает захват не менее $5 \cdot 10^6$ атомов стронция во вторичную магнитооптическую ловушку из облака $4 \cdot 10^7$ атомов в первичной магнитооптической ловушке с помощью перемешивающего излучения.

3. Разработанная компактная система распределения лазерного излучения обеспечивает захват в первичную магнитооптическую ловушку не менее $1,6 \cdot 10^7$ атомов иттербия из потока $1,3 \cdot 10^{14}$ атомов в секунду за счет оптимизации магнитного поля и частотной отстройки лазерного излучения от квантового перехода первичного охлаждения.

Научная новизна

Все полученные в работе результаты являются оригинальными и имеют важное практическое и научное значение.

1. Впервые получена зависимость количества атомов стронция в первичной магнитооптической ловушке ОСЧ из состава ГЭТ 1-2022 при изменении частотной отстройки лазерного излучения от перехода первичного охлаждения и при изменении градиента магнитного поля.

2. Впервые предложена и реализована конструкция вакуумной камеры оптического спектроскопа, предназначенная для создания перебазируемого ОСЧ на холодных атомах иттербия.

3. Впервые предложена и реализована конструкция системы распределения лазерного излучения ОСЧ, объединяющая в себе первичное и вторичное лазерное охлаждение, что обеспечивает ее размещение на малогабаритной оптической плите 60×60 см.

4. Впервые получена зависимость количества атомов иттербия в первичной магнитооптической ловушке малогабаритного ОСЧ при

изменении частотной отстройки лазерного излучения от перехода первичного охлаждения и при изменении градиента магнитного поля.

5. Впервые проведены экспериментальные исследования и оценка возможности создания в РФ перебазируемого ОСЧ на основе атомов иттербия.

Практическая значимость и внедрение

Разработанные системы первичного и вторичного охлаждения атомов стронция применены в ОСЧ, входящем в состав ГЭТ 1-2022, что подтверждено актом внедрения.

Результаты разработок и исследований вакуумной камеры оптического спектроскопа и системы распределения лазерного излучения используются при изготовлении перебазируемого ОСЧ на холодных атомах иттербия.

Выполненные в диссертации исследования лежат в русле задач, решение которых задано дорожной картой МБМВ по практической реализации нового определения секунды в системе СИ. В соответствии с дорожной картой для переопределения секунды помимо стационарных ОСЧ на холодных атомах или ионах необходимы и перебазируемые ОСЧ.

Личный вклад автора

Все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично либо при решающем его участии. Автор принимал активное участие в разработке атомного спектроскопа, его сборке, отладке и связанных с этим экспериментальных исследованиях, в частности, в исследовании конфигурации магнитного поля магнитооптической ловушки. Автор принимал непосредственное участие при исследовании источника горячих атомов иттербия и стронция. Автор участвовал в разработке системы распределения лазерного излучения для охлаждения атомов. Все расчеты по этой оптической системе и её сборка проведена автором лично.

Степень достоверности результатов работы

Результаты исследований подтверждаются экспериментальными методиками, выполненными на основе калиброванного и сертифицированного измерительного оборудования, а также современных прецизионных приборов. Полученные данные согласуются с результатами, полученными в зарубежных лабораториях (с использованием альтернативных подходов).

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Международной конференции по атомной физике (2018г. Барселона, Испания), Европейском форуме о времени и частоте, совмещенном с Международным симпозиумом контроля частоты (2020 г. Боулдер, США), на Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2018, 2021 г. Менделеево, Россия), на научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г. ., 2021 г., Менделеево, Россия), на международной конференции Российских космических систем (2018 г. Москва, Россия). Материалы диссертации были представлены на международном конкурсе «Лучший молодой метролог КОOMET», проводимом среди молодых ученых метрологических институтов разных стран в 2021г. и на конкурсе «Соискание премии имени академика С.А. Христиановича» в 2022г. Результаты разработки ОСЧ на холодных атомах стронция подавались на конкурс на соискание золотых медалей РАН для молодых ученых и специалистов в 2021 г. По теме диссертационного исследования опубликованы 42 научных работы, в том числе 14 – в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 8 – в журналах, входящих в базу данных RSCI и 10 – в журналах, входящих в базу данных Web of Science/Scopus.

Структура и состав диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по результатам диссертационной работы, списка цитируемой литературы, состоящего из 185 наименований и двух приложений. В приложении к диссертации представлены: список работ, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК и Акт внедрения результатов разработки при выполнении ОКР. Общий объем диссертации составляет 146 страниц, включая список цитируемой литературы и два приложения. Диссертация содержит 79 рисунков и 15 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, представлены практическая значимость и личный вклад автора. Обозначена важность разработки систем первичного и вторичного лазерного охлаждения атомов в создании ОСЧ.

В **главе 1** представлен литературный обзор по теме диссертационного исследования.

В разделе 1.1 рассматривается предельно достижимая стабильность стандартов частоты. Сделан акцент на важность определения количества атомов, захваченных в оптическую решетку и, соответственно, удерживаемых в первичной и вторичной магнитооптических ловушках (МОЛ). В разделе 1.2 представлена краткая историческая справка возникновения ОСЧ на атомах и ионах, представлены предпосылки к дальнейшим улучшениям и разработкам. В разделах 1.3 и 1.4 приведен краткий обзор применения ОСЧ, в частности, применение, основанное на использовании перебазируемого варианта ОСЧ.

В разделе 1.5 рассмотрены ОСЧ на ионах, их текущий уровень и достигнутые результаты. Описываются основные элементы установок и способы улучшения характеристик. Представлены частотные сдвиги и вклады в бюджет неопределенности ОСЧ на ионах. Раздел 1.6 посвящен ОСЧ на нейтральных атомах. Описаны вакуумные камеры таких установок, способы улучшения характеристик и новые подходы к лазерному охлаждению. Представлены исследования, посвященные поиску причин, нарушающих непрерывность работы ОСЧ. Описаны частотные сдвиги и вклады в бюджет неопределенности ОСЧ на нейтральных атомах. В разделе 1.7 рассмотрены первые экспериментальные образцы перебазируемых ОСЧ как на ионах, так и на нейтральных атомах. Представлены разработки зарубежных лабораторий и первые измерения, проведенные с их помощью. Проведен анализ экспериментальных реализаций перебазируемых ОСЧ и определены направления разработок и исследований диссертационной работы необходимые для создания оптимальной конструкции ОСЧ.

В **главе 2** детально описывается ОСЧ на нейтральных атомах стронция, представлены механизмы сдвигов частоты. Показаны разработанная вакуумная камера оптического спектроскопа и метод первичного лазерного охлаждения атомов стронция в стационарном ОСЧ и результаты первичного охлаждения атомов.

В разделах 2.1 – 2.4 кратко описываются основные принципы работы ОСЧ на нейтральных атомах, приводится метод сравнения двух ОСЧ между собой и основы охлаждения и захвата атомов, представлен обзор свойств атома стронция, в том числе его изотопный состав, кратко описываются параметры его переходов.

Первый этап охлаждения атомов стронция осуществляется на переходе $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ на длине волны 461 нм с естественной шириной линии

$\Gamma = 30$ МГц. При этом достигаются температуры от 1 до 3 мК (доплеровский предел $T_D = 770$ мкК), что соответствует тепловым скоростям около 1 м/с (см. рисунок 1). МОЛ в данном случае служит для сбора и предварительного охлаждения большого числа атомов Sr, подготавливая их для дальнейшего охлаждения.

Для дальнейшего снижения температуры используется более узкий переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ с длиной волны 689 нм, с естественной шириной линии 7,4 кГц (что соответствует доплеровскому пределу 200 нК). В результате, атомы охлаждаются до температур порядка нескольких микрокельвин, что позволяет загрузить их в оптическую решётку, формируемую узлами стоячей волны лазерного излучения с длиной волны 813 нм. Глубина оптической решетки обычно составляет 100 – 300 E_T для атомов Sr и 300 – 900 E_T для атомов Yb. Для случая атомов Sr и Yb энергия отдачи $E_T \approx 0,1$ мкК.

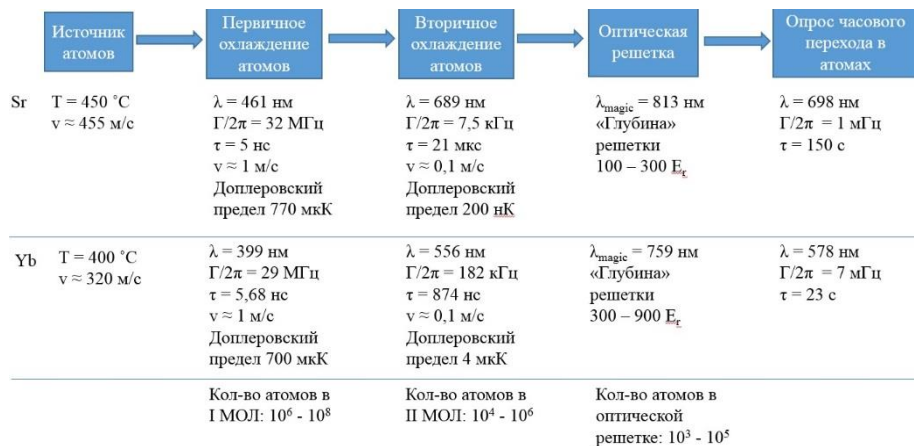


Рисунок 1. Этапы функционирования ОСЧ на холодных атомах стронция и иттербия.

В разделах 2.5-2.11 описаны основные частотные сдвиги от невозмущенной частоты используемого в ОСЧ «часового» квантового перехода. В разделе 2.12 рассмотрена конструкция разработанной вакуумной камеры оптического спектроскопа, представлены трехмерные модели, чертежи и фотографии отдельных составных частей (см. рисунок 2).

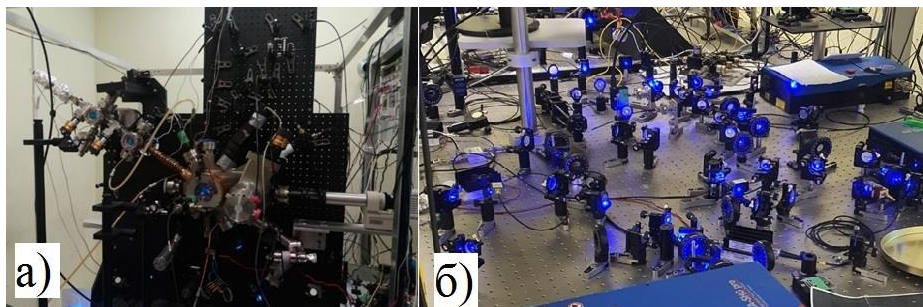


Рисунок 2. Фотографии собранного ОСЧ на холодных атомах стронция. Слева – вакуумная камера оптического спектрометра (а), справа – лазерные системы первичного охлаждения с системой распределения лазерного излучения и лазерная система формирования оптической решетки (б).

В разделе 2.13 изложены используемые методы лазерного охлаждения, отображена разработанная схема первичного лазерного охлаждения и лазеров перекачки с описанием представленной схемы. Описаны методы увеличения числа атомов, захваченных в первичную магнитооптическую ловушку. Описан способ, позволяющий охладить атомы до температур ~ 1 мК.

Структурная схема системы первичного охлаждения со всеми необходимыми лазерными системами представлена на рисунке 3.

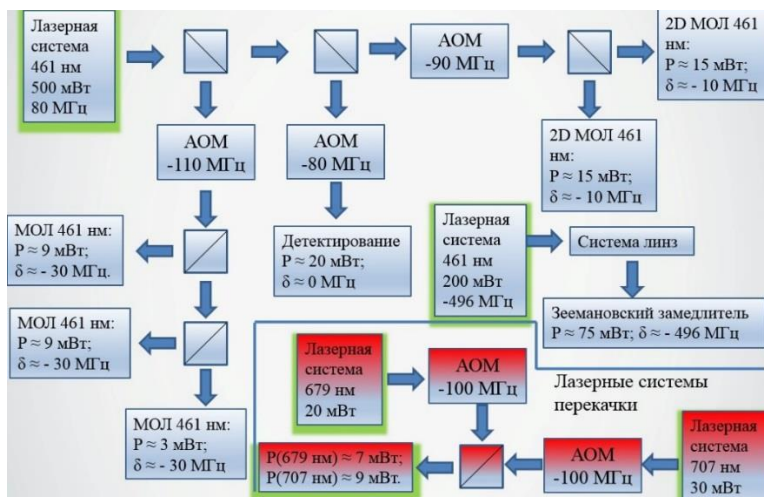


Рисунок 3. Структурная схема системы распределения лазерного излучения первичного охлаждения и лазерных систем перекачки.

Охлаждающий и захватывающий свет с длиной волны 461 нм получается в результате удвоения частоты лазерного диода с длиной волны 922 нм. Создаваемая система распределения лазерного излучения была реализована следующим образом. Выходная мощность излучения каждой лазерной системы составляла около 300 мВт. Свет лазера делился с помощью поляризационных кубов на три части. Большая часть излучения пропусклась через АОМ (частота отстройки ~ минус 110 МГц, мощность излучения в первом порядке ~ 90 мВт), и в дальнейшем направлялась на формирование МОЛ. Вторая часть настраивалась с помощью АОМ (частота отстройки ~ минус 80 МГц, мощность излучения в первом порядке ~ 1 мВт) на резонанс перехода $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ для детектирования атомов. Третья часть пропусклась через АОМ (частота отстройки ~ минус 90 МГц, мощность излучения в первом порядке ~ 10 мВт), и в дальнейшем направлялась на формирование двумерной ловушки. Излучение второй лазерной системы, с помощью системы линз для расширения пучка, направлялось на Зеемановский замедлитель.

В разделе 2.14 предложен метод подсчета атомов в магнитооптической ловушке и в потоке с помощью ПЗС-камеры. Представлен вывод формул оценки. В результате приведена формула, используемая для оценки количества атомов в ловушках по фотографиям с ПЗС-камеры:

$$N_{\text{ат}} = \frac{2\tau\lambda(1 + S_0 + (4\pi\tau\Delta)^2)k_{\text{град}}\Delta t_{\text{град}} \sum_{px} I_{px}}{hc f T_0 S_0 \Delta t \cdot 2^{u/128}}, \quad (1)$$

где f – отношение телесного угла, захватываемого системой изображения (в нашем случае он определяется линзой, находящейся перед ПЗС - камерой), к полному телесному углу 4π , T_0 – коэффициент пропускания оптики между облаком и камерой, S_0 – отношение интенсивности лазерного излучения к интенсивности насыщения, Δ – отстройка частоты от перехода, τ – время жизни верхнего состояния, Δt – время наблюдения (экспозиция измеряющего устройства), h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина световой волны, I_{px} – яркость пикселя (от 0 до 255), $k_{\text{град}}$ – коэффициент градуировки камеры, $\Delta t_{\text{град}}$ – экспозиция камеры при проведении градуировки, u – усиление камеры при съёмке облака атомов для определения их количества. Так же представлен вывод формулы, используемой для оценки количества атомов в потоке из источника:

$$N = F(\pi r_d^2), \quad (2)$$

где $F = \frac{P_{max}}{V_{int}} f N_{at} v_{beam}$, P_{max} – мощность опрашиваемого излучения, V_{int} – объем взаимодействия с атомами, f - отношение телесного угла, захватываемого системой изображения, v_{beam} – скорость потока атомов из источника, N_{at} – количество атомов определенное по формуле (1), r_d - радиус проходимого отверстия. В разделе 2.15 представлены результаты оценки количества атомов в потоке из источника горячих атомов, оценена эффективность каждого предложенного метода увеличения количества атомов в МОЛ. В результате была произведена оценка количества атомов в потоке, с помощью формулы (2). Величина потока составила $(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{12}$ атомов в секунду. Приведен поиск оптимальной частотной отстройки от перехода первичного охлаждения и градиента магнитного поля для определения максимального количества атомов в первичной МОЛ. Результат поиска оптимальных величин представлен на рисунке 4.

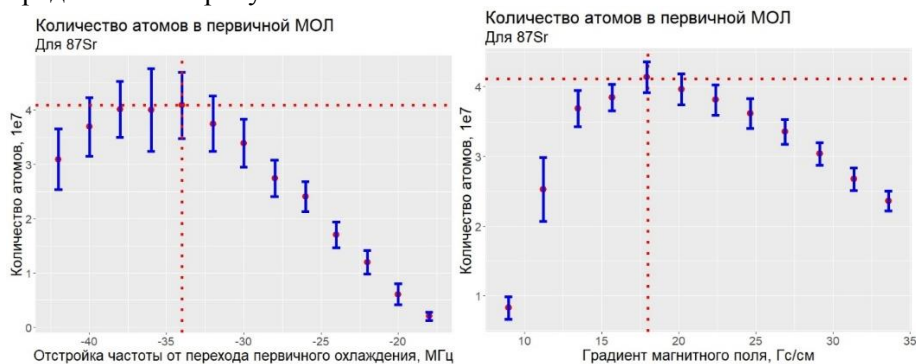


Рисунок 4. Подсчет количества атомов, при изменении частотной отстройки от перехода первичного охлаждения (слева), от изменения градиента магнитного поля (справа).

Оптимум достигнут при частотной отстройке -36 МГц и градиенте магнитного поля 18 Гс/см (0,18 Тл/м). Количество атомов в первичной МОЛ составило $(4,1 \pm 0,6) \cdot 10^7$ (оценка получена с помощью формулы (1)).

В разделе 2.16 оценен вклад неопределенности каждого члена формулы оценки количества атомов в МОЛ и в потоке для атомов стронция. Получено значение неопределенности (см. таблицу 1).

Таблица 1. Бюджет неопределенностей для оценки количества атомов стронция в МОЛ

Измеряемая величина	λ , нм	S_0 , Вт	δ , МГц	$K_{\text{Град}}$, Вт	$T_{\text{град}}$, сек	f , мм	D_L , мм	T_0 , Вт	S_0 , Вт	t , сек
Неопределенность										
Значение измеряемой величины U	$4,61 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^2$	30	$2,00 \cdot 10^4$	$2,50 \cdot 10^{05}$	$1,95 \cdot 10^2$	35	$1,55 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^2$	$1,00 \cdot 10^{-2}$
Неопределенность средства измерения u	$5,77 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	1,15	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{08}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
Относительная неопределенность u/U	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Суммарная неопределенность $N_{\text{ат}}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$									

В главе 3 описывается вторичное охлаждение атомов стронция. Описан метод вторичного лазерного охлаждения атомов стронция в стационарном ОСЧ, представлены результаты охлаждения атомов.

В разделе 3.1 представлены принципы вторичного охлаждения атомов стронция и методы увеличения количества атомов, захваченных во вторичную МОЛ. Изложены способы достижения температур ~ 1 мК, что является необходимым условием для помещения атомов в оптическую решетку. Описывается как охлаждающее, так и перемешивающее лазерное излучение.

На втором этапе охлаждения атомов стронция используется узкий циклический переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$. Его естественная ширина линии соответствует доплеровскому пределу $T_D = h\gamma/2k_B = 200$ нК. Для восстановления требуемого распределения населённости помимо охлаждающего лазера используется лазер перекачки на переходе $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ ($F=9/2 \rightarrow F'=9/2$) (F – полный угловой момент).

Охлаждающий лазер отстраивается на 1,6 МГц в красную область от перехода $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ ($F=9/2 \rightarrow F'=11/2$). Перемешивающий лазер также отстраивается на 1,6 МГц в красную область от перехода $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ ($F=9/2 \rightarrow F'=9/2$). Структурная схема системы вторичного охлаждения показана на рисунке 5.

Лазерная система с длиной волны 689 нм установлена на оптическом столе. В лазерной системе предусмотрено два выхода лазерного излучения. Первое излучение, с меньшей мощностью, пропускается через АОМ с частотной отстройкой -800 МГц и, через оптическое волокно, доставляется к высокодобротному резонатору. Второе излучение делится на поляризационном кубике, усиливается с помощью оптического усилителя. Оба излучения пропускаются через серию АОМ с целью получения частотной отстройки между ними в 1,4 ГГц. Далее излучения объединяются на поляризационном кубике,

пропускаются через АОМ с частотной отстройкой -80 МГц (двойной проход) и заводятся в одно оптическое волокно.

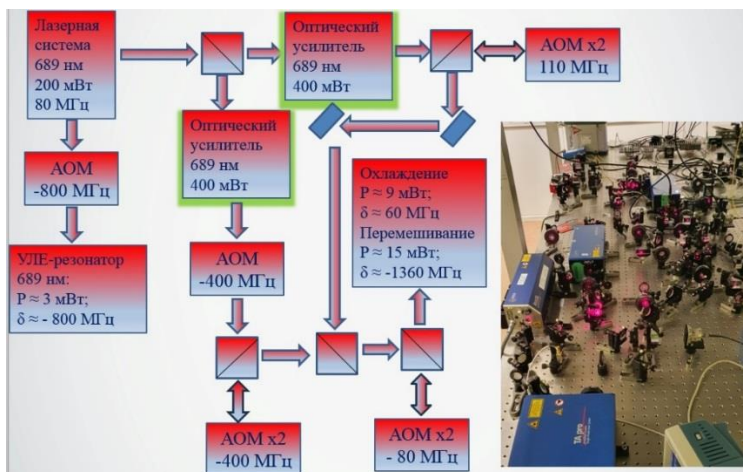


Рисунок 5. Слева - структурная схема системы вторичного охлаждения атомов Sr, справа – фотография системы вторичного охлаждения.

В разделе 3.2 представлен используемый в работе метод стабилизации частоты лазерного излучения. Описываются используемые для этого схемы и способы достижения необходимой стабильности. В разделе 3.3 изложены основные результаты вторичного охлаждения атомов стронция, продемонстрированы изменения кол-ва атомов во вторичной МОЛ, в зависимости от изменения частотных отстроек перемешивающего и охлаждающего излучений от перехода вторичного охлаждения, результат представлен на рисунке 6.

После проведения оптимизации по всем четырем частотам, получено, что во вторичной МОЛ удалось захватить $(5,1 \pm 0,1) \cdot 10^6$ атомов из $(4,1 \pm 0,6) \cdot 10^7$ атомов в первичной МОЛ (оценка получена с помощью формулы (1)).

В разделе 3.4 описывается метод оценки температуры атомов во вторичной магнитооптической ловушке. Представлены фотографии облака в зависимости от времени детектирования (см. рисунок 7), дополнительно проведены оценки количества атомов, захваченных в решетку из вторичной МОЛ.

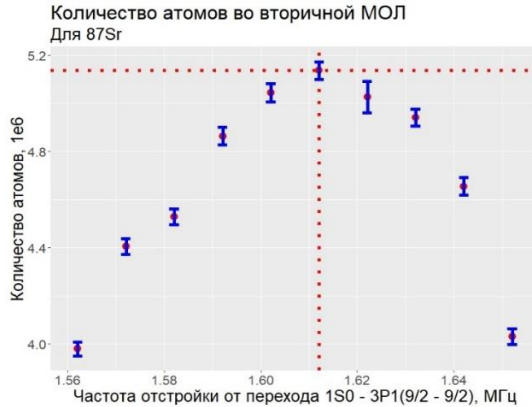


Рисунок 6. Количество атомов во вторичной МОЛ на этапе настройки узкополосного охлаждения при изменении перемешивающего излучения от частоты перехода.

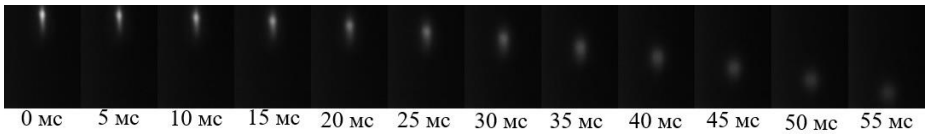


Рисунок 7. Исследование температуры атомов стронция во вторичной магнитооптической ловушке по разлету атомов.

В главе 4 описываются свойства атома иттербия как кандидата на создание перебазируемого ОСЧ на его основе. Изложено описание вакуумной камеры оптического спектроскопа и системы распределения лазерного излучения. Представлены результаты охлаждения атомов иттербия.

В разделе 4.1 детально описан атом иттербия, его изотопный состав, переходы, используемые для охлаждения и захвата атомов и спектроскопии.

Для лазерного охлаждения иттербия подходят два перехода: переход $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ в первичной МОЛ с длиной волны 399 нм и переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ во вторичной МОЛ с длиной волны 556 нм. Переход $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ шириной $2\pi \times 29$ МГц используется для зеемановского замедлителя и в качестве первой ступени охлаждения (доплеровский предел порядка 700 мкК). Большая ширина линии перехода обеспечивает быстрое охлаждение, но имеет слишком высокую температуру для эффективного захвата атомов в оптическую решетку. Второй этап охлаждения на

переходе $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ снижает температуру атомов из-за очень узкой ширины перехода $2\pi \times 182$ кГц (доплеровский предел 4 мкК) до нескольких десятков мкК. Обычно достигаемая температура 20-30 мкК, что позволяет загрузить атомы в оптическую решетку.

Наиболее важным квантовым переходом для работы стандарта частоты на атомах иттербия является дважды запрещенный переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ (называемый «часовым переходом» 578 нм). При расчетной естественной ширине линии 10 мГц для ^{171}Yb этот переход идеален для реализации стандарта частоты на нейтральных атомах иттербия, удерживаемыми в оптической решетке.

В разделе 4.2 подробно изложена конструкция всех составных частей вакуумной камеры оптического спектроскопа. В разделе 4.3 описана пара катушек, создающих необходимый градиент магнитного поля, представлен расчет таких катушек. В разделе 4.4 представлена собранная вакуумная камера оптического спектроскопа (см. рисунок 8).

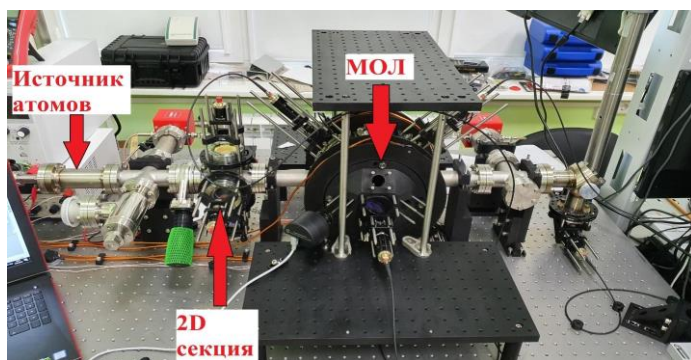


Рисунок 8. Собранный оптический спектроскоп.

В разделе 4.5 описана разработанная система распределения лазерного излучения, особенности ее конструкции и схема построения с используемыми элементами. Лазерное излучение из системы делилось с помощью системы оптических делителей на три основных направления. Первое направление использовалось для формирования излучения первичного МОЛ. Второе направление использовалось для зеемановского замедлителя и третье излучение использовалось для детектирования. Частотные отстройки для каждого направления осуществлялось с помощью АОМ на соответствующих частотах (см. рисунок 9).

На схеме отображены все необходимые входные и выходные волоконные коллиматоры (см. рисунок 10), а именно: входные для излучений 399 нм и 556 нм, выходные для первичного и вторичного лазерного охлаждения, зеemanовского замедлителя и детектирования.

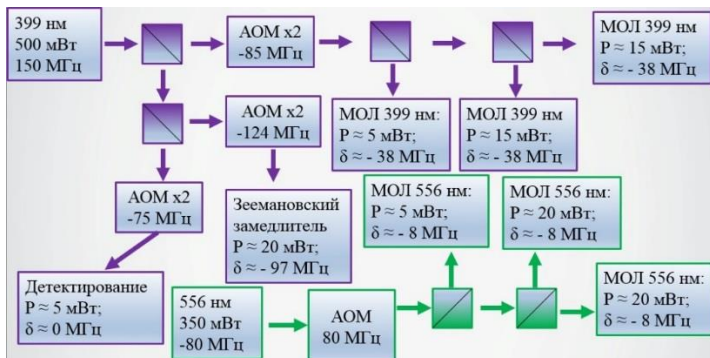


Рисунок 9. Структурная схема системы распределения лазерного излучения первичного и вторичного лазерного охлаждения.

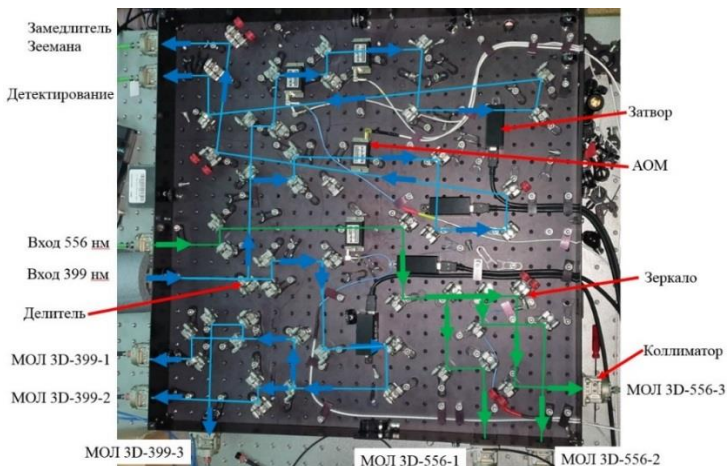


Рисунок 10. Собранная распределительная система лазерного излучения.

В разделах 4.6 и 4.7 представлены результаты спектроскопии переходов первичного и вторичного охлаждения атомов иттербия с целью поиска квантовых переходов, соответствующих разным изотопам. Полученные данные согласуются с аналогичными исследованиями, проведенными в зарубежных лабораториях. В разделе 4.8 представлены

результаты оценки количества атомов в потоке из источника горячих атомов. В результате оценки количества атомов в потоке, с помощью формулы (2), была получена величина $(1,4 \pm 0,9) \cdot 10^{14}$ атомов в секунду. Также был произведен поиск оптимальной частотной отстройки от перехода первичного охлаждения и градиента магнитного поля для определения максимального количества атомов в первичной МОЛ (см. рисунок 11).

В результате в первичную магнитооптическую ловушку может быть захвачено $(1.6 \pm 0,1) \cdot 10^7$ атомов иттербия при частотной отстройке – 38 МГц и градиенте магнитного поля 25 Гс/см (0,25 Тл/м) (оценка получена с помощью формулы (1)).

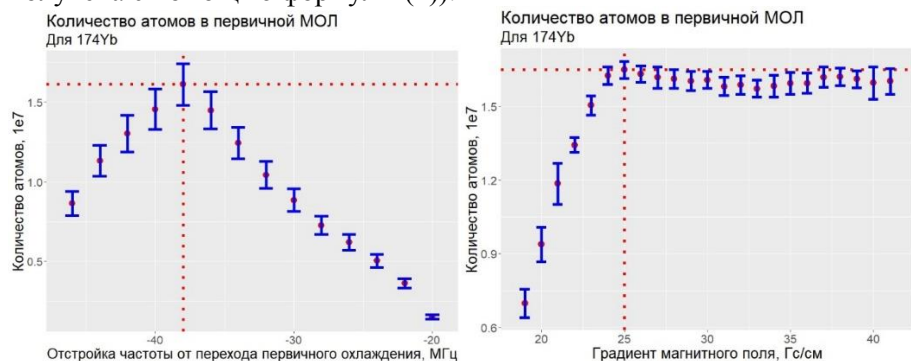


Рисунок 11. Количество атомов при изменении частотной отстройки от перехода первичного охлаждения (слева), при изменении градиента магнитного поля (справа)

В разделе 4.9 оценен вклад неопределенности каждого члена формулы оценки количества атомов в МОЛ и в потоке для атомов иттербия. Получено значение неопределенности типа В (см. таблицу 2). Таблица 2. Бюджет неопределенностей для оценки количества атомов иттербия в МОЛ

Измеряемая величина	λ , нм	S_0 , Вт	δ , МГц	K_{Grad} , Вт	T_{grad} , сек	f , мм	D_L , мм	T_0 , Вт	S_0 , Вт	t , сек
Неопределенность										
Значение измеряемой величины U	$4,00 \cdot 10^2$	$3,50 \cdot 10^{-2}$	30	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{05}$	$1,95 \cdot 10^2$	35	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$
Неопределенность средства измерения u	$5,77 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	1.15	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{08}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$
Относительная неопределенность u/U	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Суммарная неопределенность $N_{\text{ит}}$	$3,99 \cdot 10^{-2}$									

В разделе 4.10 приведены экспериментальные исследования и оценка возможности создания в РФ перебазируемого ОСЧ на основе атомов иттербия. Приведено сравнение созданных составных частей ОСЧ на атомах иттербия с аналогичными частями ОСЧ на атомах стронция.

Заключение

При выполнении диссертационной работы были проведены эксперименты по первичному и вторичному охлаждению атомов стронция и первичному охлаждению атомов иттербия. Также были приведены экспериментальные исследования и доказана возможность создания в РФ перебазируемого ОСЧ на основе атомов иттербия. Тем самым достигнута основная цель диссертационного исследования, заключающаяся в разработке и исследовании систем первичного и вторичного лазерного охлаждения атомов стронция и иттербия в стационарном и перебазируемом ОСЧ.

В диссертационной работе представлены доказательства положений, выносимых на защиту:

- разработанная система первичного лазерного охлаждения обеспечивает захват не менее $4 \cdot 10^7$ атомов стронция в первичную магнитооптическую ловушку из потока $1,2 \cdot 10^{12}$ атомов в секунду за счет оптимизации магнитного поля и частотной отстройки лазерного излучения от квантового перехода первичного охлаждения;
- разработанная система вторичного лазерного охлаждения обеспечивает захват не менее $5 \cdot 10^6$ атомов стронция во вторичную магнитооптическую ловушку из облака $4 \cdot 10^7$ атомов в первичной магнитооптической ловушке с помощью перемешивающего излучения;
- разработанная компактная система распределения лазерного излучения обеспечивает захват в первичную магнитооптическую ловушку не менее $1,6 \cdot 10^7$ атомов иттербия из потока $1,3 \cdot 10^{14}$ атомов в секунду за счет оптимизации магнитного поля и частотной отстройки лазерного излучения от квантового перехода первичного охлаждения.

Для доказательства этих положений, в ходе диссертационного исследования, были решены следующие частные научные задачи:

- разработана вакуумная камера оптического спектроскопа, проведены эксперименты по охлаждению и захвату атомов стронция и оценен уровень потока атомов, создаваемый источником горячих атомов стронция;

- разработана и исследована системы первичного охлаждения атомов стронция;
- разработана и исследована системы вторичного охлаждения атомов стронция;
- разработана компактная вакуумная камера оптического спектроскопа, проведены эксперименты по охлаждению и захвату атомов иттербия и оценен уровень потока атомов, создаваемый источником горячих атомов иттербия;
- разработана и исследована система распределения лазерного излучения, осуществляющая его разделение по мощностям, частотным отстройкам и необходимым направлениям для охлаждения атомов иттербия.

Список публикаций по теме диссертации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Семенко А.В., Луговой А.А., Вялых А.П., Белотелов Г.С., Сутырин Д.В., Слюсарев С.Н. Перспективный оптический стандарт частоты // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 147–151. (ВАК)
2. Вялых А.П., Семенко А.В., Сутырин Д.В., Белотелов Г.С., Слюсарев С.Н., «Комплекс микрогравитационных испытаний для мобильных и портативных оптических стандартов частоты», Измерительная техника. 2022. № 3. С. 45-52. (ВАК, Scopus)
3. Gribov, A. Y., Berdasov, O. I., Belotelov, G. S., Stelmashenko, E. F., Sutyurin, D. V., Slyusarev, S. N. (2021). Optical Frequency Standard Based on Strontium Cold Atoms. Measurement Techniques, 63, 959-965. (ВАК, Scopus)
4. Семенко, А. В., Белотелов, Г. С., Сутырин, Д. В., Слюсарев, С. Н., Юдин, В. И., Тайченачев, А. В., Пальчиков, В. Г. (2021). Анализ неопределенностей стандарта частоты на холодных атомах иттербия с использованием операционных параметров оптической решетки. Квантовая электроника, 51(6), 484-489. (ВАК, Scopus)
5. Белотелов Г. С., Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н. Текущее состояние разработки компактных оптических реперов частоты на холодных атомах иттербия //Альманах современной метрологии. – 2021. – №. 4(28). – С. 100-108. (ВАК)
6. Грибов, А. Ю., Бердасов, О. И., Белотелов, Г. С., Стельмашенко, Е. Ф., Сутырин, Д. В., Слюсарев, С. Н. (2020). Оптический стандарт частоты

- на холодных атомах стронция. Измерительная техника, (12), 22-27. (BAK)
7. Belotelov, G. S., Ovsiannikov, V. D., Sutyurin, D. V., Gribov, A. Y., Berdasov, O. I., Pal'chikov, V. G., Blinov, I. Y. (2020). Lattice light shift in strontium optical clock. *Laser physics*, 30(4), 045501. (BAK, Scopus)
 8. Белотелов Г. С., Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н. На пути к мобильному оптическому стандарту частоты на нейтральных атомах иттербия //Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6. – №. 1. – С. 24-31. (BAK)
 9. Бердасов, О. И., Сутырин, Д. В., Стрелкин, С. А., Грибов, А. Ю., Белотелов, Г. С., Костин, А. С., Слюсарев, С. Н. (2018). О продолжительности непрерывной работы оптического стандарта частоты на атомах стронция. *Квантовая электроника*, 48(5), 431-437. (BAK, Scopus)
 10. Бердасов, О. И., Грибов, А. Ю., Белотелов, Г. С., Пальчиков, В. Г., Стрелкин, С. А., Хабарова, К. Ю., Слюсарев, С. Н. (2017). Ультростабильная лазерная система для спектроскопии часового перехода $^1S_0-^3P_0$ в атомах Sr. *Квантовая электроника*, 47(5), 400-405. (BAK, Scopus)
 11. Бердасов, О. И., Хабарова, К. Ю., Галышев, А. А., Стрелкин, С. А., Грибов, А. Ю., Костин, А. С., Белотелов Г. С., Слюсарев, С. Н. (2016). Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция. *Труды Института прикладной астрономии РАН*, (36), 75-82. (BAK)
 12. Хабарова, К. Ю., Галышев, А. А., Стрелкин, С. А., Костин, А. С., Белотелов, Г. С., Бердасов, О. И., Слюсарев, С. Н. (2015). Спектроскопия интеркомбинационного перехода $^1S_0-^3P_1$ для вторичного охлаждения атомов стронция. *Квантовая электроника*, 45(2), 166-170. (BAK, Scopus)
 13. Бердасов, О. И., Хабарова, К. Ю., Стрелкин, С. А., Белотелов, Г. С., Костин, А. С., Грибов, А. Ю., Слюсарев, С. Н. (2014). Оптические стандарты частоты на холодных атомах стронция. *Альманах современной метрологии*, (1), 13-36. (BAK)
 14. Хабарова, К. Ю., Слюсарев, С. Н., Стрелкин, С. А., Белотелов, Г. С., Костин, А. С., Пальчиков, В. Г., Колачевский, Н. Н. (2012). Лазерная система для вторичного охлаждения атомов стронция-87. *Квантовая электроника*, 42(11), 1021-1026. (BAK, Scopus)

Список литературы

1. Prestage, J. D. et al. Mercury-ion clock based on linear multi-pole ion trap // Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition, June 2000. pp. 706-710.
2. Katori, H. et al. Laser cooling of strontium atoms toward quantum degeneracy. // AIP Conference Proceedings, Vol. 551, January 2001. pp. 382-396.
3. Chen J. S. Ticking near the Zero-Point Energy: towards 1×10^{-18} Accuracy in Al^+ Optical Clocks // дис. – University of Colorado at Boulder, 2017.
4. Huang Y. et al. Liquid-Nitrogen-Cooled Ca^+ Optical Clock with Systematic Uncertainty of 3×10^{-18} // Physical Review Applied, 2022. pp. T. 17. – №. 3. – С. 034041.
5. Huntemann N. et al. High-accuracy optical clock based on the octupole transition in $^{171}\text{Yb}^+$ // Physical Review Letters, 2012. pp. T. 108. – №. 9. – С. 090801.
6. Bothwell T. et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of 2.0×10^{-18} // Metrologia, 2019. pp. T. 56. – №. 6. – С. 065004.
7. Nardelli N. V. et al.. 10^{-18} Optical Atomic Clock Comparisons within the Boulder Atomic Clock Network // 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). – IEEE, 2020. pp. 1-2.
8. Dimarcq N. et al. Roadmap towards the redefinition of the second // //arXiv preprint , No. arXiv:2307.14141., 2023.
9. 27 Резолюция ГКМВ [Электронный ресурс] [2022]. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/64811223/Resolutions-2022.pdf/281f3160-fc56-3e63-dbf7-77b76500990f> (дата обращения: 1.10.2023).
10. Huang Y. et al. Geopotential measurement with a robust, transportable Ca^+ optical clock // Physical Review A, 2020. pp. T. 102. – №. 5. – С. 050802.
11. Koller S. B. et al. Transportable optical lattice clock with 7×10^{-17} uncertainty // Physical Review Letters, 2017. pp. T. 118. – №. 7. – С. 073601.
12. Takamoto M. et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // Nature Photonics, 2020. pp. T. 14. – №. 7. – С. 411-415.

ФГУП «ВНИИФТРИ»
Подписано в печать 1.11.2023 г.
Формат 70×90^{1/16}. Уч.-изд.л. ____
Тираж 80 экз. Заказ № ____

Полиграфучасток ФГУП «ВНИИФТРИ»,
141570, Россия, Московская обл., г. Солнечногорск, р.п. Менделеево