

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 специальности 1.3.19 – лазерная физика

Нелинейные явления, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с веществом, представляют особый интерес для лазерной физики и других смежных областей, поскольку с их помощью возможно получение сред с уникальными оптическими свойствами. Особое место занимает явление темных резонансов, заключающееся в появлении узкого окна прозрачности среды, взаимодействующей с двухчастотным лазерным излучением. В зависимости от особенностей детектирования темных резонансов различают два родственных явления: когерентное пленение населенностей (КПН) и электромагнитно-индуцированную прозрачность (ЭИП). Оба этих явления позволяют детектировать узкие по частоте резонансы, открывающие особые возможности управления свойствами лазерного излучения. Таким образом, тема диссертации Волошина Г.В. «Оптические свойства щелочных атомов в условиях нестационарных и неоднородных темных резонансов» соответствует научной специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Актуальность темы диссертации.

Диссертационная работа Волошина Г.В. посвящена теоретическому исследованию резонансов когерентного пленения населенностей (КПН), детектируемых посредством импульсного возбуждения в газовых ячейках с буферным газом, и резонансов электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП), возбуждаемых непрерывным излучением в ячейках без буферного газа с антирелаксационными покрытиями стенок. Актуальность темы исследования связана с широким спектром приложений данных явлений во многих практических областях. Так, например, резонанс КПН лежит в основе многих современных подходов к созданию малогабаритных квантовых стандартов частоты, а резонанс ЭИП часто используется в схемах работы оптической квантовой памяти и метрологии полей микроволнового излучения. Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования Волошина Г.В. не вызывает сомнений. В рамках поставленных задач диссертантом были исследованы: 1) влияние движения, оптической плотности и магнитной структуры уровней атомов активного вещества на процесс импульсного возбуждения резонансов КПН; 2) влияние столкновений с антирелаксационными покрытиями торцевых стенок газовой ячейки на процесс непрерывного возбуждения резонансов ЭИП; 3) возможности улучшения характеристик данных резонансов и подавления зависимостей их сдвигов от различных параметров лазерного возбуждения и атомной среды.

Содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (138 наименований) и одного приложения. Работа изложена на 151 странице, включает 1 таблицу и 48 рисунков.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, дан обзор соответствующей научной литературы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, а также основные положения, выносимые на защиту, аргументирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены данные по апробации работы, личному вкладу диссертанта, объему и структуре диссертации.

В **первой главе** описано построение математической модели взаимодействия двухчастотного резонансного излучения со средами щелочных атомов. Математический формализм основан на полуклассическом методе матрицы плотности в представлении Вигнера. Отдельно рассмотрены случаи присутствия и отсутствия буферного газа, учет сверхтонкой и магнитной структуры атомных уровней, а также случай оптически плотной среды. При описании резонанса ЭИП в ячейках без буферного газа с антирелаксационными покрытиями торцевых стенок найдено аналитическое выражение, описывающее форму резонанса. Во всех остальных случаях получены системы уравнений для матрицы плотности, которые допускают дальнейшие численные решения.

Во **второй главе** приведены результаты численных расчетов формы резонанса КПН, детектируемого методом импульсного возбуждения, в оптически тонкой и плотной среде щелочных атомов при учете сверхтонкой структуры их уровней в присутствии буферного газа. Проанализированы зависимости формы и сдвигов резонансов от величин матричных элементов оператора дипольного момента атомных переходов, частоты сверхтонкого расщепления возбужденного состояния, длительности темновой паузы, частот Раби внешнего излучения, толщины среды и температуры. Показано, что подбором определенных значений начальной разности фаз между двумя частотными компонентами излучения на считывающем импульсе можно подавить зависимости сдвига центрального резонанса от толщины среды и температуры.

В **третьей главе** исследованы резонансы КПН, возбуждаемые импульсным излучением в оптически тонкой среде, при учете невырожденности магнитной структуры активных атомов. Проанализированы зависимости формы и сдвигов резонансов от таких параметров, как эллиптичность лазерного излучения и величина приложенного магнитного поля. Показано, что имеет место немонотонная зависимость амплитуды резонансов от данных параметров, что объясняется как результат интерференции различных каналов импульсного возбуждения резонансов КПН. Также проанализирована зависимость сдвига центрального резонанса от параметра эллиптичности излучения при различных поляризационных конфигурациях. Показано, что во всех случаях имеется область минимальной чувствительности сдвига к изменению эллиптичности.

В **четвертой главе** на основе аналитического выражения, полученного в первой главе, исследована форма резонанса ЭИП, возбуждаемого в газовой ячейке без буферного газа с антирелаксационными покрытиями торцевых стенок. Показано, что учет

сверхтонкой структуры возбужденного состояния в данном случае приводит к появлению дополнительных резонансов в спектре ЭИП. Положение и форма данных резонансов зависит от амплитуды связывающего излучения и типа покрытия торцевых стенок. Также показано, что форма основного резонанса ЭИП зависит от типа покрытия только в ячейках малых длин по сравнению с длиной волны, соответствующей частоте расщепления основного состояния.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, сделаны выводы о возможности их применения.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

В работе сформулированы следующие научные положения.

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.

Первое и второе положение подкреплено материалами второй и третьей главы соответственно. Третье и четвертое положение подкреплено материалами четвертой главы.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, получены на основе апробированных подходов квантовой механики и классической электродинамики. Защищаемые положения вытекают из представленных в диссертации и опубликованных в рецензируемых изданиях результатов исследования, позволяющих проанализировать влияние различных факторов на процессы возбуждения нестационарных и неоднородных темных резонансов.

Достоверность и апробация научных результатов.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается строгим обоснованием предложенных математических моделей. Все приближения, сделанные в работе, имеют определенные границы применимости, а полученные зависимости в предельных случаях переходят к общеизвестным физическим результатам. Для всех математических моделей, представленных в диссертационной работе, показано наличие согласия соответствующих результатов с экспериментальными данными, опубликованными авторами других работ.

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 15 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Научная новизна работы.

К наиболее значимым оригинальным результатам работы следует отнести следующее:

- 1) Показана возможность фазовой компенсации зависимостей сдвига резонансов КПН, возбуждаемых импульсным излучением, от толщины активной среды и температуры.
- 2) Предложено физическое обоснование немонотонных зависимостей амплитуды резонансов КПН, возбуждаемых импульсным излучением, от величин внешнего магнитного поля и параметра эллиптичности возбуждающего излучения. На основе данной интерпретации предложено простое аналитическое выражение, определяющее положения экстремумов зависимости амплитуды резонансов от магнитного поля.
- 3) Показано существование поляризационных конфигураций возбуждающего резонанс КПН импульсного излучения, при которых положение резонансов минимально зависит от эллиптичности.
- 4) Получено аналитическое выражение, описывающее форму резонансов ЭИП, для случая наличия торцевых стенок ячейки с антирелаксационным покрытием. На основе данного выражения предложена новая физическая интерпретация различия стоковского и антистоковского каналов рассеяния пробного излучения в терминах «одетых» состояний.
- 5) Показано, что учет сверхтонкой структуры возбужденного состояния атомов при описании резонансов ЭИП приводит к появлению дополнительных резонансов в спектре поглощения пробного излучения, положение и форма которых зависит от амплитуды связывающего излучения и типа покрытия торцевых стенок.
- 6) Показано, что в случае малых длин ячеек по сравнению с длиной волны микроволнового перехода в основном состоянии атомов, появляются различия в дуальной структуре резонанса ЭИП между различными типами отражения от торцевых стенок.

Научная новизна полученных результатов подтверждается авторскими публикациями в рецензируемых научных журналах.

Практическая значимость работы.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что в работе предсказывается ряд новых эффектов, имеющих интерес для практических приложений. В частности, предложены методы снижения чувствительности сдвигов резонансов КПН, детектируемых импульсным излучением, к изменениям температуры атомной среды и эллиптичности лазерного излучения, что может найти потенциальные применения в задачах улучшения стабильности квантовых стандартов частоты. Обнаруженные физические особенности возбуждения резонансов ЭИП в газовых ячейках без буферного газа с антирелаксационными покрытиями торцевых стенок имеют существенное значение для описания работы соответствующих устройств оптической квантовой памяти.

Основные положения диссертации Г.В. Волошина, выносимые на защиту, обладают безусловной **научной новизной**.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Тем не менее, диссертация не лишена некоторых незначительных **недостатков**.

- 1) Вызывает сомнение необходимость обособления материала Главы 3, поскольку её объем мал по сравнению с другими главами.
- 2) На рисунках 2.2.10 и 2.3.9 диссертации показано существование начальной разности фаз считывающего импульса, при которой зависимость сдвига резонанса от оптической плотности подавляется, однако не обсуждается диапазон параметров, в котором эта разность фаз существует. Также отсутствует анализ зависимости этой разности фаз от различных параметров лазерного возбуждения и атомной среды.
- 3) Формула на странице 112 диссертации, позволяющая определить положения дополнительных резонансов ЭИП в случае зеркально-когерентного типа отражения атомов от стенок, приведена без вывода.
- 4) При исследовании резонансов ЭИП используется «слабо реалистичная» модель газовой ячейки, которая имеет конечный размер в продольном лазерному лучу направлении и бесконечные в поперечных направлениях.
- 5) Игнорирование зеemanовской структуры энергетических уровней щелочного атома при исследовании влияния оптической плотности среды на процесс импульсного возбуждения резонансов КПН.
- 6) При описании импульсного возбуждения резонансов КПН задача решается численно в форме достаточно сложной с вычислительной точки зрения системы интегро-дифференциальных уравнений. При этом не обсуждается возможность упрощения этой системы в различных предельных случаях.
- 7) В ряде случаев автор ограничивается только качественным сравнением результатов теории с экспериментальными данными.
- 8) На странице 51 диссертации в пункте 3 присутствует лишняя запятая после слова «теорию».

Указанные недостатки ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, написанной ясным и понятным научным языком.

Заключение.

Считаю, что диссертация Волошина Г.В. является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме и вносит существенный вклад в понимание физических процессов, происходящих при возбуждении резонансов когерентного пленения населенностей и электромагнитно-индуцированной прозрачности. Достоверность результатов Диссертации не вызывает сомнений. Сформулированные выводы обоснованы, обладают научной новизной и представляют научную и практическую значимость. Работа полностью отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Волошин Гавриил Валентинович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической физики
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет»

«02» июля 2024 г.

Корнев Алексей Станиславович

Почтовый адрес:
394018, г. Воронеж,
Университетская пл., 1

Тел.: +7 903 854 50 24

Адрес электронной почты:
a-kornev@yandex.ru

