

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе по научной работе,

доктор физ.-мат. наук П.Н. Брунков



« 4 » июля 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук
на диссертационную работу Волошина Гавриила Валентиновича
«Оптические свойства щелочных атомов в условиях нестационарных
и неоднородных темных резонансов»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Актуальность работы.

Исследование свойств нелинейных оптических резонансов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с атомами щелочных металлов, представляет собой важную задачу в области спектроскопии и нелинейной оптики. Особый научный и практический интерес в последнее время вызывает явление темного резонанса, заключающееся в ослаблении резонансного взаимодействия бихроматического лазерного излучения с атомами в узком диапазоне частот. В работах по исследованию темных резонансов часто выделяют два родственных явления: когерентное пленение населенностей (КПН) и электромагнитно-индуцированная прозрачность (ЭИП). Оба этих явления возникают вследствие возникновения в системе темного состояния, слабо взаимодействующего с одной или двумя частотными компонентами резонансного излучения. Особенностью резонансов КПН и ЭИП является крайне узкая ширина при возможности достижения высокой амплитуды, что позволяет использовать данные явления в различных практических областях. Так, например, резонанс КПН активно используется в качестве основы работы атомных стандартов частоты, а особенности дисперсии в условиях резонанса ЭИП применяются в устройствах оптической квантовой

памяти. Несмотря на то, что данные явления на сегодняшний день имеют соответствующие теоретические методы описания, многие факторы, часто имеющие место в экспериментах, до сих пор не были учтены совместно. К таким факторам автор относит оптическую плотность среды, движение атомов, разрешенную сверхтонкую и магнитную структуру атомных уровней, столкновения атомов друг с другом и со стенками, имеющими специальные антирелаксационными покрытия. Изучение совместного влияния различных комбинаций этих факторов на процессы непрерывного и импульсного возбуждения темных резонансов является важной научной задачей, позволяющей получить более детальное понимание физических процессов происходящих при формировании резонансов КПН и ЭИП и предложить новые перспективные подходы к улучшению работы соответствующих устройств. Изучению данных вопросов посвящена диссертационная работа Г.В. Волошина.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в построении ряда математических моделей возбуждения темных резонансов, обобщающих известные ранее теоретические подходы. В частности, в работе построены модели возникновения резонансов КПН в оптически плотной среде резонансных атомов и буферного газа с учетом сверхтонкой структуры уровней активных атомов, а также в оптически тонкой среде активных атомов и буферного газа с учетом полной магнитной структуры уровней. Также в работе построена модель описания резонансов ЭИП, детектируемых в ячейках без буферного газа с учетом столкновений с торцевыми стенками ячейки. Учет различных граничных условий на стенках позволяет проанализировать влияние типа покрытия стенок на свойства детектируемых резонансов.

На основе построенных моделей в работе предсказан ряд новых эффектов, имеющих практический интерес. Одним из них является эффект фазовой компенсации сдвига резонансов КПН, детектируемых импульсным излучением, от толщины среды и температуры. Проблема сдвига резонансов является одним из ключевых факторов, негативным образом влияющих на точность атомных стандартов частоты, работающих на основе эффекта КПН. Другим важным результатом является предсказание существования определенных поляризационных конфигураций, при которых сдвиг центрального резонанса КПН менее всего чувствителен к изменению параметра эллиптичности возбуждающего излучения. Данные эффекты могут быть потенциально использованы для улучшения стабильности соответствующих атомных стандартов частоты.

Достоверность выводов и научных положений

Достоверность полученных автором результатов подтверждается наличием качественного согласия с экспериментальными данными, цитированными из других исследований, а также публикациями в рецензируемых научных журналах и сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Структура диссертации

Диссертация содержит 151 страницу, включает 48 рисунков, 1 таблицу, и состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 138 наименований.

Введение содержит обоснования актуальности, научной новизны, фундаментальной и практической значимости исследования. Во введении сделан обзор литературы по теме исследования, сформулированы цели и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит описание используемых в работе математических моделей взаимодействия двухчастотного лазерного излучения с резонансными средами щелочных атомов. Для построения данных моделей автор использует полуклассический подход, основанный на описании состояния атомного ансамбля посредством вигнеровской матрицы плотности. В данной главе отдельно рассматриваются случаи наличия и отсутствия буферного газа в атомной ячейке. В последнем случае, используя приближение слабого пробного поля, получено аналитическое выражение, описывающее форму резонансов ЭИП, детектируемых непрерывным излучением, для произвольного типа отражения атомов от торцевых стенок ячейки.

Глава 2 посвящена анализу и обсуждению результатов расчетов форм резонансов КПН, детектируемых импульсным излучением в оптически тонких и плотных средах, с учетом сверхтонкой структуры возбужденного состояния атомов. В главе исследуется влияние различных параметров лазерного возбуждения и атомной среды на форму и сдвиги детектируемых резонансов. В частности, показано, что зависимость сдвигов резонансов от оптической плотности можно подавить путем подбора оптимального значения разности фаз на считывающем импульсе. В завершении главы приводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными и демонстрируется их качественное согласие.

Глава 3 содержит результаты расчетов форм и сдвигов резонансов КПН, детектируемых импульсным излучением, с учетом полной магнитной структуры уровней активных

атомов. Данный подход позволил автору проанализировать влияние на процесс возбуждения поляризации лазерного излучения и величины внешнего магнитного поля. В данной главе подробно анализируется и обсуждается взаимное влияние различных каналов импульсного возбуждения резонансов КПН, возникающих на различных магнитных подуровнях. В результате показано, что рассматриваемые каналы при определенных параметрах испытывают взаимную интерференцию, которая проявляется в немонотонных зависимостях амплитуд резонансов от величины внешнего магнитного поля и параметра эллиптичности лазерного излучения. Также в данной главе показано существование определенных поляризационных конфигураций возбуждающего излучения, при которых сдвиг центрального резонанса минимально чувствителен к изменениям параметра эллиптичности. В конце главы приводятся удовлетворительные сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными.

Глава 4 посвящена анализу зависимостей форм резонансов ЭИП, детектируемых непрерывным излучением в среде без буферного газа с антирелаксационными покрытиями торцевых стенок ячейки, от различных параметров лазерного возбуждения и типа отражения от торцевых стенок. Результаты, представленные в данной главе, в основном опираются на аналитическое решение, полученное в Главе 1. На основе данного решения предложена физическая интерпретация различия стоксова и анти-стоксова каналов рассеяния пробного излучения в терминах «одетых» полей состояний. Показано, что для диффузного и зеркально-когерентного типов отражений атомов от стенок в спектре поглощения пробного излучения могут появляться дополнительные резонансы. Также обнаружено, что форма резонансов значительно зависит от типа отражения атомов от стенок только в ячейках малых длин по сравнению с длиной волны сверхтонкого расщепления основного состояния. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными. Демонстрируется наличие качественного согласия результатов.

В **заключении** суммируются основные итоги работы и приведен перечень основных результатов.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. Работа представляется несколько перенасыщенной данными. Из приведенных многочисленных графиков и текста не всегда понятно, чем именно руководствовался автор при выборе параметров системы в каждом конкретном

- случае. Автору следует пожелать более строго относиться к отбору и систематизации материала.
2. В работе при описании распространения излучения сквозь среду часто используется словосочетание «перенос излучения», однако эффекты, обсуждаемые в работе, скорее относятся к классу нелинейных эффектов просветления среды. Словосочетание «перенос излучения» может ввести читателя в заблуждение.
 3. В тексте диссертации присутствуют жаргонизмы. Например, на странице 8 используется словосочетание «полевые отстройки».
 4. На странице 4 диссертации использовано выражение «матрица гамильтониана», что не совсем корректно. Более точным было бы выражение «"Матричное представление гамильтониана в таком-то базисе».
 5. Использованное на странице 10 диссертации понятие «окно прозрачности» не определено в тексте.
 6. На странице 12 диссертации автор пишет: «зачастую во избежание возникновения паразитных темных состояний на магнитных подуровнях в экспериментах ячейка помещается в ненулевое магнитное поле». Не вполне ясно о каких «паразитных состояниях» идет речь. Более корректно было бы сказать, что магнитное поле прикладывается для разрешения магнитной структуры уровней.
 7. На странице 42 диссертации говорится: «Изменениями амплитуд полей на временах пролета фотоном длины ячейки пренебрегается...» и т.д. Как это соотносится с условием «длина свободного пробега фотонов оказалась меньше или порядка длины ячейки» (стр. 40)?
 8. На странице 76 диссертации подписи к Рис. 2.2.8 (а) и (б) перепутаны местами.
 9. На странице 128 диссертации в пункте 8 Заключения говорится об «исчезновении» различий в форме резонансов. Как следует из предыдущего изложения, вместо «исчезновения» здесь следовало бы говорить о более слабом проявлении.

Сделанные замечания носят в значительной степени рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Волошина Гавриила Валентиновича в целом, можно сделать следующие выводы:

- Тема диссертации актуальна, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решен ряд научных задач по исследованию

- свойств резонансов когерентного пленения населенностей и электромагнитно-индуцированной прозрачности при наличии различных физических факторов;
- Результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;
 - Результаты диссертационного исследования имеют перспективу использования при разработке атомных стандартов частоты нового поколения и устройств оптической квантовой памяти;
 - Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор Волошин Гавриил Валентинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Диссертация была заслушана и обсуждена 27 июня 2024 года на расширенном семинаре лаб. Атомной радиоспектроскопии (зав. лаб. Е.Б. Александров) федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук. На заседании присутствовало 15 специалистов, среди них 4 доктора наук, 6 кандидатов наук, аспиранты, студенты.

Отзыв ведущей организации составлен на основе обсуждения содержания диссертационной работы на семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Отзыв ведущей организации подготовил:

ведущий научный сотрудник лаборатории

Атомной радиоспектроскопии
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, д.ф.-м.н.

Email: antver@mail.ioffe.ru

Вершовский
Антон Константинович

Председатель семинара:

главный научный сотрудник лаборатории

Атомной радиоспектроскопии
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, д.ф.-м.н.

Email: Victor@kart.ioffe.ru

Картошкин
Виктор Арсеньевич

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Петренко М. В., Пазгалеv А. С., Вершовский А. К. Квантовый оптический датчик магнитного поля для систем нейродиагностики нового поколения //Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №. 2. – С. 119-126
2. Vershovskii A. K., Petrenko M. V. Three-Level Approximation upon Calculation of Parameters of Optically Detected Magnetic Resonance under the Conditions of Strong Laser Pumping //Optics and Spectroscopy. – 2021. – Т. 129. – №. 5. – С. 592-596.
3. Petrenko M. V., Pazgalev A. S., Vershovskii A. K. Single-beam all-optical nonzero-field magnetometric sensor for magnetoencephalography applications //Physical Review Applied. – 2021. – Т. 15. – №. 6. – С. 064072.
4. Petrenko M. V., Pazgalev A. S., Vershovskii A. K. Ultimate parameters of an all-optical M X resonance in Cs in ultraweak magnetic field //Physical Review Applied. – 2023. – Т. 20. – №. 3. – С. 034074.
5. Petrenko M. V., Pazgalev A. S., Vershovskii A. K. All-Optical Nonzero-Field Vector Magnetic Sensor for Magnetoencephalography //Physical Review Applied. – 2023. – Т. 20. – №. 2. – С. 024001.
6. Vershovskii A. K., Petrenko M. V. Optical Magnetometric Sensor for Magnetoencephalographic Complexes //Technical Physics Letters. – 2023. – Т. 49. – №. 2. – С. S150-S153.
7. Архипов Р. М. и др. Негармонические пространственные структуры разности населенностей, создаваемые униполярными прямоугольными импульсами в резонансной среде //Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. – №. 11. – С. 1707-1714.
8. Вершовский А. К., Петренко М. В. Перенос частоты оптически детектируемого магнитного резонанса и наблюдение эффекта Ханле в ненулевом магнитном поле //Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 1.
9. Картошкин В. А. Сдвиги частоты магнитного резонанса щелочных атомов в смеси K-Li //Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. – №. 11.
10. Петров В. И., Вершовский А. К. Метод подавления изотопического сдвига в балансном квантовом датчике вращения на эффекте ядерного магнитного резонанса //Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30. – №. 2. – С. 117.

Информация о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru

Факс: (812) 297-1017

Телефон: (812) 297-2245

Сайт: <https://www.ioffe.ru>