

На правах рукописи

**ВОЛОШИН ГАВРИИЛ ВАЛЕНТИНОВИЧ**

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЩЕЛОЧНЫХ АТОМОВ В УСЛОВИЯХ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ ТЕМНЫХ РЕЗОНАНСОВ**

Специальность 1.3.19 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени

Кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого»

Научный руководитель:

**Литвинов Андрей Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор ВШПФиКТ

Официальные оппоненты:

**Кобцев Сергей Михайлович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Заведующий Отделом лазерной физики и инновационных технологий НГУ, Директор Междисциплинарного Квантового Центра ФФ НГУ

**Корнев Алексей Станиславович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», профессор кафедры теоретической физики

Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук**

Защита состоится « 6 » сентября 2024 г. В 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 24.1.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ИЛФ СО РАН.  
<https://laser.nsc.ru/disovet/>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



д.ф.-м.н. Прудников О.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Взаимодействие двухчастотного лазерного излучения с трехуровневыми атомными средами при определенных условиях может приводить к возникновению особого суперпозиционного состояния, в котором атомы не поглощают внешнее излучение. Данное состояние получило название *темного состояния*. Перейдя в темное состояние, населенность атома оказывается «захвачена» в основном состоянии. Данное явление известно как *когерентное пленение населенностей* (КПН) [1–3]. Переход в темное состояние возможен только в узком диапазоне разности частот внешнего излучения, что придает явлению КПН резонансный характер. Резонанс КПН может иметь ширину много меньшую, чем естественная ширина линии поглощения. Благодаря этому явление КПН получило широкое применение в разработке таких устройств, как квантовые стандарты частоты [4–6] и оптические магнитометры [7–9]. Факт же отсутствия поглощения в темном состоянии позволил предложить метод лазерной генерации без инверсии [10–12].

Одним из способов наблюдения темного резонанса является детектирование излучения прошедшего сквозь ячейку с парами щелочных атомов. Для данного способа необходимо, чтобы концентрация активных атомов была достаточна для обеспечения значительного поглощения поля средой. В этом случае говорят об оптической плотности среды. Процесс распространения излучения в оптически плотных средах в условиях темного резонанса значительно отличается от стандартного экспоненциального поглощения, описываемого законом Бугера–Ламберта. Так, в [13] произведен вывод уравнений распространения непрерывного двухчастотного излучения и показано, что для достаточно больших интенсивностей излучения имеет место линейный закон спада интенсивности в условиях КПН.

Другим фактором, влияющим на форму темных резонансов, является движение атомов активной среды. Движение атомов в ячейке вследствие эффекта Доплера приводит к смещениям отстроек частотных компонент излучения от резонансных атомных переходов пропорционально скоростям. В результате усреднения по скоростям это может приводить к изменениям формы резонанса. Существенным преимуществом темного резонанса при соответствующем выборе схемы возбуждения является отсутствие стандартного доплеровского уширения [14], а в работе [15] показано, что в определенных условиях имеет место даже доплеровское сужение темного резонанса. Селективность темного резонанса по скоростям позволила разработать новые методы лазерного охлаждения [16–18]. Кроме того, движение атомов приводит к столкновениям их друг с другом и со стенками ячейки. В результате столкновений атомные когерентности разрушаются, что приводит к ухудшению качества детектируемого резонанса. В достаточно

разреженных атомных средах на первый план выходят столкновения со стенками ячейки. Одним из способов подавления деполяризации на стенках является использование специальных антирелаксационных покрытий. Их отличительной чертой является сохранение когерентности между подуровнями основного состояния атомов при столкновениях с ними [19].

Другим способом борьбы со столкновениями на стенках является введение в ячейку буферного газа. В качестве буферного газа выбираются такие газы, как азот, аргон, метан и другие. При столкновениях с ними активные атомы не деполяризуются. Это приводит к улучшению качества резонанса вследствие увеличения времени когерентного взаимодействия атомов с полем, а также эффекта сужения Дике [20].

Иным способом регистрации темного состояния является метод сканирования слабым пробным полем системы, находящейся в условиях резонанса с сильным управляющим полем. В таком случае провал может быть обнаружен в спектре поглощения пробного излучения. Такое явление, впервые предсказанное в [21] и обнаруженное экспериментально в [22, 23], носит название *электромагнитно-индуцированной прозрачности* (ЭИП). В работе [24] теория ЭИП была обобщена на случай безграничной среды движущихся атомов. Благодаря сравнительно длительному времени жизни темного состояния явление ЭИП нашло применение в соответствующих методах записи и хранения квантовой информации [25]. Кроме того, ширина результирующего дисперсионного контура пропорциональна ширине окна прозрачности. Таким образом, сужая окно прозрачности, можно добиться крайне крутого хода дисперсионной кривой вблизи резонанса, вследствие чего групповая скорость света сильно снижается при практически полном отсутствии поглощения. Так, например, в [26] наблюдалось экстремальное замедление света до значения групповой скорости в 17 м/с.

Широкое распространение получила так называемая схема Рэмси [27] возбуждения темных резонансов, суть которой заключается в воздействии лазерного излучения на систему импульсами, разнесенными во времени. Такой метод благодаря свободным осцилляциям долгоживущей радиочастотной когерентности между импульсами позволяет добиться существенного сужения линии резонанса [28, 29], а в работах [30–32] показано, что подбором соответствующих длительностей, фаз и частот импульсов можно добиться существенного подавления световых сдвигов темных резонансов.

Помимо сверхтонкой структуры уровней щелочных атомов, при теоретическом описании процессов возникновения темных резонансов большое значение имеет также магнитная структура. Дело в том, что зачастую, во избежание возникновения паразитных темных состояний на магнитных подуровнях, в экспериментах ячейка помещается в ненулевое магнитное поле. В таких системах могут наблюдаться наборы темных

резонансов, отвечающих  $\Lambda$ -схемам на различных магнитных подуровнях [33–35]. В этом случае при описании различных схем возбуждения большое значение играют поляризации лазерных полей.

### **Цель диссертационного исследования**

Теоретическое исследование влияния конечной температуры, оптической плотности и магнитной структуры уровней атомов активного вещества на процесс импульсного возбуждения резонансов когерентного пленения населенностей, а также исследование влияния столкновений с антирелаксационными покрытиями торцевых стенок газовой ячейки на процесс непрерывного возбуждения резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности.

### **Задачи диссертационного исследования**

1. Построение математической модели взаимодействия двухчастотного лазерного излучения с резонансными средами щелочных атомов с учетом их движения, оптической плотности, магнитной структуры и возможности столкновений со стенками.
2. Расчет спектральных форм резонансов когерентного пленения населенностей и электромагнитно-индуцированной прозрачности при различных параметрах лазерной накачки и атомной среды.
3. Анализ зависимости формы и сдвигов резонансов от температуры среды, толщины атомной ячейки, типа покрытия ее торцевых стенок, концентрации буферного газа, амплитуд и поляризаций лазерного излучения, а также величины приложенного магнитного поля на предмет возможности улучшения характеристик данных резонансов.

### **Научная новизна работы**

В работе впервые построена модель возбуждения нестационарных темных резонансов с учетом ненулевой температуры, оптической толщины и магнитной структуры активных атомов. Предложены новые способы подавления зависимостей светового сдвига резонансов когерентного пленения населенностей, возбуждаемых методом Рэмси, от оптической толщины среды и эллиптичности возбуждающего излучения.

Впервые построена модель, описывающая возникновения резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности с учетом столкновений с торцевыми стенками газовой ячейки. Предложена новая интерпретация эффекта различия стоксова и антистоксова каналов рассеяния пробного излучения в терминах одетых состояний.

## **Научная и практическая значимость работы**

Разработанные математические методы описания нестационарных и неоднородных процессов взаимодействия двухчастотного лазерного излучения с резонансными атомными средами могут применяться в задачах по поиску оптимальных условий работы квантовых стандартов частоты, оптических магнитометров, лазеров без инверсии, устройств квантовой памяти и квантовой обработки информации.

## **Методология и методы исследования**

Для описания квантового состояния рассматриваемых физических систем используется метод матрицы плотности в представлении Вигнера. Состояние электромагнитного излучения описывается при помощи классического волнового уравнения. Возникающие системы обыкновенных дифференциальных уравнений решаются аналитически, либо численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Уравнения распространения излучения решаются методом Эйлера. Для решения систем интегро-дифференциальных уравнений Вольтерры используется модификация метода Эйлера, полученная на основе применения формулы трапеций к вычислению интегралов с переменным верхним пределом.

## **Положения, выносимые за защиту**

1. При импульсном детектировании резонанса когерентного пленения населенностей существует оптимальная разность фаз между частотными компонентами считывающего импульса, при которой сдвиг резонанса является наименее чувствительным к изменению оптической плотности среды.
2. Зависимость сдвига резонансов когерентного пленения населенностей, детектируемых методом Рэмси, от эллиптичности электромагнитного излучения имеет немонотонный характер, при котором существуют области минимальной чувствительности сдвига резонансов к изменению эллиптичности.
3. Невырожденность возбужденного состояния атомов при детектировании резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности в газовых ячейках без буферного газа с антирелаксационными покрытиями стенок вызывает асимметрию основного резонанса и приводит к возникновению дополнительных резонансов при ненулевых двухфотонных отстройках.
4. При малых длинах газовой ячейки по сравнению с длиной волны сверхтонкого расщепления основного состояния атомов появляются различия в дуальной форме резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности между зеркально-когерентным и диффузным типами отражения атомов от антирелаксационных покрытий торцевых стенок.

## **Личный вклад автора**

Все теоретические результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Выбор общего направления исследований, постановка задач и их обсуждение осуществлялись совместно с научным руководителем и коллективом научной группы «Оптическая спектроскопия квантовых систем» СПбПУ Петра Великого.

## **Апробация работы**

Результаты работы были доложены на следующих конференциях:

17-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Физика ультрахолодных атомов – 2023", Новосибирск, 2023; 30я Международная конференция Advanced Laser Technologies (ALT'23), Самара, 2023; I Самарцевские Чтения (ФЭКС/IWQO-2023), Светлогорск, 2023; The International Summer Conference on Theoretical Physics, Долгопрудный, 2023; XIX Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике. Иркутск, 2023; 16-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Физика ультрахолодных атомов – 2022", Новосибирск, 2022; XXVI молодежная научная школа "когерентная оптика и оптическая спектроскопия", Казань, 2022; XVIII International Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Doped with Rare Earth and Transition Metal Ions (IFS-2022), Москва, 2022; 20th International Conference Laser Optics (ICLO), Санкт-Петербург, 2022; XI семинар Д.Н.Клышко, Москва, 2022; XVIII молодежная конференция с международным участием по люминесценции и лазерной физике. Иркутск, 2021; IX International Symposium «Modern problems of laser physics» (MPLP-2021), Новосибирск, 2021; XXIII Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань, 2019; Юбилейная международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске, Иркутск, 2019; The VIII International Symposium «Modern problems of laser physics» MPLP-2018, Казань, 2018; XVI Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 100-летию Иркутского государственного университета, Иркутск, 2018; International Conference Laser Optics 2018 (ICLO 2018), Санкт-Петербург, 2018

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 15 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК. Список работ приведен в конце автореферата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК», гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук, Российского научного фонда, Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания (базовая часть), Фонда развития

теоретической физики и математики «БАЗИС». Ряд результатов был получен с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.spbstu.ru>).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена построению полуклассической теории взаимодействия бихроматического излучения с резонансными средами щелочных атомов посредством  $\Lambda$ -схемы. При этом внешнее излучение описывается как классическая электромагнитная волна, вектор напряженности электрического поля которой записывается в виде

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_1(z, t)e^{-i(\omega_1 t - k_1 z)} + \mathbf{E}_2(z, t)e^{-i(\omega_2 t - k_2 z)} + \text{к.с.}, \quad (1)$$

где  $\omega_j, k_j$  — частоты и волновые числа двух частотных компонент волны,  $E_j$  — комплексные амплитуды соответствующих составляющих волны ( $j = 1, 2$ ). Здесь «к.с.» обозначает комплексное сопряжение предыдущего выражения.

Состояние атомного ансамбля описывается методом одночастичной матрицы плотности в представлении Вигнера по поступательным степеням свободы атомов  $\hat{\rho}(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t)$ , которая удовлетворяет следующему квантовому кинетическому уравнению:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \nabla \right) \hat{\rho}(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t) = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t)] + \hat{R} \{ \hat{\rho}(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t) \} + \hat{S} \{ \hat{\rho}(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t) \}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса атома,  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  — импульс поступательного движения атома,  $\hat{H}$  — гамильтониан системы,  $\hat{R}$  — супероператор, феноменологически учитывающий спонтанную релаксацию атомов,  $\hat{S}$  — супероператор интегралов столкновений.



В разделе 1.1 приводится вывод уравнений для элементов матрицы плотности с учетом движения активных атомов. Для описания поведения атома щелочного металла в лазерном поле используется четырехуровневая модель атома (рис. 1), в которой два основных состояния  $|g\rangle, g=1,2$  соответствуют сверхтонкому расщеплению s-состояния, а два возбужденных  $|e\rangle, e=3,4$  сверхтонкому расщеплению p-состояния. В п.1.1.1 приводится вывод уравнений для случая наличия буферного газа. Столкновения активных атомов с атомами буферного газа учитываются посредством интегралов столкновений в (2), которые находятся в модели сильных столкновений [19]. В п.1.1.2 получены уравнения для матрицы плотности движущихся атомов в отсутствие буферного газа, но с учетом столкновений с торцевыми стенками газовой ячейки. Решая задачу в приближении слабого пробного поля, соответствующего схеме детектирования резонанса ЭИП, удается получить замкнутое аналитическое решение для произвольных граничных условий на стенках.

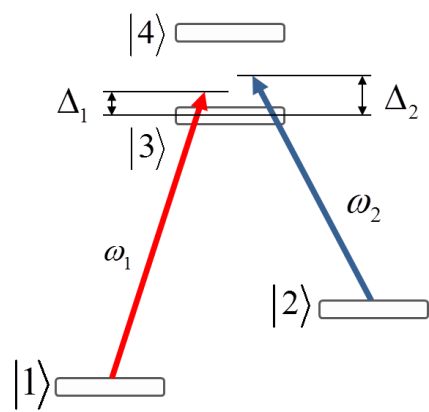


Рис. 1. Четырехуровневая схема взаимодействия атома с двухчастотным полем.

В разделе 1.2 описываются граничные условия для некоторых известных [8] моделей отражения атомов от стенок ячейки:

- 1) Зеркально-некогерентное отражение, при котором столкновения не приводят к длительной адсорбции, но сопровождаются большим фазовым сдвигом. Такой характер отражения имеет место для некоторых типов силиконовых поверхностей (п.1.2.1).
- 2) Зеркально-когерентное отражение, при котором атомы полностью сохраняют внутреннее состояние, упруго отражаясь от поверхности. Данный тип наблюдается у покрытий с малым временем адсорбции (п.1.2.2).
- 3) Диффузное отражение, при котором атомы, сталкиваясь с поверхностью, адсорбируются на ней на относительно продолжительное время, но не теряют своего внутреннего состояния. Такой тип отражения характерен для парафиновых покрытий (п.1.2.3) [A7].

В каждой из этих моделей найдены константы общего решения, полученного в п.1.1.2.

В разделе 1.3 на основе классического волнового уравнения приведен вывод уравнений распространения двухчастотного электромагнитного поля через

резонансную оптически плотную среду четырехуровневых атомов. На основе полученного уравнения произведена оценка характерного сечения рассеяния атомом электромагнитной волны.

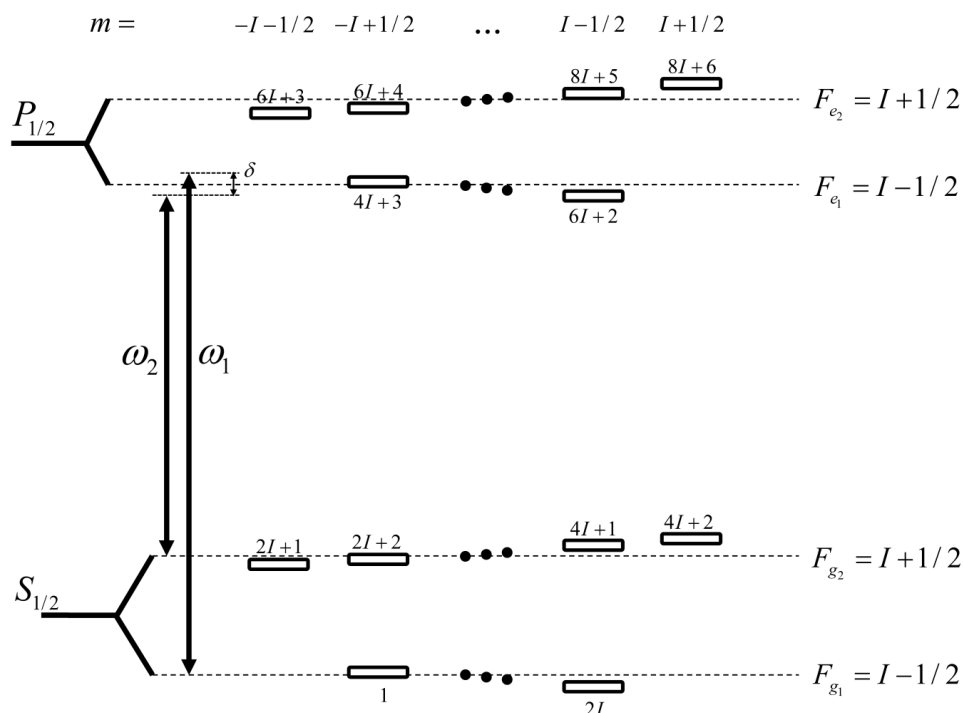


Рис. 2. Схема возбуждения уровней D1-линии щелочного атома невырожденных по проекции полного момента. Здесь  $I$  — значение спина ядра,  $F_n$  — значение полного момента атома в состоянии  $|n\rangle$ .

В разделе 1.4 производится вывод уравнений для элементов матрицы плотности щелочных атомов с учетом полной невырожденности их магнитной структуры (рис. 2) и произвольной поляризации лазерного излучения.

Во **второй** главе приводятся и обсуждаются результаты численных расчетов резонансных контуров КПН, детектируемых методом импульсного возбуждения Рэмси, выполненные на основе теории, приведенной в главе 1 для модельной четырехуровневой схемы возбуждения. В разделе 2.1 приводится описание схемы Рэмси, рассматриваемой в данной работе, а именно случая двух прямоугольных импульсов (рис. 3). В разделе 2.2 рассматриваются результаты, полученные на основе теории, построенной в разделах 1.1 и 1.3, в пределе нулевой температуры.

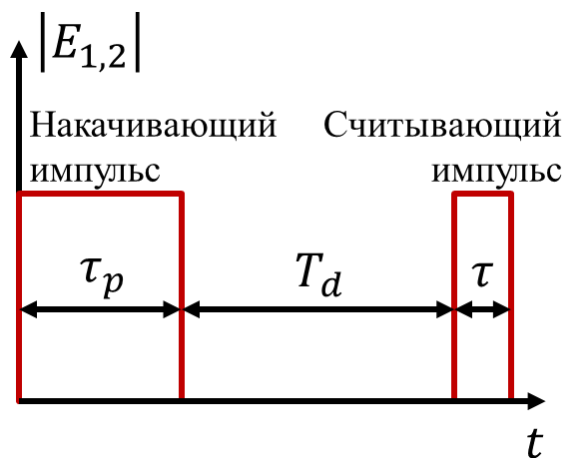


Рис. 3. Последовательность лазерных импульсов при схеме опроса Рэмси.

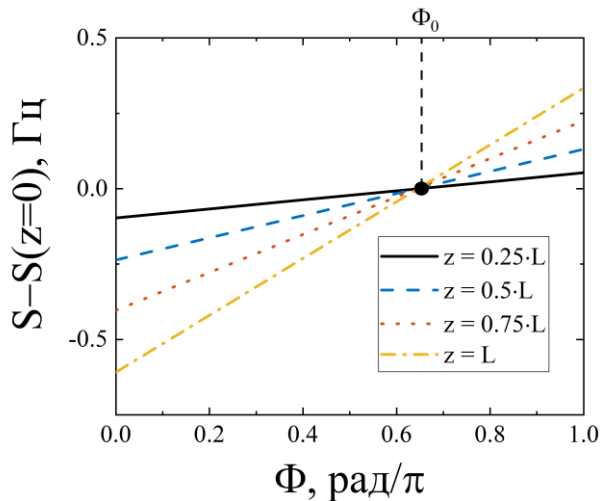


Рис. 4. Зависимость величины светового сдвига  $S$  относительно положения резонанса в оптически тонкой среде от начальной разности фаз входных полей  $\Phi$  на считывающем импульсе для различных значений оптической толщины.

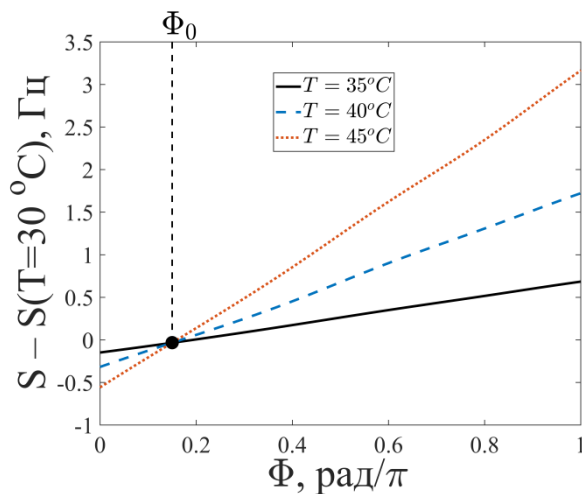


Рис. 5. Зависимость величины светового сдвига  $S$  относительно положения резонанса при температуре  $T = 30^\circ\text{C}$  от начальной разности фаз входных полей на считывающем импульсе для различных температур.

определяется температурным уширением дисперсионного контура [A2, A12, A13]. В п. 2.2.2 производится анализ резонансов КПН Рэмси, детектируемых по интенсивности прошедшего сквозь ячейку излучения, с совместным учетом оптической плотности и температуры атомной среды. Исследуются зависимости формы и сдвигов резонансов от температуры среды, частоты сверхтонкого расщепления возбужденного состояния, концентрации буферного газа, частот Раби внешнего излучения, длительности темновой

Производится анализ зависимости формы и сдвигов резонансов КПН Рэмси, детектируемых в оптически тонкой среде, от величин матричных элементов оператора дипольного момента атомных переходов, частоты сверхтонкого расщепления возбужденного состояния, длительности темновой паузы и частот Раби внешнего излучения. В разделе 2.2 производится анализ аналогичных результатов, полученных для оптически плотной среды «холодных» атомов. В частности, показана возможность подбора определенной начальной разности фаз  $\Phi_0$  между частотными компонентами считывающего импульса, при которой частотный сдвиг центрального резонанса КПН Рэмси оказывается независимым от оптической толщины среды (рис. 4) [A1, A9–A11]. В разделе 2.3 анализируется поведение резонансов КПН Рэмси, детектируемых газовых ячейках при ненулевой температуре. В п. 2.2.1 исследуются случаи оптически тонких сред, имеющих относительно низкие ( $0.001 - 1\text{ K}$ ) и высокие ( $30-60^\circ\text{C}$ ) температуры. Показано, что поведение зависимости светового сдвига от температуры

паузы и начальной разности фаз  $\Phi$  между частотными составляющими считывающего импульса [A3, A13, A14]. Показано, что в оптически плотной среде эффект фазовой компенсации зависимости светового сдвига от оптической толщины обнаруженный в разделе 2.2 проявляется, как подавление зависимости сдвига центрального резонанса от температуры (рис. 5). В разделе 2.4 выполняется сравнение предсказаний теории, представленной в разделах 1.1 и 1.3, с экспериментальными данными и показывается наличие качественного согласия результатов.

В **третьей главе** приводятся результаты численного моделирования процесса возбуждения резонансов КПН Рэмси с учетом магнитной структуры уровней D1-линии атомов  $^{87}\text{Rb}$  и векторного характера электромагнитного поля на основе теории, построенной в разделе 1.4. В разделе 3.1 анализируется зависимость формы спектра резонансов КПН Рэмси от величины приложенного магнитного поля и эллиптичности внешнего лазерного излучения в различных конфигурациях его поляризаций. Показано, что изменение амплитуды резонансов с увеличением магнитного поля имеет немонотонный характер. Данный эффект объясняется деструктивной интерференцией различных каналов импульсного возбуждения резонанса КПН в D1-линии. В разделе 3.2 анализируется поведение светового сдвига центрального резонанса Рэмси при изменении приложенного магнитного поля и эллиптичности лазерного излучения. Показана возможность подавления зависимости светового сдвига от температуры подбором определенного значения магнитного поля. Также обнаружено, что зависимость сдвига от эллиптичности излучения является немонотонной и имеет экстремумы при определенных значениях параметра эллиптичности (рис. 6). Данный эффект обусловлен изотропностью системы в поперечной лазерному лучу плоскости [A8]. В разделе 3.3 производится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Показано наличие качественного согласия результатов.

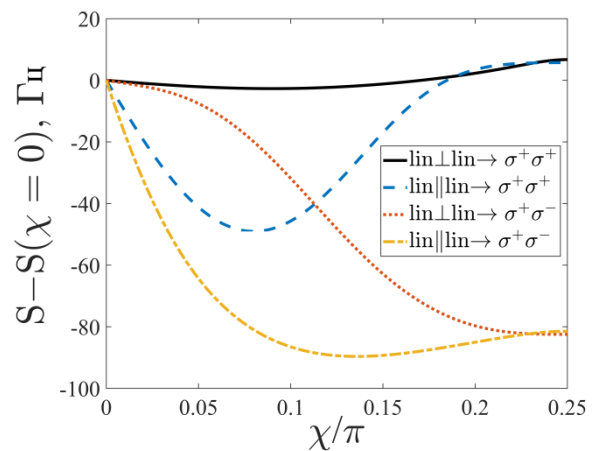


Рис. 6. Зависимость сдвига центрального резонанса КПН, детектируемого методом Рэмси, от параметра эллиптичности при переходе от параллельных поляризаций к различным конфигурациям циркулярных поляризаций.

В **четвертой главе** на основе теории, изложенной в разделе 1.4, исследуется влияние столкновений активных атомов с торцевыми стенками ячейки на характер эффекта ЭИП. При этом используется четырехуровневая модель атомов, учитывающая сверхтонкое расщепление возбужденного состояния.

В разделе 4.1 на основе анализа известного [24] аналитического выражения для восприимчивости единицы фазового объема безграничной во всех направлениях среды к пробному полю предлагается седующее физическое объяснение различия стоксова и антистоксова каналов рассеяния пробного излучения при детектировании ЭИП в среде движущихся атомов [A4]. Действие связывающего поля на атомный переход приводит к расщеплению возбужденного состояния на два «одетых» состояния. В скоростных группах атомов, для которых отстройка связывающего поля велика по сравнению с его частотой Раби, частота одного из одетых состояний оказывается близка к частоте нерасщепленного уровня и смещена на малую величину, определяемую остаточным доплеровским сдвигом  $q\nu$ , где  $q$  - разность между волновыми числами связывающего и пробного полей. В случае  $q > 0$  (стоксов канал) существует скоростная группа атомов, для которой частота одного из одетых состояний совпадает с частотой темного резонанса, детектируемого пробным излучением. Данные атомы возбуждаются в одетое состояние, и в результате резонансное поглощение пробного излучения усиливается.

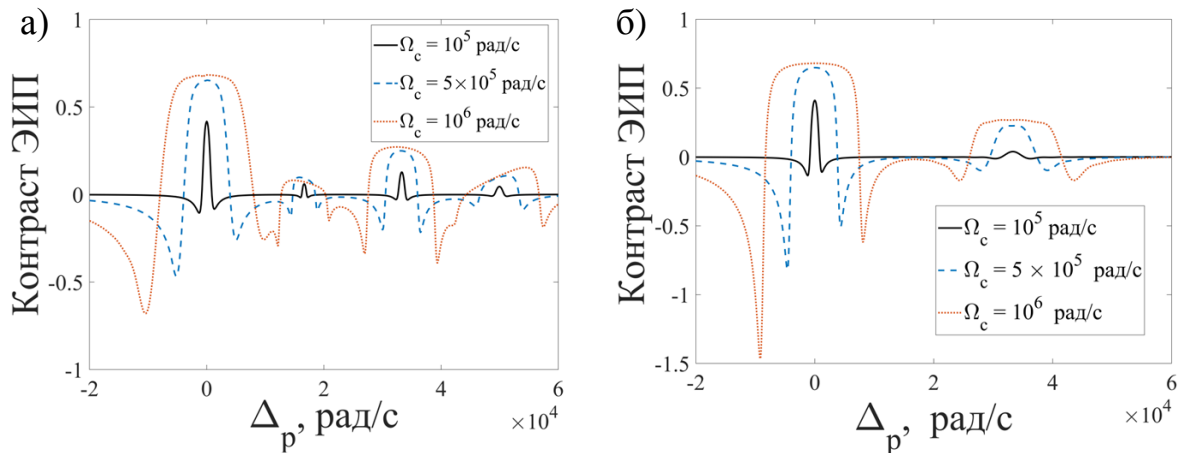


Рис. 7. Зависимость контраста резонансов прозрачности от отстройки пробного поля при различных частотах Раби связывающего поля  $\Omega_c$  для зеркально-когерентного (а) и для диффузного (б) типов отражения атомов от стенок. Длины ячейки:  $L = \lambda_{12}$  (а) и  $L = 10\lambda_{12}$  (б), где  $\lambda_{12}$  — длина волны сверхтонкого расщепления основного состояния.

В разделе 4.2 анализируются результаты, полученные в модели зеркально-когерентного отражения атомов от торцевых стенок ячейки. Показано, что невырожденность возбужденного состояния приводит к появлению дополнительных пиков в спектре поглощения пробного излучения как в случае зеркально-когерентного (рис. 7 (а)), так и в случае диффузного (рис. 7 (б)) типов отражения атомов от стенок. Кроме того, наличие дополнительного сверхтонкого уровня в возбужденном состоянии приводит к искажению формы основного резонанса. При этом тем сильнее, чем больше амплитуда связывающего поля. Также приводится сравнение используемого аналитического решения с численным решением полной системы уравнений для матрицы плотности. Демонстрируется удовлетворительное согласие

результатов с относительной ошибкой менее 0.1%. В разделе 4.3 приводятся результаты расчетов в модели диффузного отражения атомов от стенок. Обнаружено, что в ячейках определенных длин атомы проявляют свойства зеркально-некогерентного отражения. В этих случаях выражение для восприимчивости среды принимает особо простой вид [A5, A15].

В разделе 4.4 производится сравнение спектров ЭИП, полученных в моделях зеркально-когерентного и диффузного отражений. Из рис. 7 видно, что ширина и амплитуда резонанса ЭИП растут вместе с амплитудой связывающего поля и в модели диффузного, и в модели зеркально-когерентного отражения. Для ячеек длиной порядка длины волны сверхтонкого расщепления основного состояния  $\lambda_{12}$  (рис. 8(а)) формы резонансов при зеркальном и диффузном отражениях слабо отличаются. Это объясняется тем, что пространственные осцилляции возбуждаемой низкочастотной когерентности  $\rho_{12}$  усредняются по ячейке и вклад в общий коэффициент поглощения вносит только их среднее значение, которое одинаково для обоих характеров отражения. В малых же, по сравнению с  $\lambda_{12}$ , ячейках (рис. 8(б)) отличие между диффузным и зеркальным отражениями сказывается значительно сильнее, поскольку низкочастотная когерентность не успевает совершить полный период осцилляций за время пролета атома между стенками и усреднение по ячейке приводит к различным средним  $\rho_{12}$ . В таком случае резонанс прозрачности демонстрирует двойную структуру, испытывая дополнительное сужение в центральной области вследствие эффекта Дике [A6]. В разделе 2.5 выполняется сравнение предсказаний теории, представленной в разделе 1.2, с экспериментальными данными и показывается наличие качественного согласия результатов.

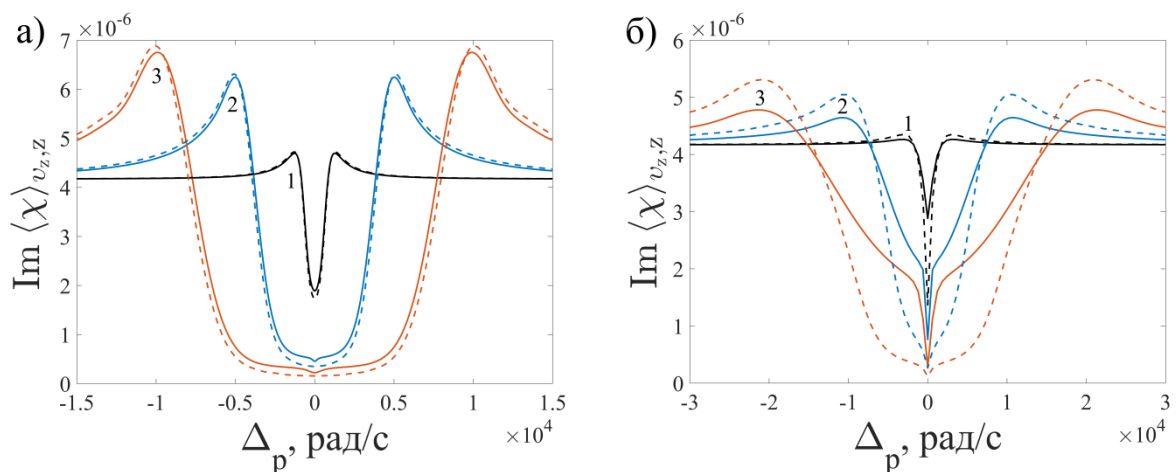


Рис. 8. Спектры поглощения пробного излучения для случаев диффузного (сплошные кривые) и зеркально-когерентного (пунктирные кривые) характеров отражения атомов от стенок в относительных единицах при различных частотах Раби связывающего поля  $\Omega_c$  : 1 —  $\Omega_c = 10^5$  рад/с, 2 —  $\Omega_c = 5 \cdot 10^5$  рад/с, 3 —  $\Omega_c = 10^6$  рад/с. Длины ячеек:  $L = \lambda_{12}$  (а) и  $L = 0.1\lambda_{12}$  (б).



**В заключении** обобщены основные результаты работы:

1. Построены математические модели возникновения темных резонансов в средах, имеющих ненулевую температуру, ненулевую оптическую плотность, конечные размеры в продольном лазерном лучу направлении, а также разрешенную магнитную структуру уровней.
2. Получены уравнения, описывающие эволюцию состояния рассматриваемых атомных сред, и уравнения переноса бихроматического излучения сквозь них.
3. Проведен расчет линий резонансов когерентного пленения населенностей, детектируемых методом импульсного возбуждения, и резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности, детектируемых непрерывным излучением, при различных параметрах лазерной накачки и атомной среды.
4. Показано существование определенной разности фаз между опрашивающими лазерными полями, при которой сдвиг центрального резонанса Рэмси не зависит от длины ячейки в случае оптически плотной среды неподвижных атомов.
5. Показано, что при определенных условиях различные каналы импульсного возбуждения резонансов когерентного пленения населенностей способны интерферировать, что проявляется как немонотонное изменение амплитуд резонансов при увеличении величины приложенного магнитного поля или параметра эллиптичности.
6. Предложено физическое обоснование различия стоксова и антистоксова каналов рассеяния пробного излучения при детектировании резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности
7. Показано, что при наблюдении эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности в ячейках конечных продольных размеров без буферного газа в спектре поглощения пробного излучения могут возникать дополнительные резонансы прозрачности.
8. Обнаружено, что в случае, если длина ячейки больше или порядка длины волны расщепления основного состояния атомов, то исчезают различия в форме резонансов при изменении типа отражения от антирелаксационных покрытий торцевых стенок.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях.

Статьи в рецензируемых журналах:

- A1. Волошин, Г. В. Влияние сверхтонкой структуры возбужденного уровня на форму резонанса когерентного пленения населенностей при рамсеевской схеме опроса в оптически плотной среде / Г. В. Волошин, К. А. Баранцев, Е. Н. Попов, А. Н. Литвинов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2019. — Т. 156. — № 1 (7). — С. 5-13.
- A2. Волошин, Г. В. Влияние столкновений на форму резонанса когерентного пленения населенностей, детектируемого методом Рэмси / Г. В. Волошин, К. А. Баранцев, А. Н. Литвинов // Квантовая электроника. — 2020. — Т. 50. — № 11. — С. 1023-1028.
- A3. Волошин, Г. В. Форма линии и световой сдвиг резонанса когерентного пленения населенностей, детектируемого методом Рэмси в "горячих" атомах в оптически плотной среде / Г. В. Волошин, К. А. Баранцев, А. Н. Литвинов // Квантовая электроника. — 2022. — Т. 52. — № 2. — С. 108-115.
- A4. Волошин, Г. В. Влияние качества антирелаксационного покрытия на характер эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности в газовых ячейках / Г. В. Волошин, М. Хуэй, А. С. Курапцев, И. М. Соколов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2022. — Т. 162. — № 3. — С. 313-321.
- A5. Волошин, Г. В. Влияние столкновений на характер эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности в ячейках конечных размеров с антирелаксационным покрытием стенок / Г. В. Волошин // Оптика и спектроскопия. — 2023. — Т. 131. — № 1. — С. 49-57.
- A6. Волошин, Г. В. Электромагнитно-индуцированная прозрачность в ячейках конечных размеров с антирелаксационным покрытием стенок / Г. В. Волошин // Оптика и спектроскопия. 2023. — Т. 131. — № 5. — С. 575-582.
- A7. Баранцев, К. А. Форма спектра и световой сдвиг резонанса когерентного пленения населенностей в ячейках с антирелаксационным покрытием стенок в моделях зеркального и диффузного отражения / К. А. Баранцев, Г. В. Волошин, А. С. Курапцев, А. Н. Литвинов, И. М. Соколов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — Т. 163. — № 2. — С. 162-171.
- A8. Волошин, Г. В. Эффекты интерференции различных каналов импульсного возбуждения резонансов когерентного пленения населенностей в ячейках с парами щелочного металла и буферным газом / Г. В. Волошин, К. А. Баранцев, А. Н. Литвинов // Журнал



экспериментальной и теоретической физики. — 2024. — Т. 165. — № 5. — С. 1-11.

Публикации в сборниках трудов конференций:

A9. Voloshin, G. V. Compensation of the light shifts of the resonance of the coherent population trapping under the Ramsey response scheme in an optically dense medium / G. V. Voloshin, K. A. Barantsev, E. N. Popov, A. N. Litvinov // В книге: MODERN PROBLEMS OF LASER PHYSICS. The VIII International Symposium MPLP-2018. — 2018. — С. 156.

A10. Баранцев, К. А. Влияние оптически плотной среды на форму резонанса когерентного пленения населенностей, детектируемого методом Рэмси / К. А. Баранцев, Г. В. Волошин, А. Н. Литвинов, Е. Н. Попов, А. С. Курапцев // В книге: XVI Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 100-летию Иркутского государственного университета. Тезисы лекций и докладов. — 2018. — С. 27-28.

A11. Barantsev, K. A. Ramsey signal of coherent population trapping resonance in optically dense atomic cloud / K. A. Barantsev, A. N. Litvinov, G. V. Voloshin, E. N. Popov // В сборнике: Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018. — 2018. — С. 369.

A12. Волошин, Г. В. Влияние температуры на форму Рамсеевского резонанса когерентного пленения населенностей / Г. В. Волошин, К. А. Баранцев, А. Н. Литвинов // В книге: Материалы Юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске. — 2019. — С. 22-23.

A13. Волошин, Г. В. Влияние температуры на форму и сдвиги резонансов когерентного пленения населенности, детектируемых методом Рэмси, в оптически плотной среде / Г. В. Волошин, А. Н. Литвинов, К. А. Баранцев // В книге: Материалы XVIII молодежной конференции с международным участием по люминесценции и лазерной физике. — Иркутск, 2021. — С. 35.

A14. Voloshin, G. V. Optical properties of optically dense medium of alkali atoms having a nonzero temperature under conditions of coherent population trapping resonance detected by the Ramsey method / G. V. Voloshin, A. N. Litvinov, K. A. Barantsev, A. S. Kuraptsev // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). — IEEE, 2022. — С. 1-1

A15. Волошин, Г. В. Влияние столкновений на характер эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности в ячейках конечных продольных размеров с антирелаксационными покрытиями стенок / Г. В. Волошин, М. Хуэй, И. М. Соколов, А. С. Курапцев // В книге: Материалы XIX Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике. — Иркутск, 2023. — С. 55

## Список литературы

1. Alzetta, G. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour / G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, G. Orriols // *Il Nuovo Cimento B* (1971–1996). — 1976. — Т. 36, № 1. — С. 5–20.
2. Arimondo, E. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping / E. Arimondo, G. Orriols // *Lettere al Nuovo Cimento* (1971–1985). — 1976. — Т. 17, № 10. — С. 333–338.
3. Gray, H. R. Coherent trapping of atomic populations / H. R. Gray, R. M. Whitley, C. R. Stroud // *Optics Letters*. — 1978. — Т. 3, № 6. — С. 218–220.
4. Hemmer, P. R. Stabilization of a microwave oscillator using a resonance Raman transition in a sodium beam / P. R. Hemmer, S. Ezekiel, C. C. Leiby // *Optics Letters*. — 1983. — Т. 8, № 8. — С. 440–442.
5. Vanier, J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review / J. Vanier // *Applied Physics B*. — 2005. — Т. 81, № 4. — С. 421–442.
6. Игнатович, С. М. Исследования параметров резонанса когерентного пленения населенностей и полевых сдвигов при регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами / С. М. Игнатович, М. Н. Скворцов, И. С. Месенцова, Н. Л. Квашнин, В. И. Вишняков, Д. В. Бражников, Д. Е. Тарасенко // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2023. — Т. 164. — № 2. — С. 214–222.
7. Scully, M. O. Fleischhauer M. High-sensitivity magnetometer based on index-enhanced media / M. O. Scully, M. Fleischhauer // *Physical review letters*. — 1992. — Т. 69. — № 9. — С. 1360.
8. Stähler, M. Picotesla magnetometry with coherent dark states / M. Stähler, S. Knappe, C. Affolderbach, W. Kemp, R. Wynands // *Europhysics Letters*. — 2001. — Т. 54. — № 3. — С. 323.
9. Pati, G. Single-shot vector magnetic measurements using synchronous coherent population trapping resonance in a feedback compensation system / G. Pati, R. Tripathi, M. Pulido // *Journal of Applied Physics*. — 2023. — Т. 134. — № 18. — С. 184402
10. Кочаровская, О. А. Когерентное усиление ультракороткого импульса в трехуровневой среде без инверсии населенностей / О. А. Кочаровская, Я. И. Ханин // *Письма в ЖЭТФ*. — 1988. — Т. 48, № 11. — С. 581–584.
11. Harris, S. E. Lasers without inversion: Interference of lifetime-broadened resonances / S. E. Harris // *Physical review letters*. — 1989. — Т. 62, № 9. — С. 1033.

12. Talker E. Inversionless gain in a lossy medium / E. Talker, Y. Barash, N. Mazurski, U. Levy // *Physical Review Applied*. — 2023. — Т. 20. — №. 1. — С. 014007.
13. Горный, М. Б. Когерентное пленение населенностей в оптически плотной среде / М. Б. Горный, Б. Г. Матисов, Ю. В. Рождественский // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 1989. — Т. 95. — С. 1263.
14. Попов, А. К. Введение в нелинейную спектроскопию / А. К. Попов; отв. ред. С. Г. Раутиан. — Новосибирск: Наука: Сибир. отделение, 1983. — 274 с.
15. Тайченачев, А. В. О влиянии движения атомов на форму двухфотонного резонанса в газе / А. В. Тайченачев, А. М. Тумайкин, В. И. Юдин // *Письма в ЖЭТФ*. — 2000. — Т. 72, № 3. — С. 173.
16. Aspect, A. Laser cooling below the one-photon recoil energy by velocity-selective coherent population trapping / A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser и др. // *Physical Review Letters*. — 1988. — Т. 61, № 7. — С. 826.
17. Diedrich, F. Laser cooling to the zero-point energy of motion / F. Diedrich, J. Bergquist, W. M. Itano, D. Wineland // *Physical review letters*. — 1989 — Т. 62, № 4. — С. 403.
18. Крысенко, Д. С. Охлаждение иона иттербия-171 в полихроматическом поле / Д. С. Крысенко, О. Н. Прудников // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2023. — Т. 137. — №. 2. — С. 273-281.
19. Агапьев, Б. Д. Особенности радиооптического резонанса в ячейках с покрытием / Б. Д. Агапьев, М. Б. Горный, Б. Г. Матисов // *Журнал технической физики*. — 1988. — Т. 58, № 12. — С. 2286–2292.
20. Firstenberg, O. Theory of Dicke narrowing in coherent population trapping / O. Firstenberg, M. Shuker, A. Ben-Kish, D. Fredkin, N. Davidson, A. Ron // *Physical Review A*. — 2007. — Т. 76, № 1. — С. 013818.
21. Harris, S. E. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency / S. E. Harris, J. Field, A. Imamoglu // *Physical Review Letters*. — 1990. — Т. 64, № 10. — С. 1107.
22. Hahn, K. Nonlinear generation of 104.8 nm radiation within an absorption window in zinc / K. Hahn, D. King, S. Harris // *Physical review letters*. — 1990. — Т. 65, № 22. — С. 2777.
23. Boller, K. J. Observation of electromagnetically induced transparency / K. J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris // *Physical Review Letters*. — 1991. — Т. 66, № 20. — С. 2593.
24. Gea-Banacloche, J. Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: Theory and experiment / J. Gea-Banacloche, Y.-q. Li, S.-z. Jin, M. Xiao // *Physical Review A*. — 1995. — Т. 51, № 1. — С. 576.

25. Lukin, M. Colloquium: Trapping and manipulating photon states in atomic ensembles / M. Lukin // *Reviews of Modern Physics*. — 2003. — T. 75, № 2. — C. 457.
26. Hau, L. V. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas / L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, C. H. Behroozi // *Nature*. — 1999. — T. 397, № 6720. — C. 594–598.
27. Ramsey, N. F. A new molecular beam resonance method / N. F. Ramsey // *Physical Review*. — 1949. — T. 76, № 7. — C. 996.
28. Mlynek, J. High-resolution coherence spectroscopy using pulse trains / J. Mlynek, W. Lange, H. Harde // *Physical Review A*. — 1981. — T. 24. — №. 2. — C. 1099.
29. Chuchelov D. S. et al. Contrast of Ramsey-CPT Fringes in Quenching and Depolarizing Gases / D. S. Chuchelov, M. I. Vaskovskaya, E. A. Tsygankov, S. A. Zibrov, K. M. Sabakar, V. V. Vassiliev, V. L. Velichansky // *JETP Letters*. — 2023. — C. 1-4.
30. Abdel Hafiz, M. Symmetric autobalanced Ramsey interrogation for high-performance coherent-population-trapping vapor-cell atomic clock / M. Abdel Hafiz, G. Coget, M. Petersen, C. Calosso, S. Guérandel, E. de Clercq, R. Boudot // *Applied Physics Letters*. — 2018. — T. 112, № 24.
31. Shuker, M. Ramsey spectroscopy with displaced frequency jumps / M. Shuker, J. W. Pollock, R. Boudot, V. I. Yudin, A. V. Taichenachev, J. Kitching, E. A. Donley // *Physical Review Letters*. — 2019. — T. 122. — №. 11. — C. 113601.
32. Basalaev, M. Y. Generalized Ramsey methods in the spectroscopy of coherent-population-trapping resonances / M. Y. Basalaev, V. I. Yudin, D. V. Kovalenko, T. Zanon-Willette, A. V. Taichenachev // *Physical Review A*. — 2020. — T. 102. — №. 1. — C. 013511.
33. Smirnov, V. S. Stationary coherent states of atoms in resonant interaction with elliptically polarized light. Coherent trapping of populations (general theory). / V. S. Smirnov, A. M. Tumaikin, and V. I. Yudin // *Zh. Eksp. Teoret. Fiz.* — 1989. — T. 69. — C. 913.
34. Vanier, J. Coherent population trapping in cesium: Dark lines and coherent microwave emission / J. Vanier, A. Godone, F. Levi // *Physical review A*. — 1998. — T. 58. — №. 3. — C. 2345.
35. Taichenachev, A. V. Theory of dark resonances for alkali-metal vapors in a buffer-gas cell / A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, R. Wynands, M. Stähler, J. Kitching, L. Hollberg // *Physical review A*. — 2003. — T. 67. — №. 3. — C. 033810.