

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П. Н. Лебедева

Российской Академии Наук

На правах рукописи

Снигирев Степан Александрович

**Спектроскопия 5D уровней рубидия в
магнитооптической ловушке**

Специальность: 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва, 2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Сорокин Вадим Николаевич
(ФИАН, зав. отделом спектроскопии)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Городецкий Михаил Леонидович
(МГУ им. Ломоносова, профессор)

доктор физико-математических наук
Пальчиков Виталий Геннадьевич
(ВНИИФТРИ, зам. директора)

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
спектроскопии Российской Академии
Наук (ИСАН)

Защита состоится «29» сентября 2014 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Факс: 8(495)135-78-80

e-mail: postmaster@lebedev.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу:

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Электронная версия автореферата размещена: <http://www.lebedev.ru>

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.023.03

д.ф.-м.н.

М. А. Казарян

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Представленная диссертация посвящена спектроскопии $5D$ уровней атомов рубидия в магнитооптической ловушке. Магнитооптическая ловушка является удобным инструментом для спектроскопических исследований атомов благодаря нескольким факторам: за счет малой температуры атомов в ловушке достигается практически полное подавление доплеровского уширения, что позволяет проводить прецизионные измерения со спектральными линиями с ширинами близкими к естественным; благодаря длительному времени жизни атомов в ловушке возможно изучение процессов с малыми вероятностями; а учитывая то, что количество атомов в облаке и их пространственное распределение легко определяется, возможно проведение абсолютных измерений. Холодные атомы находят применение во многих областях современной физики. В метрологических экспериментах с их помощью создаются новые стандарты частоты [1] [2], в квантовых технологиях на таких системах реализовывают кубиты [3] и элементы квантового компьютера [4]. При помощи атомов в оптических решетках готовятся эксперименты по симуляции эффектов, доступных ранее только в твердом теле – сверхпроводимость [5], ферромагнетизм [6], сверхтекучесть [7] и других.

Целью диссертационной работы является спектроскопия $5D$ уровня. Он является верхним уровнем двухфотонного перехода $5S \leftrightarrow 5D$, рекомендованного Международным Комитетом Мер и Весов в качестве вторичного стандарта определения метра [8], а также, промежуточным уровнем для каскадного возбуждения атомов в ридберговские состояния, которые используются в протоколах квантовых вычислений и реализации кубитов [9]. Основными задачами, которые решаются в диссертации, являются выбор оптимальной методики возбуждения атомов на $5D$ уровне и измерение их поляризуемостей. Величины поляризуемостей определяют взаимодействие атомов с внешним

электрическим полем – как постоянным, так и нерезонансным электромагнитным излучением.

В настоящее время использование холодных атомов в сильно отстроенном от резонансов электромагнитном поле. Реперы частоты на атомах в оптических решетках позволяют построить стандарты частоты нового поколения [1] [2], кроме того, активные разработки ведутся в направлении квантовых симуляторов, использующих атомы, помещенные в периодический потенциал сильно отстроенных электромагнитных волн [5] [6] [7]. Во всех этих исследованиях критически важным является учет сдвига энергетических уровней атомов во внешнем электромагнитном поле, описываемого поляризуемостями используемых уровней.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Разработаны методики контролируемого заселения определенных магнитных подуровней $5D$ уровней рубидия в условиях магнитооптической ловушки. Определена максимально возможная эффективность заселения необходимых подуровней в присутствии остаточного магнитного поля. В частности, при магнитном поле в 1 Гс максимальная эффективность оптической накачки составляет 90%.
- При помощи вынужденного комбинационного адиабатического заселения достигнута максимальная эффективность 80% заселения $5D$ уровней с основного состояния при реализуемых в эксперименте условиях. Калибровка производилась из сравнения теоретических и экспериментальных результатов.
- Измерены сдвиги спектральных линий для различных конкретных магнитных подуровней $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней рубидия в постоянном внешнем электрическом поле. Постоянные Штарка составили $2.014(8)$ МГц/(кВ/см)² и $2.087(8)$ МГц/(кВ/см)² при возбуждении $5D_{5/2}$

уровня при помощи излучения с σ^+ и σ^- поляризацией соответственно. Для $5D_{3/2}$ уровня – $2.066(8)$ МГц/(кВ/см)² и $2.158(9)$ МГц/(кВ/см)² для σ^+ и σ^- поляризаций соответственно.

- По сдвигу спектральных линий во внешнем электрическом поле определены значения поляризуемостей $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней атома рубидия, которые составили $\alpha_S(5D_{5/2}) = 18\ 400$, $\alpha_T(5D_{5/2}) = -750$, $\alpha_S(5D_{3/2}) = 18\ 600$ и $\alpha_T(5D_{3/2}) = -1440$ с точностью 0.4% для скалярной и 4% для тензорной части.

Научная новизна:

- Впервые исследован неадиабатический режим возбуждения атомов при помощи вынужденного комбинационного заселения в каскадной схеме $5S \leftrightarrow 5P \leftrightarrow 5D$ в атомах рубидия, когда существенное влияние начинает оказывать спонтанный распад верхнего уровня. Эффективность возбуждения исследовалась экспериментально и сравнивалась с численными расчетами, полученными при варьировании большого количества параметров. Проведенное исследование позволило выбрать оптимальные условия для достижения максимальной эффективности возбуждения.
- Впервые были экспериментально определены абсолютные значения скалярной и тензорной поляризуемостей $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней рубидия. Точность составила 0.4% для скалярной и 4% для тензорной поляризуемостей, что сравнимо с точностью измерений поляризуемостей основных состояний.

Практическая значимость диссертационной работы определяется важностью полученных в работе значений поляризуемостей $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней рубидия. Значения поляризуемостей уровней необходимы для описания взаимодействия атомов с постоянным электрическим полем, а также с сильно

отстроеным от резонанса электромагнитным излучением. $5D$ уровень рубидия широко используется в метрологических исследованиях, поскольку двухфотонный переход $5S \leftrightarrow 5D$ рекомендован Международным Комитетом Мер и Весов в качестве вторичного стандарта частоты. Также $5D$ уровень активно используется в качестве промежуточного при заселении высоковозбужденных ридберговских состояний.

Разработанные методики спектральных измерений в холодных атомах в условиях магнитооптической ловушки позволяют проводить аналогичные измерения для других атомов и уровней.

Полученные экспериментальные значения поляризуемостей позволят учесть их в теоретических расчетах [10] [11].

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается использованием адекватных методов спектроскопических измерений, согласием полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами и их повторяемостью при различных методиках измерения.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. С. Снигирев, «Измерение поляризуемости $5D$ уровня в холодных атомах рубидия», *Международная конференция-конкурс молодых физиков*, Москва, 2014
2. С. Снигирев, А. Головизин, А. Акимов, Н. Колачевский, В. Сорокин, «Спектроскопия холодных атомов рубидия в магнитооптической ловушке», *XVIII международный симпозиум по нанофизике и наноэлектронике*, Нижний Новгород, Россия, 2014

3. S. Snigirev, E. Tereshenko, A. Akimov, V. Sorokin, «Spectroscopy of cold Rubidium atoms in a magneto-optical trap», *10th European Conference on Atoms Molecules and Photons*, Salamanca, Spain, 2010
4. S. Snigirev, E. Tereshenko, A. Akimov, V. Sorokin, «Fluorescence Spectroscopy of the 5D level in a Rb-87 Magneto-Optical Trap», *International Conference on Coherent and Nonlinear Optics*, Kazan, Russia, 2010
5. S. Snigirev, E. Tereshenko, «Measurement of the polarizability of 5D level of rubidium atoms in a magneto optical trap», *Pre-doctoral school «Ultracold atoms, metrology and quantum optics»*, Les Houches, France, 2010
6. С.А. Снигирев, Е.О. Терещенко, А.В. Акимов, Н.Н. Колачевский, В.Н. Сорокин «Спектроскопия холодных атомов рубидия в магнитооптической ловушке», *XIII Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики»*, Звенигород, 2010

Диссертационная работа была поддержана грантами РФФИ 12-02-00867а, 11-02-00987а, 12-02-00867а, 11-02-00987а, грантом президента Российской Федерации МД-669.2011.8 и программой фундаментальных исследований ОФН РАН 2012-2014 гг. «Оптическая спектроскопия и ее приложения»

Личный вклад. Все экспериментальные результаты были получены под руководством и при личном участии автора. Численные расчеты производились автором лично. Определение общего направления работы и обсуждение получаемых результатов проводилось на семинарах лаборатории совместно с научным руководителем.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в следующих публикациях в журналах из списка ВАК:

1. С. Снигирев, «Измерение поляризуемости 5D уровня в холодных атомах рубидия», Физическое образование в ВУЗах, спец. Выпуск Труды конференции-конкурса молодых физиков, Москва, 2014
2. S. Snigirev, A. Golovizin, D. Tregubov, S. Pyatchenkov, D. Sukachev, A. Akimov, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, «Measurement of the 5D-level polarizability in laser-cooled Rb atoms», Phys. Rev. A 89, 012510 (2014)
3. S.A. Snigirev, A.A. Golovizin, G.A. Vishnyakova, A.V. Akimov, V. N. Sorokin, N.N. Kolachevskii, «Coherent excitation of the 5D_{5/2} level of ultracold rubidium atoms with short laser pulses», Quantum Electronics, 2012, Vol. 42, No 8

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации **93** страниц текста с **38** рисунками и **3** таблицами. Список литературы содержит **78** наименований.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, кратко изложено содержание разделов диссертации.

В **Главе 1 «Магнитооптическая ловушка для атомов рубидия»** подробно изложена конструкция экспериментальной установки по получению облака холодных атомов рубидия. В пп. 1.1-1.3 описывается принцип лазерного охлаждения и захвата атомов в магнитооптическую ловушку при помощи комбинации оптической патоки и градиентного магнитного поля.

В п. 1.4 приводится описание конструктивных особенностей магнитооптической ловушки: устройство лазерной системы, используемой для создания охлаждающего и перекачивающего излучения; методы стабилизации частоты

лазеров по контурам насыщенного поглощения; оптическая схема для создания шести сбалансированных лазерных пучков, формирующих оптическую патоку; необходимые характеристики катушек для создания градиентного магнитного поля, обеспечивающего локализацию атомов в облако.

В п. 1.5 описываются используемые методики измерения характеристик облака холодных атомов и результаты соответствующих измерений. Сравниваются два метода измерения температуры атомов в облаке – по сигналу люминесценции при перезахвате атомов и по изображениям разлетающегося облака атомов, полученных при помощи ПЗС камеры. Приводится пространственное распределение холодных атомов в облаке, полученное по изображениям с камеры. Обсуждаются экспериментально полученные зависимости количества атомов в облаке от отстройки охлаждающего излучения и токов через диспенсоры, регулирующих поток охлаждаемых атомов в кювете. По результатам измерений получены следующие характеристики облака атомов при оптимальном режиме работы установки: количество атомов – 1×10^6 , температура атомов – 300 мкК, размер облака – 300 мкм. Значение отстройки, при котором достигается максимальное количество атомов в облаке, составило 9.7 МГц.

П. 1.6 посвящен спектроскопии $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней рубидия в условиях магнитооптической ловушки. Здесь описываются конструктивные изменения в ловушке, необходимые для возбуждения атомов на $5D$ уровни и дальнейшее детектирование их населенностей. Наиболее удобным способом детектирования населенностей $5D$ уровней является детектирование фотонов с длиной волны 420 нм, излучаемых при каскадном распаде атомов по каналу $5D \rightarrow 6P \rightarrow 5S$. В этой части также описывается схема стабилизации лазера, резонансного переходу $5P \leftrightarrow 5D$, по частоте с использованием кюветы с парами рубидия. Кроме того, здесь обсуждается реализация импульсной схемы возбуждения $5D$ уровней, поскольку в условиях магнитооптической ловушки наиболее удобным является именно импульсный режим.

В Главе 2 «Выбор методики заселения 5D уровней» раскрываются возможные методики эффективного заселения 5D уровней рубидия при помощи коротких лазерных импульсов и способы заселения конкретных магнитных подуровней при помощи оптической накачки в условиях магнитооптической ловушки.

П. 2.2 посвящен описанию наиболее эффективных методов заселения 5D уровней. В пп. 2.2.1-2.2.3 теоретически описывается взаимодействие трехуровневого атома с полем двух лазерных полей. Описывается динамика населенностей уровней в различных режимах возбуждения – непрерывном, импульсном при помощи π -импульсов и в режиме вынужденного комбинационного адиабатического заселения (Stimulated Raman Adiabatic Passage, STIRAP). В последнем случае возбуждение производится при помощи двух перекрывающихся лазерных импульсов, следующих в инвертированном порядке, то есть, когда первым следует лазерный импульс, резонансный переходу $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$, а после него – импульс, резонансный переходу $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$. В таком режиме теоретически возможно заселение верхнего уровня с эффективностью 100%. Причем, населенность второго уровня равна нулю в течение всего времени возбуждения, вследствие чего спонтанный распад этого уровня не влияет на эффективность возбуждения.

В пп. 2.2.4-2.2.6 приводятся теоретические и экспериментальные результаты, полученные в результате исследования эффективности возбуждения 5D уровней атома рубидия короткими лазерными импульсами. Теоретические результаты были получены через решение уравнения на матрицу плотности для трехуровневой системы в поле лазерных импульсов. При моделировании учитывался профиль импульсов, используемых в эксперименте. Для расчетов было написано программное обеспечение, реализующее параллельные вычисления на нескольких компьютерах одновременно, что, используя вычислительную мощность 40 компьютеров, позволило провести расчеты для динамики населенностей уровней системы при 10^7 различных значениях параметров системы: отстройку лазерных

импульсов от резонансов, их мощностей, длительностей и задержки между импульсами. По результатам расчетов были выбраны оптимальные параметры, доступные для реализации в эксперименте. Экспериментальные результаты показали хорошую согласованность с теорией (Рис 1). В результате, при доступных нам мощностях лазерного излучения, была получена 80% локальная эффективность возбуждения атомов рубидия в центре облака при фокусировке лазерных пучков в 0.01 мм^2 и 40% эффективность при фокусировке в 1 мм^2 . Такая эффективность достигалась при длительностях импульсов в 80-140 нс с задержкой между импульсами равной половине их длительности, с нулевой двухфотонной отстройкой и равными частотами Раби.

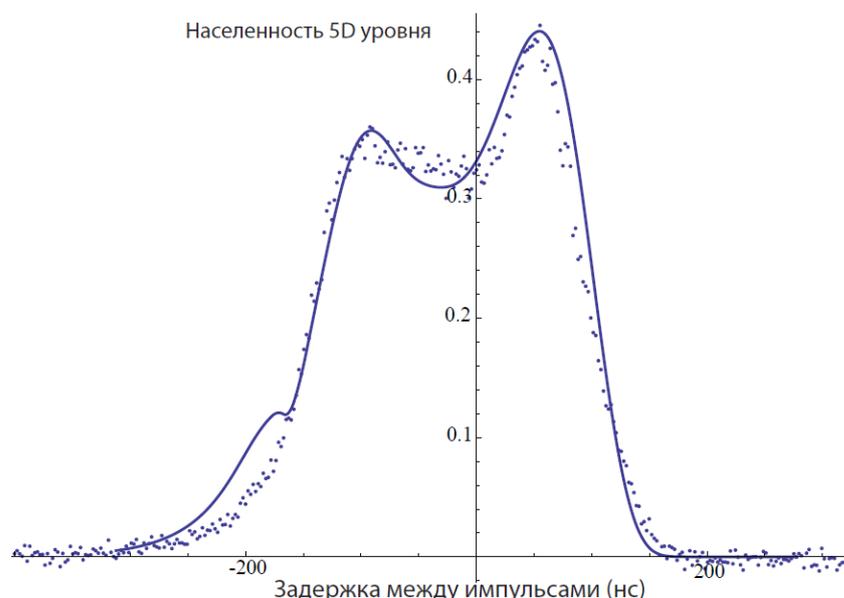


Рисунок 1. Зависимость населенности $5D_{5/2}$ уровня рубидия от задержки между лазерными импульсами Δt для импульсов длительностью в 120 нс. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – результат численного решения уравнения на матрицу плотности при экспериментальных параметрах. Возбуждающее излучение фокусировалось в площадку диаметром 1 мм^2 , при мощности излучения 1 мВт. Населенность $5D_{5/2}$ уровня нормировалась по результатам моделирования.

П. 2.3 посвящен методике контролируемого заселения определенных магнитных подуровней $5D$ уровней в условиях магнитооптической ловушки. Определена минимальная длительность оптической накачки, резонансной переходу $5S \leftrightarrow 5P$,

необходимая для перевода населенности всех атомов в состояние $5P_{3/2}(F = 3, m = 3)$. Рассмотрено влияние произвольно направленного магнитного поля, неизбежно присутствующего в магнитооптической ловушке, на процесс оптической накачки. Получено, что при полях меньше 1 Гс эффективность оптической накачки снижается не более чем на 10%. При полях порядка 4 Гс и больше эффективность оптической накачки не превышает 50%.

П. 2.4 посвящен выбору оптимального режима импульсного возбуждения атомов на $5D$ уровни для определения их поляризуемостей. С целью минимизации неопределенности при измерениях штарковских сдвигов был выбран режим каскадного возбуждения. В этом режиме в сдвиг $5D$ уровней не вносит вклад переменный эффект штарка, обусловленный нерезонансным излучением на длине волны 780 нм, однако эффективность возбуждения получается существенно ниже, чем при вынужденном комбинационном заселении.

В **Главе 3 «Определение поляризуемостей $5D$ уровней атомов рубидия»** описывается методика измерения штарковских сдвигов $5D$ уровней в постоянном внешнем электрическом поле. В пп. 3.1-3.2 описывается важность измерения поляризуемостей уровней атомов и описывается взаимодействие атома с внешним электрическим полем.

П. 3.3 посвящен описанию конструкции, позволяющей прикладывать постоянное электрическое поле к облаку холодных атомов и методике измерения этого поля. Для создания электрического поля использовался плоский конденсатор, состоящий из двух металлических сеток, приклеенных к стеклянной конструкции. Вся конструкция помещалась внутрь вакуумной кюветы (рис. 2). Расстояние между пластинами измерялось с точностью 25 мкм оптическим методом в уже установленном состоянии, после чего значение поля рассчитывалось численно с учетом всех окружающих диэлектрических и металлических частей ловушки.

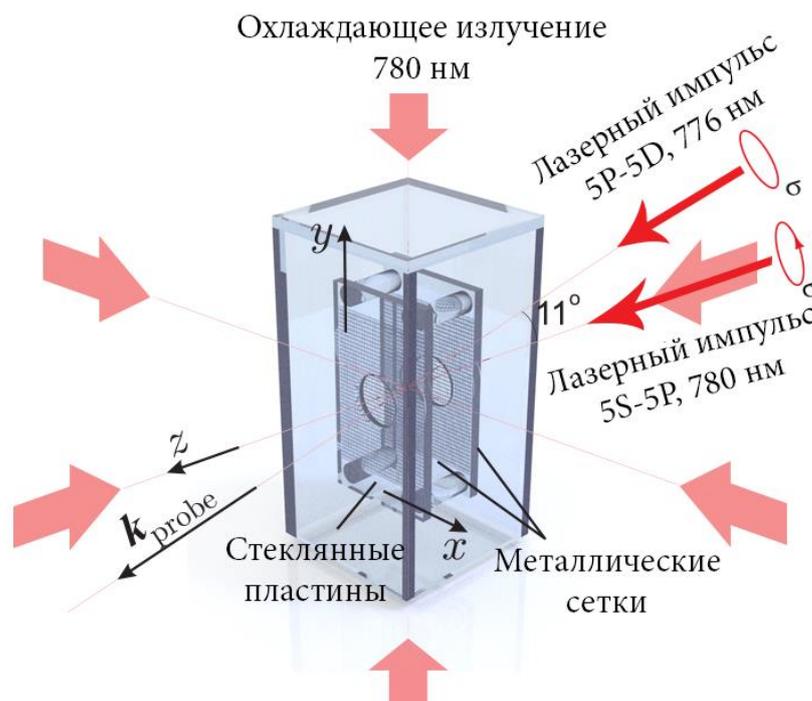


Рисунок 2. Вакуумная кювета с плоским конденсатором внутри и направления лазерных пучков, используемых при измерении поляризуемости $5D$ уровней рубидия.

В п. 3.4 описана методика определения поляризуемостей уровней по измеренным значениям штарковских сдвигов в электрическом поле. Показаны примеры спектральных линий, полученные в различных режимах заселения уровней (рис. 3, 4).

В п. 3.5 приводятся измеренные значения штарковских сдвигов $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней рубидия и полученные из них значения скалярной и тензорной поляризуемостей. Также приведен бюджет ошибок, определяющих доверительный интервал полученных значений. Постоянные Штарка, измеренные в эксперименте, составили $2.014(8)$ МГц/(кВ/см)² и $2.087(8)$ МГц/(кВ/см)² при возбуждении $5D_{5/2}$ уровня при помощи излучения с σ^+ и σ^- поляризацией соответственно. Для $5D_{3/2}$ уровня – $2.066(8)$ МГц/(кВ/см)² и $2.158(9)$ МГц/(кВ/см)² для σ^+ и σ^- поляризаций соответственно. Из этих значений получены значения поляризуемостей уровней, которые составили 18 400 и -750 атомных единиц для скалярной и тензорной поляризуемости $5D_{5/2}$ уровня. Для $5D_{3/2}$ уровня соответствующие поляризуемости

составили 18 600 и -1440 атомных единиц. Точность определения поляризуемостей составила 0.4% для скалярной и 4% для тензорной.

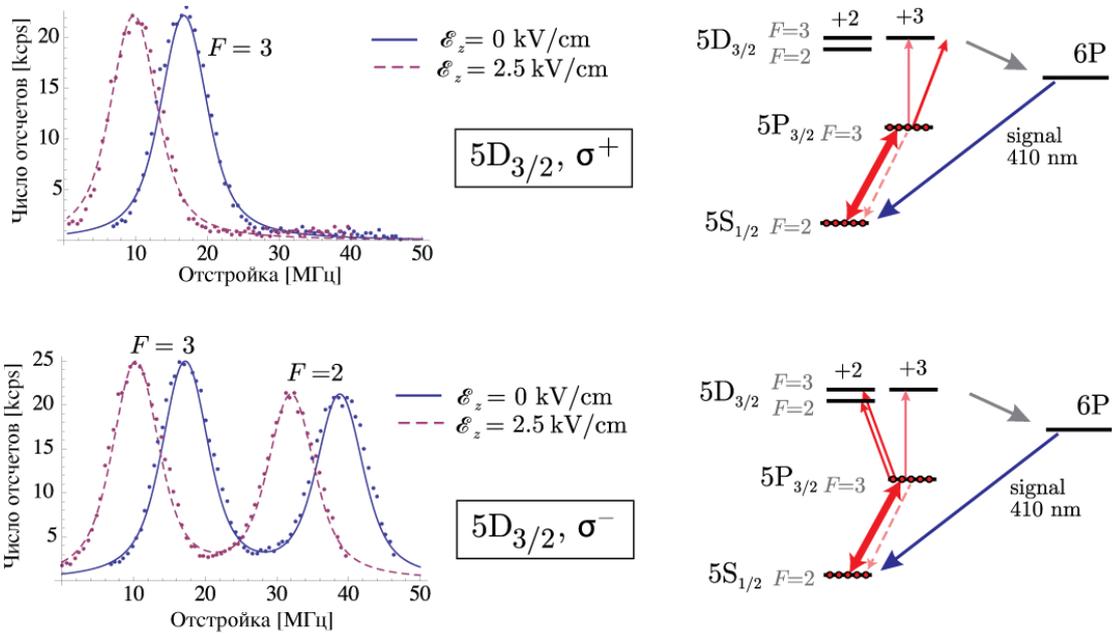


Рисунок 3. Спектры для $5D_{3/2}$ уровня для σ^+ и σ^- поляризаций возбуждающего излучения.

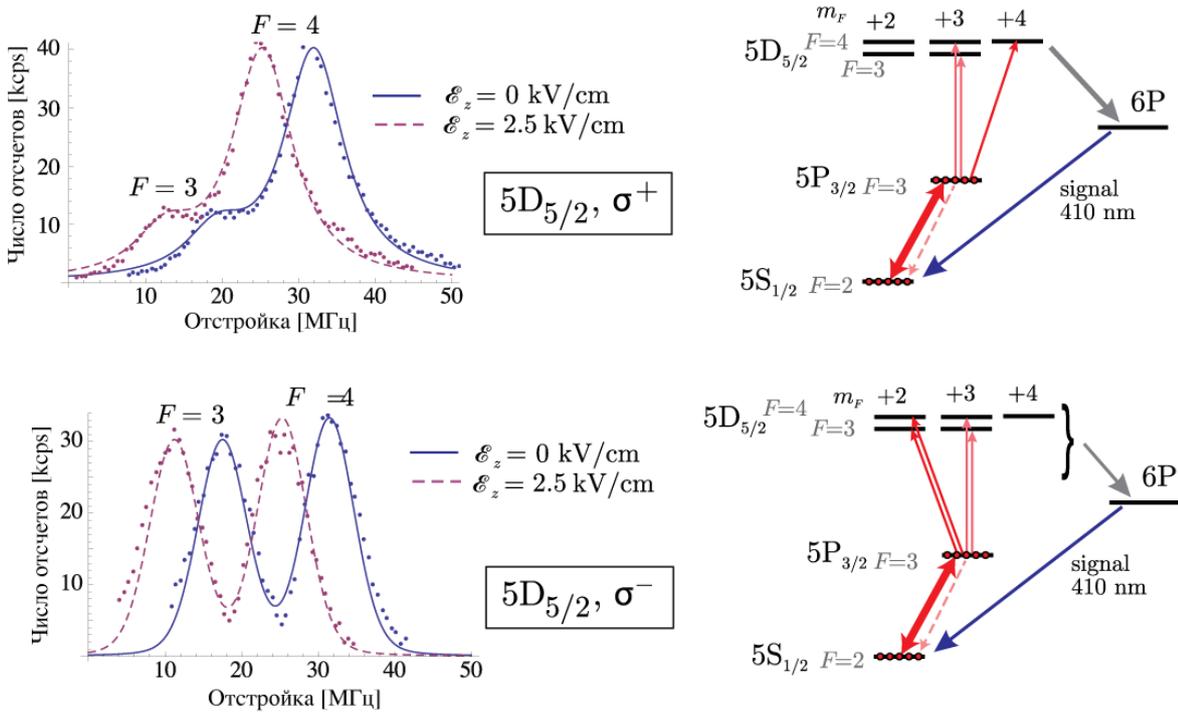


Рисунок 4. Спектры для $5D_{5/2}$ уровня для σ^+ и σ^- поляризаций возбуждающего излучения

Бюджет ошибок, определяющих доверительный интервал полученных значений поляризуемостей приводится в таблице 1.

| Источник погрешности | Погрешность (%) |
|---|------------------------|
| Статистическая погрешность | 0.2 |
| Определение величины электрического поля | 0.3 |
| Остаточное магнитное поле | 0.1 |
| Погрешность аппроксимации контура спектра | 0.03 |
| Оптическая накачка | 0.07 |
| Степень поляризации возбуждающего излучения | 0.1 |
| Переменный эффект Штарка | 0.1 |
| Итого | 0.41 |

Таблица 1. Вклады различных факторов в итоговую погрешность определения поляризуемости.

В **Заключении** обобщены основные результаты диссертации.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящей диссертации, следующие:

1. Измерены характеристики облака холодных атомов, получаемых в магнитооптической ловушке – температура, количество, пространственное распределение и плотность атомов. Температура атомов измерялась двумя методами: методом перезахвата и через наблюдение разлета облака атомов при помощи ПЗС камеры. Получено, что температура атомов в облаке в условиях эксперимента составляла 300 мкК. Также исследованы зависимости характеристик облака от тока диспенсеров и отстройки охлаждающего излучения. Размер облака менялся от 100 мкм до 0.5 мм в зависимости от тока диспенсеров.

Максимальная концентрация атомов в облаке достигалась при отстройке охлаждающего излучения равной 9.7 МГц и составляла 1×10^{11} см⁻³ при общем количестве атомов 1×10^6 .

2. Проведены теоретические расчеты эффективности возбуждения атомов на $5D$ уровень при различных параметрах лазерных импульсов – интенсивностях, отстройках и длительностях, а также при различном значении временной задержки между ними.
3. Исследована зависимость эффективности возбуждения холодных атомов рубидия на $5D$ уровень в схеме $5S \rightarrow 5P \rightarrow 5D$ от параметров возбуждающего излучения (мощность, отстройка и длительность) и задержки между возбуждающими импульсами. Показано, что эффективность заселения $5D$ уровня при помощи вынужденного комбинационного адиабатического заселения выше, чем при каскадном возбуждении. Достигнута 40% эффективность возбуждения атомов на $5D_{5/2}$ уровень в среднем по ансамблю и 80% локальная эффективность при фокусировке лазерного излучения на часть облака. Получено, что наибольшая средняя эффективность заселения достигается при длительностях импульсов в 100 нс, нулевой отстройке, задержке между импульсами равной половине длительности и при мощностях излучения, обеспечивающих равные частоты Раби. Результаты численных расчетов показали хорошую согласованность с экспериментальными данными.
4. Реализовано контролируемое заселение конкретных магнитных подуровней $5D$ уровней при помощи предварительной оптической накачки атомов в состояние $5P_{3/2}(m = 3)$.
5. Исследовано влияние произвольно направленного магнитного поля на процесс оптической накачки заданного магнитного подуровня и численно промоделирована его эволюция во времени в зависимости от величины магнитного поля, интенсивности излучения накачки и начального магнитного поля.

- состояния атома. Получено, что при магнитных полях меньше 1 Гс и параметре насыщения $S_0 > 1$ эффективность оптической накачки сохраняется на высоком уровне и превышает 90%. Результаты численных расчетов согласуются с полученными экспериментальными данными.
6. Модернизирована вакуумная часть магнитооптической ловушки для того, чтобы величина прикладываемого электрического поля была гарантированно известна. Для этого в кювете были установлены две металлические сетки с прозрачностью 80%, формирующие плоский конденсатор. Расстояние между сетками было измерено с точностью 20 мкм при расстоянии между ними в 9.893 мм. Распределение электрического поля было численно промоделировано и показало, что на размерах облака атомов значение напряженности меняется не более чем на 0.1%.
 7. Измерены постоянные Штарка для сдвигов различных магнитных подуровней $5D_{5/2}$ и $5D_{3/2}$ уровней атома рубидия в постоянном внешнем электрическом поле. Постоянные Штарка составили $2.014(8)$ МГц/(кВ/см)² и $2.087(8)$ МГц/(кВ/см)² при возбуждении $5D_{5/2}$ уровня при помощи излучения с σ^+ и σ^- поляризацией соответственно. Для $5D_{3/2}$ уровня – $2.066(8)$ МГц/(кВ/см)² и $2.158(9)$ МГц/(кВ/см)² для σ^+ и σ^- поляризаций соответственно.
 8. Из полученных постоянных Штарка были рассчитаны скалярная и тензорная поляризуемости $5D$ уровней. Получены следующие значения для поляризуемостей: 18 400 и -750 атомных единиц для скалярной и тензорной поляризуемости $5D_{5/2}$ уровня. Для $5D_{3/2}$ уровня соответствующие поляризуемости составили 18 600 и -1440 атомных единиц. Точность определения поляризуемостей составила 0.4% для скалярной и 4% для тензорной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1] S. C. K. Gibble, «Laser-cooled Cs frequency standard and a measurement of the frequency shift due to ultracold collisions,» *Physical review letters*, т. 70, № 12, 1993.
- [2] G. Wilpers et al., «Optical clock with ultracold neutral atoms,» *Physical review letters*, т. 89, № 23, 2002.
- [3] J. I. Cirac and P. Zoller, «Quantum computations with cold trapped ions,» *Physical review letters*, т. 74, № 20, 1995.
- [4] T. Chanelière et al., «Storage and retrieval of single photons transmitted between remote quantum memories,» *Nature*, т. 438, № 7069, 2005.
- [5] M Lewenstein et al., «Ultracold atomic gases in optical lattices: mimicking condensed matter physics and beyond,» *Advances in Physics*, т. 56, № 2, 2007.
- [6] Colin V. Parker, Li-Chung Ha and Cheng Chin, «Direct observation of effective ferromagnetic,» *Nature Physics*, 2013.
- [7] W. Hofstetter et al., «High-temperature superfluidity of fermionic atoms in optical lattices,» *Physical review letters*, т. 89, № 22, 2002.
- [8] T.J. Quinn, «Practical realisation of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards» (2001). *Metrologia*, 40:103133,.
- [9] E. Urban et al., «Observation of Rydberg blockade between two atoms,» *Nature Physics*, т. 5, № 2, 2009.

- [10] A.A. Kamenski, V.D. Ovsianikov, *J. Phys. B. At. Mol. Opt. Phys.* 39, 2247 (2006).
- [11] D.A. Kondrat'ev, I.L. Beigman, L.A. Vainshtein, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 35, 12, 355 (2008).