

На правах рукописи

Владимирова Юлия Викторовна

**Теоретический анализ и компьютерное моделирование
спектров когерентных темных резонансов
многоуровневых атомов, полученных методами
прецизионной лазерной спектроскопии**

Специальность 01.04.21 — лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент **Задков Виктор Николаевич;**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент **Кулик Сергей Павлович;**

кандидат физико-математических наук, **Башаров Асхат Масхудович;**

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук.

Защита состоится 5 октября 2006 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физико-математических наук, доцент

Ильинова Т.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Взаимодействие электромагнитного поля с атомом является одной из наиболее фундаментальных проблем квантовой оптики. Известно, что многоуровневые атомы проявляют здесь существенно более широкий спектр эффектов, чем двухуровневые атомы (ДА), за счет индуцированной полем когерентности между атомными состояниями и квантовой интерференции. Трехуровневые системы, реализуемые в Λ -, Ξ - и V - конфигурациях, играют важную роль для изучения этих эффектов, являясь промежуточной по сложности системой между ДА и многоуровневыми атомами. В них наблюдается целый ряд новых эффектов, из которых когерентное пленение населенности (КПН) является одним из самых интригующих явлений, интенсивно исследовавшихся экспериментально и теоретически.

Эффект КПН наиболее ярко проявляется в трехуровневой системе с двумя близкими долгоживущими уровнями $|1\rangle$ и $|2\rangle$ с частотным расщеплением ω_{12} и третьим удаленным от них уровнем $|3\rangle$ (Λ - или V -система), возбужденной двумя непрерывными лазерными полями, так что удаленный уровень оптически “связан” с двумя другими (рис. 1).

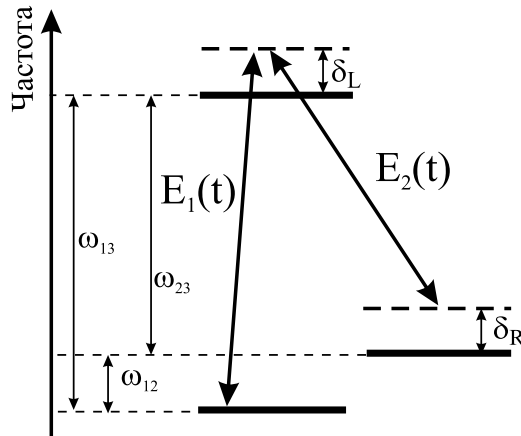


Рис. 1: Λ -система, взаимодействующая с двумя лазерными полями $E_1(t)$ и $E_2(t)$, δ_L — однофотонная лазерная расстройка на переходе $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$; δ_R — двухфотонная рамановская расстройка.

Если переход $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ в дипольном приближении запрещен и два монохроматических поля $E_1 \exp(-i\omega_{L1}t - i\varphi_1)$, $E_2 \exp(-i\omega_{L2}t - i\varphi_2)$ находятся в ре-

зонансе с соответствующими переходами $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$, $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$, то в результате квантовой интерференции формируется узкий резонанс КПН. Он проявляется в спектре поглощения как узкий провал, когда одно из действующих полей, например ω_{L1} , сканируется и рамановская расстройка $\delta_R = \omega_{L1} - \omega_{L2} - \omega_{12}$ проходит через соответствующее точному резонансу нулевое значение, а в спектрах резонансной флуоресценции он наблюдается как отсутствие эмиссии, что и дало название “темный (или КПН-) резонанс”. Резонансы КПН имеют очень узкую ширину (рекордные ширины резонанса КПН в экспериментах по спектроскопии насыщения/флуоресценции паров атомов Cs с буферными газами при комнатной температуре составляют десятки Гц).

Впервые резонанс КПН наблюдался в парах атомов натрия (Алзетта, Годзини, Мои и др. в 1967 г.). Усилия исследователей после открытия эффекта были направлены прежде всего на выяснение динамики процессов в трехуровневых системах при условии нулевой рамановской расстройки, а также на объяснение самого факта отсутствия заселения верхнего уровня. Было показано, что отсутствие населённости на верхнем уровне обусловлено переходом системы в состояние когерентной суперпозиции нижних уровней, к которому система приходит спустя некоторое время установления τ после включения взаимодействия. Величина τ определяется радиационным временем жизни атома γ^{-1} в возбужденном состоянии.

До настоящего времени большинство экспериментальных исследований резонансов КПН было выполнено с атомами щелочногаллоидной группы (например Cs, Rb), у которых в качестве нижних уровней Λ -системы использовались сверхтонкие компоненты основного состояния с типичным расщеплением в несколько ГГц. Электро-дипольные переходы между компонентами сверхтонкой структуры в них, как правило, запрещены, поэтому радиационный распад пренебрежимо мал. Большое время жизни (тысячи лет) атомов щелочных металлов в когерентной суперпозиции нижних состояний способствует возникновению КПН. Возможность регистрации контрастных и высокочастотных резонансов КПН в щелочных атомах обусловлена следующим: 1) наличием прецизионных стабильных лазерных систем, перестраиваемых в области резонансного перехода и 2) возможностью относительно простой фазовой привязки световых полей E_1 и E_2 . Так, в чистых парах цезия зарегистрированы резонансы с шириной около 10 кГц.

Благодаря малой ширине резонансов КПН они нашли широкое применение

ние в различных прецизионных спектроскопических приложениях, таких как метрология и магнетометрия, а также в высокочувствительных лазерных интерферометрах для регистрации гравитационных волн. Связанные между собой явления квантовой когерентности и интерференции лежат также в основе лазеров без инверсии и корреляционного-эмиссионного лазера с подавленными квантовыми шумами. Дополнительные возможности использования сильной нелинейности при КПН открывают перспективы сверхглубокого охлаждения атомов и оптической бистабильности.

Экспериментально регистрируемая ширина линии определяется стабильностью отстройки δ_R и разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, а также доплеровским и время-пролетным уширениями, штарковским уширением (уширение световым полем и внешними полями), уширением в неоднородных магнитных полях, ударным уширением и т.д. Флуктуацию фаз $\Delta\varphi$ удастся стабилизировать с высокой точностью, например модулируя лазер с частотой, соответствующей величине расщепления основного состояния ω_{12} . В случае использования двух независимых диодных лазеров в режиме свободной генерации можно рассчитывать на наблюдение резонансов КПН с шириной порядка нескольких МГц. Дальнейшее уменьшение ширины резонанса возможно при введении в ячейку инертного буферного газа (Ne, He, Ar) при давлении в несколько кПа. Частые столкновения с атомами буферного газа препятствуют свободному движению атомов через световой пучок так, что время взаимодействия со светом возрастает на порядки. При этом столкновения с буферным газом практически не нарушают когерентность, благодаря чему происходит сильное сужение резонанса. Так в ячейке, содержащей цезий и неон в качестве буферного газа, достигнута ширина резонанса порядка 50 Гц. Также, в случае атомов цезия, для сохранения когерентности используются ячейки, стенки которых покрыты парафином или органосиланами. Такое покрытие снижает вероятность разрушения когерентного состояния при столкновении атома со стенкой в сотни и даже тысячи раз.

Редкоземельные атомы также используются при наблюдении КПН, это обусловлено тем, что в редкоземельных атомах характерное расстояние между компонентами тонкой структуры существенно превышает сверхтонкое расщепление основного состояния щелочных атомов и составляет 10–100 ТГц, в то время, как характерное время спонтанного распада этих уровней за счет магнитодипольных переходов составляет несколько секунд. Резонансы КПН в

Λ -системе, нижними уровнями которой являются компоненты тонкой структуры в редкоземельном атоме также обладают высокой потенциальной добротностью. Уровни тонкой структуры в редкоземельных атомах также слабо чувствительны к атомным столкновениям, поскольку они хорошо заэкранированы внешней замкнутой оболочкой. Таким образом, свойства резонансов КПН в редкоземельных атомах открывает перспективу использования таких атомов в метрологических приложениях, например, для создания вторичного стандарта частоты. Одним из наиболее перспективных для метрологических приложений редкоземельных атомов является атом самария, схема уровней которого является существенно более простой по сравнению с атомом цезия, особенно в приложенных магнитных полях. В ФИАНе им.П.Н.Лебедева в группе С.И.Канорского и сотр., в рамках проекта по изучению возможности метрологических применений резонансов КПН в парах редкоземельных атомов, методами нелинейной спектроскопии высокого разрешения проводится изучение свойств паров самария (Sm) в области линий переходов, образующих Λ -систему:

$$4f^6 6s^2(^7F_0) \rightarrow 4f^6(^7F)6s6p(^3P^0)^9F_1^0 \rightarrow 4f^6 6s^2(^7F_1). \quad (1)$$

Именно поэтому атом самария и был выбран в качестве “пробного камня” для проверки разработанной нами общей теории КПН в многоуровневых атомах.

Традиционная экспериментальная техника для наблюдения спектров темных резонансов с использованием двух резонансных лазерных полей в настоящее время широко используется для многих приложений. Однако, необходимо развитие более простой экспериментальной техники для спектроскопии темных резонансов в многоуровневых атомах, которая позволила бы использовать, например, только одно лазерное поле, но модулированное по частоте (ЧМ). Такие эксперименты проводятся в группе профессора Луиджи Мои в Университете Сиена в Италии и они, фактически, инициировали наши теоретические исследования по взаимодействию трехуровневой Λ -системы с частотно-модулированным лазерным полем.

Модуляционные методы активно начали развиваться применительно к оптической спектроскопии в начале 80-х годов прошлого столетия. Уже хорошо известные к тому времени в микроволновой спектроскопии и спектроскопии ядерного магнитного резонанса ЧМ-методы получили новое развитие в лазерной спектроскопии. Оптическая ЧМ-спектроскопия в настоящее время играет

центральную роль в прецизионных измерениях в таких областях физики, как детектирование гравитационных волн, стандарты частоты, измерение слабых магнитных полей и др.

Несмотря на значительный прогресс в развитии техники оптической ЧМ-спектроскопии, теоретические модели были детально разработаны и изучены только для двухуровневых систем, которые позволяют выполнить анализ аналитически. Теоретический же анализ многоуровневых, в простейшем случае трехуровневых систем, взаимодействующих с ЧМ-полем, на настоящий момент в литературе практически отсутствует. Поэтому отдельная глава диссертационной работы посвящена исследованию взаимодействия простой трехуровневой системы с ЧМ-полем.

ЧМ спектроскопия когерентных темных резонансов также представляет большой интерес для магнетометрии, стандартов частоты и многих других приложений. Эксперименты по ЧМ спектроскопии темных резонансов проводятся с атомами щелочногаллоидной группы (например, Cs, Rb) в слабых магнитных полях. Наличие магнитного поля приводит к усложнению энергетической структуры атомов за счет эффекта Зеемана (рис. 1). Например, переход $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$ в атоме Cs является рабочим в эксперименте. Уровни $F_g = 3$ и $F_e = 2$ расщепляются в магнитном поле на $2F + 1$ подуровня каждый. Пары основных подуровней с $\Delta m_F = 2$ (m_F —магнитное квантовое число) и зеемановские подуровни возбужденного состояния, образуют цепочку Λ -систем. В типичных экспериментах по ЧМ спектроскопии когерентных темных резонансов в атомах Cs атомная среда находится в однородном магнитном поле, величина напряженности которого порядка $10 \mu\text{T}$. Спектр ЧМ излучения состоит из дискретного набора частотных компонент, и когерентный резонанс наблюдается, когда частотное расстояние между этими компонентами совпадает с зеемановским расщеплением ω_{12} основного состояния (рис. 1), обусловленным наличием постоянного магнитного поля. Когерентная структура наблюдается при сканировании частоты модуляции в небольшом диапазоне вокруг двухфотонного резонанса при фиксированной величине внешнего магнитного поля, или при фиксированной частоте модуляции путем сканирования магнитного поля в соответствующем диапазоне.

Таким образом, представляется весьма актуальным анализ взаимодействия Λ -систем с ЧМ полем, разработка математических методов расчета динамики формирования когерентных темных резонансов при взаимодействии

Λ -систем с ЧМ полем и применения этих методов к расчету конкретных атомов.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является детальный теоретический анализ спектров когерентных темных резонансов многоуровневых атомов, полученных методами прецизионной спектроскопии как в случае взаимодействия Λ -системы с двумя монохроматическими полями, так и в случае взаимодействия с ЧМ полем.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана универсальная модель КПН в многоуровневых системах (в общем случае N -уровневых) в Λ -конфигурации, взаимодействующих с двумя монохроматическими оптическими полями для произвольной конфигурации магнитного поля (полей), позволяющая рассчитывать любые спектроскопические характеристики резонансов КПН.
- Впервые проведен теоретический анализ ЧМ-спектроскопии когерентных темных резонансов на примере простой трехуровневой Λ -системы, позволяющий рассчитать динамику формирования резонансов при взаимодействии системы с ЧМ полем.

Практическая ценность работы

- Разработанная модель и комплекс программ для моделирования спектральных характеристик резонансов КПН в многоуровневых системах (в общем случае N -уровневых), взаимодействующих с двумя монохроматическими оптическими полями и произвольной конфигурацией магнитного поля, могут легко быть адаптированы для произвольных многоуровневых атомов и схем возбуждения, что находит также практическое применение в высокопрецизионных измерениях, для создания и применения перепутанных состояний, в инженерии квантовых состояний.

- Полученные результаты по взаимодействию трехуровневой Λ -системы с ЧМ полем представляют непосредственный интерес для анализа экспериментальных данных по ЧМ спектроскопии темных резонансов, находящей практическое применение в таких важных приложениях как, например, магнетометрия, метрология и др.

Защищаемые положения

По результатам диссертационной работы можно сформулировать следующие защищаемые положения:

- Предложенная теория резонансов когерентного пленения населенности (КПН) в многоуровневых атомах, основанная на технике символического представления супероператоров, позволяет универсальным образом рассчитывать произвольные схемы возбуждения с учетом эффектов релаксации, приложенного магнитного поля и эффекта Доплера. Данная теория эффективна для систематического анализа результатов экспериментов по высокопрецизионной диодной спектроскопии когерентных темных резонансов в парах самария. В отсутствие магнитного поля адекватна модель самария, основанная на рассмотрении вырожденной Λ -системы на активных переходах $4f^6 6s^2(^7F_0) \leftrightarrow 4f^6(^7F) 6s 6p(^3P^o)^9 F_1^o \leftrightarrow 4f^6 6s^2(^7F_1)$, которая с учётом четвертого уровня $4f^6 6s^2(^7F_2)$, играющего роль резервуара, становится открытой системой. Численное моделирование резонансов КПН показывает, что открытый характер системы уменьшает контраст резонансных кривых в спектрах поглощения, не меняя ширины самих резонансов. Для случаев наложения внешнего продольного/поперечного магнитного поля адекватна 7-уровневая модель атомных переходов.
- Выполненный впервые теоретический анализ взаимодействия трехуровневого атома в Λ -конфигурации с ЧМ полем позволяет предложить и проанализировать эффективную двухчастотную модель для решения задачи ЧМ спектроскопии когерентных темных резонансов на примере трехуровневой Λ -системы. Эффективность этой модели следует из сравнения полученных с ее помощью результатов с результатами решения точной задачи о взаимодействии Λ -системы с ЧМ полем, решаемой

как при помощи метода матрицы плотности, так и на основе метода квантовых траекторий. Двухчастотная модель не только соответствует численному решению точной динамической задачи, но и качественно согласуется с данными спектроскопических экспериментов.

- В спектрах поглощения Λ -системы, взаимодействующей с ЧМ полем, в случае паров атомов цезия при наличии модуляции в спектре формируются дополнительные резонансы КПН на частотах, кратных частоте модуляции Ω_{mod} , т.е. резонанс формируется, когда межмодовое расстояние $n\Omega_{\text{mod}}$ равно зеемановскому расщеплению основного состояния ω_{12} . Число резонансов зависит от индекса модуляции M и увеличивается с его ростом. Для разных значений M интенсивность различных резонансов регулируется значениями функции Бесселя $J_n(M)$, определяющими амплитуды частотных гармоник.

Апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 5 - статьи в научных журналах: ЖЭТФ (2006, 2003), Proc. SPIE (2006, 2002), Laser Physics Letters (2006).

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

1. Международная конференция "First International Conference on Laser Optics for Young Scientists — 2000". 26—30 июня 2000 г., Санкт-Петербург, Россия.
2. Международная конференция "II International Conference for Young Scientists and specialists "Optics-2001", октябрь 2001 г., Санкт-Петербург, Россия.
3. Международная конференция "XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2001)", 26 июня — 1 июля 2001г., Минск, Беларусь.
4. Международная конференция "VIII International graduate and postgraduate student conference LOMONOSOV-2001", 10 — 13 апреля 2001г., Москва, Россия.

5. Летняя школа по квантовой оптике "Quantum Optics Summer School (QOSS-2001)", 15 —30 августа 2001г., Бонн, Германия.
6. Международная конференция "International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO-LAT 2005)", 11 — 15 мая, 2005г., Санкт-Петербург, Россия.
7. Семинар физического факультета Университета Сиена, 10 июня 2005г., Сиена, Италия.
8. Международная конференция "Russian-German Laser Symposium (RGLS-2005)", 1 — 4 октября 2005г., Нижний Новгород, Россия.
9. Международная конференция "European Conference of Nonlinear Optical Spectroscopy ECONOS-2006", 9 — 11 апреля 2006г., Смоленица, Словакия.
10. Международная конференция "XI International Conference on quantum optics 2006", 26 — 31 мая 2006г., Минск, Беларусь.

Список опубликованных работ приведен в конце настоящего автореферата.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех частей, заключения, списка литературы из 104 наименований и одного приложения. Общий объем работы составляет 122 страницы машинописного текста, включая 23 рисунка и 7 таблиц.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены при непосредственном участии автора.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** аргументирована актуальность, цель, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований. Сформулированы положения, выносимые автором на защиту. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

В первой части диссертации “**Математическая техника расчета эффекта КПН в многоуровневых системах**” представлена теоретическая модель, используемая для описания КПН в многоуровневых системах и позволяющая производить расчеты с использованием минимального набора входных параметров. Эта модель основана на использовании техники символического представления супероператоров.

Если динамика замкнутых систем задаётся оператором энергии, применяемым к волновым функциям, то в системах с релаксацией она может быть представлена лишь преобразованиями, применяемыми к операторам матрицы плотности или динамических переменных, т.е. супероператорными преобразованиями. Простейшие преобразования этого типа возникают и в системах без релаксации при их описании в терминах матриц плотности, в частности, при рассмотрении квантового уравнения Лиувилля $\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \mathcal{L}_0 \hat{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}]$. Супероператорное преобразование представлено здесь лиувиллианом \mathcal{L}_0 , который с точностью до мнимого множителя $-i/\hbar$ описывается коммутатором с гамильтонианом \hat{H} , примененным к матрице плотности $\hat{\rho}$.

Чтобы ввести соответствующие супероператоры безотносительно к преобразуемым операторам, достаточно ввести *символ подстановки* \odot , обозначающий место подстановки преобразуемого оператора, в качестве которого в представлении Шредингера выступает матрица плотности.

В символическом представлении лиувиллиан замкнутой системы имеет вид $\mathcal{L}_0 = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \odot]$. При наличии релаксационных процессов динамика атомной системы задается уравнением Лиувилля:

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \mathcal{L}_{tot} \hat{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] + \mathcal{L}_r \hat{\rho}, \quad (2)$$

где \mathcal{L}_r — супероператор, описывающий релаксационные процессы.

Как и любые линейные операторы, после введения линейного базиса на линейном пространстве квантовых операторов супероператоры могут быть представлены в виде соответствующих им матриц. Использование данной тех-

ники символического представления супероператоров эффективно при расчете систем любой размерности, особенно для расчета многоуровневых систем. В частности, в силу большой размерности задач даже простое выписывание матриц, описывающих эволюционные супероператоры, становится технически сложной задачей. Однако, при использовании символического представления супероператоров, благодаря физически прозрачной форме записи, они могут быть сначала записаны в символической форме, после чего их матричные элементы могут быть рассчитаны либо аналитически, либо численно (в случае матриц большой размерности) на компьютере. При этом технические трудности их воспроизведения полностью переносятся на автоматические компьютерные вычисления, так что результаты этих вычислений могут быть легко использованы для численного расчёта рассматриваемых прикладных задач с использованием наиболее подходящего языка программирования.

В диссертации для расчетов использовалась комбинация пакета компьютерной алгебры Mathematica (для аналитического задания супероператоров) и языка программирования Фортран (для последующих численных расчётов спектров с использованием рассчитанных матриц динамических супероператоров).

Используя такую технику расчетов, в главе 1 первой части диссертации проведен расчет лиувиллиана N -уровневого атома с использованием символического представления. На основе этой общей модели рассчитан лиувиллиан трехуровневого атома в случае двух монохроматических полей.

В главе 2 первой части диссертации рассмотрены два метода численного расчета *временной динамики Λ -системы*, взаимодействующей как с двумя монохроматическими полями, так и с ЧМ полем. Первый метод основан на точном решении уравнения (2) для матрицы плотности (будем называть его *метод матрицы плотности*), а второй базируется на решении уравнения Шредингера методом квантовых траекторий (будем называть его *метод квантовых траекторий*). Преимущество метода квантовых траекторий проявляется для систем с числом состояний $N \gg 1$, и состоит в бóльшей эффективности расчетов и сокращении их времени за счёт существенно меньшего числа используемых переменных, по сравнению с методом матрицы плотности для таких систем. В самом деле, волновая функция описывается только N элементами, в то время, как матрица плотности – N^2 элементами. Несмотря на то, что метод квантовых траекторий выгоден для расчета многоуровневых

систем, он должен быть сначала проверен на примере простой трехуровневой системы. С этой целью все расчеты в диссертации проведены двумя описанными методами.

В части II диссертации **“Моделирование спектров когерентных темных резонансов в многоуровневых атомах на примере паров самария”** с использованием техники расчета, описанной в части I, проведено моделирование спектров темных резонансов в многоуровневых атомах на примере паров самария, взаимодействующих с двумя монохроматическими полями.

В главе 3 обсуждается структура уровней атома самария и проведен расчет параметров, определяющих возбуждение Λ -системы. В Главе 4 описана экспериментальная установка для регистрации резонансов КПН и приведены экспериментальные параметры, используемые в дальнейшем для расчета спектров КПН самария и сравнения их с экспериментальными спектрами.

Глава 5 посвящена результатам моделирования спектров КПН в парах самария. Показано, что резонансы КПН в отсутствие внешнего магнитного поля хорошо аппроксимируются простой четырехуровневой моделью. Исследована зависимость ширины и контраста резонанса в трех- и четырехуровневой модели и показано, что введение четвертого уровня $J = 2$ в трехуровневую модель практически не меняет ширину резонанса, в то время как полное поглощение четырехуровневой системы по величине значительно меньше, чем в случае трехуровневой. Это происходит за счет захвата населенности на уровне $J = 2$ через соответствующий канал радиационного распада.

Показано, что при наложении продольного или поперечного магнитных полей спектроскопические характеристики атомов самария хорошо описываются семиуровневой моделью. Усложнение энергетической структуры уровней атомов самария приводит к увеличению числа резонансов КПН и появлению дополнительных пиков поглощения в спектрах за счёт того, что рассматриваемая система распадается на набор трехуровневых Λ -систем, каждая из которых отвечает за формирование соответствующего резонанса. При этом переходы между уровнями, прямо не участвующими в образовании Λ -систем, участвуют в формировании пиков наведенного поглощения.

Продемонстрировано, что при наложении магнитного поля существенное влияние на форму линии поглощения и контраст резонансов КПН оказывает явление деполяризации магнитных подуровней, проявляющееся как монотонное падение контраста резонансов КПН с ростом константы деполяризации.

Рассчитаны и сопоставлены с экспериментальными данными коэффициенты поглощения паров с учетом максвелловского распределения атомов по скоростям. Показано, что изменение температуры ведет к изменению абсолютной величины коэффициента поглощения, но практически не сказывается на его форме.

При наличии поперечного магнитного поля результаты численных расчетов полностью воспроизводят экспериментальные данные как в отношении положения и ширины резонансов КПН, так и в отношении формы спектров. Для продольного же магнитного поля качественные теоретические оценки подтверждают наблюдаемое в эксперименте расщепление резонанса КПН на малую величину ~ 3 МГц, однако его воспроизведение при численном расчете требует выхода за рамки приближений, обычно используемых для описания эффектов влияния доплеровского уширения на формирование спектров КПН.

Часть III диссертации **“Частотно-модуляционная лазерная спектроскопия Λ -систем на примере паров атома Cs”** посвящена взаимодействию трехуровневой Λ -системы с одним ЧМ оптическим полем. При этом возможны два различных типа экспериментов по ЧМ спектроскопии. *Низкочастотная модуляционная спектроскопия* обеспечивает наблюдение темных резонансов в случае, когда ЧМ поле возбуждает переходы только с одного сверхтонкого подуровня либо $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$, либо $F_g = 4 \rightarrow F_e = 5$ (рис. 2). Диапазон частот модуляции в случае низкочастотной модуляционной спектроскопии составляет $0,1 \div 1$ МГц. *Высокочастотная модуляционная спектроскопия* обеспечивает наблюдение резонансов КПН при возбуждении двух сверхтонких подуровней (рис. 3). Частота модуляции в этом случае равна половине величины сверхтонкого расщепления, что составляет $4,6$ ГГц для атома Cs.

В главе 6 рассмотрена структура уровней D_2 линии атома Cs. Описаны две возможные конфигурации для создания КПН:

- **КПН на Зеемановских подуровнях основного состояния.** В этом случае $|1\rangle$ и $|2\rangle$ — зеемановские подуровни сверхтонкого основного состояния. Когда излучение лазера линейно поляризовано, возможны переходы с уровней $|1\rangle = |F_g, m_F\rangle$ и $|2\rangle = |F_g, (m_F + 2)\rangle$ на возбужденный уровень $|3\rangle = |F_e, (m_F + 1)\rangle$, где F_g может быть равно 3 или 4 в зави-

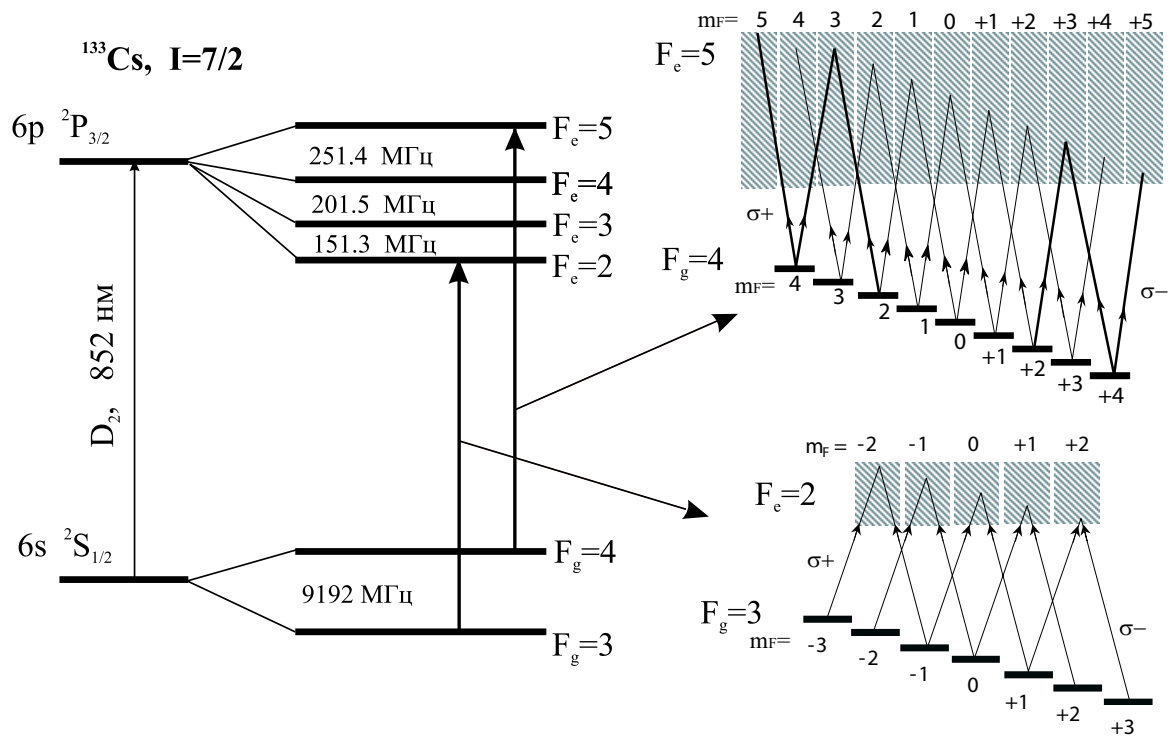


Рис. 2: Структура D_2 линии атома Cs. В данной системе существуют два разрешенных перехода: $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$ и $F_g = 4 \rightarrow F_e = 5$. В случае низкочастотной модуляционной спектроскопии атома Cs в образовании Λ -системы задействованы переходы с одного из основных сверхтонких подуровней и в магнитном поле образуются цепочки Λ -систем.

симости от лазерной отстройки.

- **КПН на уровнях сверхтонкой структуры разных основных состояний.** В этом случае $|1\rangle$ и $|2\rangle$ принадлежат разным сверхтонким основным состояниям, так что $|1\rangle = |F_g = 3, m_3\rangle$ и $|2\rangle = |F_g = 4, m_4\rangle$; $m_3 = m_4$ поскольку в эксперименте используется циркулярная поляризация лазерного излучения.

В главе 7 рассмотрена теория низкочастотной модуляционной спектроскопии темных резонансов на примере трехуровневой системы. С этой целью представлена и проанализирована эффективная двухчастотная модель, позволяющая описать взаимодействие Λ -системы с ЧМ полем, путем замены ЧМ спектра на два эффективных монохроматических поля, параметры этих полей зависят от параметров ЧМ поля.

На основе данной двухчастотной модели рассчитаны спектры поглоще-

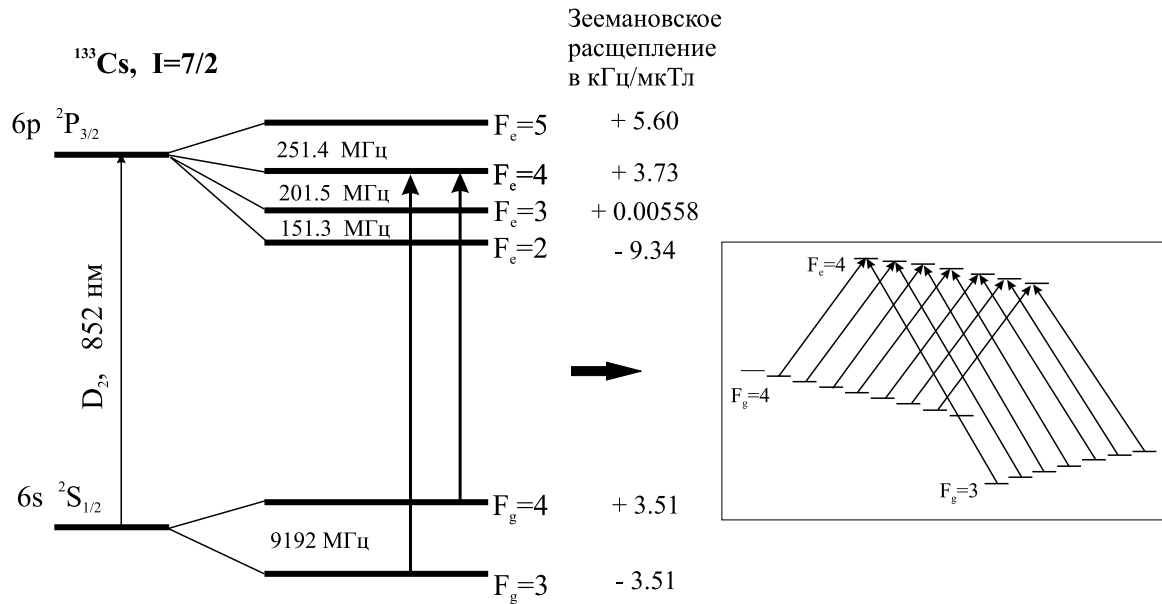


Рис. 3: В случае высокочастотной модуляционной спектроскопии атома Cs в образовании Λ -системы задействованы переходы с двух основных сверхтонких подуровней: $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$ и $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$. В магнитном поле система превращается в многоуровневую (7 Λ -систем).

ния Λ -системы, взаимодействующей с ЧМ полем. Показано, что в случае Λ -системы, взаимодействующей с одним резонансным полем без модуляции ($M = 0$), темный резонанс в спектре наблюдается при значении расщепления основного состояния ω_{12} равного нулю, т.е. в случае вырожденной Λ -системы. При наличии модуляции в спектре формируются дополнительные резонансы КПН на частотах, кратных частоте модуляции Ω_{mod} , т.е. резонанс формируется, когда межмодовое расстояние $n\Omega_{\text{mod}}$ равно зеемановскому расщеплению основного состояния ω_{12} . Число резонансов зависит от индекса модуляции и увеличивается с его ростом. Для разных значений интенсивность разных резонансов различна. Это объясняется тем, что зависимость мощности прошедшего через среду модулированного сигнала для данного M пропорциональна квадрату функции Бесселя $J_n^2(M)$. Поскольку квадрат функции Бесселя для данного индекса модуляции принимает нулевые значения при определенных значениях n , следовательно и резонансы на частотах $n\Omega_{\text{mod}}$ практически отсутствуют. Показано, что полученные при помощи двухчастотной модели результаты качественно подтверждают образование в экспериментальных спектрах дополнительных резонансов КПН на частотах, кратных частоте модуляции.

Показано, что теоретически рассчитанный спектр поглощения трехуровневой Λ -системы, взаимодействующей с полем модулированным по частоте и амплитуде (для индекса частотной модуляции $M = 10$ и индекса амплитудной модуляции равной $R = 2$), подтверждает экспериментальную зависимость.

Также проведен численный расчет временной динамики методом квантовых траекторий. На основании выполненных расчетов можно утверждать, что для систем с небольшим числом уровней N метод матрицы плотности более экономичен с точки зрения времени расчетов. Метод квантовых траекторий также позволяет численно решить задачу, однако требует больших вычислительных ресурсов и, как следствие, большего времени расчетов (порядка 5×10^5 итераций), по сравнению с методом матрицы плотности. Однако, в случае расчета реальных систем с большим числом уровней, таких, например, как Cs или Rb решение подобной задачи методом квантовых траекторий может стать предпочтительнее за счет сокращения числа уравнений с N^2 до N и поэтому выбор метода зависит от конкретных условий задачи.

В главе 8 показано, что для случая высокочастотной модуляции результаты численных расчетов полностью воспроизводят экспериментальные данные в отношении положения и ширины резонансов и формы спектров.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы:

1. В части I диссертации

- Развита техника символического представления супероператоров, в общем случае для N -уровневого атома, взаимодействующего с двумя монохроматическими оптическими полями, применительно к расчету экспериментальных спектров когерентных темных резонансов.
- Представлено математическое описание методов расчета временной динамики Λ -системы.

2. В части II диссертации показана применимость техники символического представления супероператоров к исследованию спектров КПН на примере атома самария.

- Моделирование спектров темных резонансов на примере атомов самария, взаимодействующих с двумя монохроматическими полями, показало, что при наложении продольного или поперечного магнитных полей спектроскопические характеристики атома самария хорошо описываются в рамках семиуровневой модели. В полученных спектрах появляются дополнительные пики поглощения за счёт того, что рассматриваемая система распадается на набор трехуровневых Λ -систем, каждая из которых отвечает за формирование соответствующего резонанса. При этом переходы между уровнями, прямо не участвующими в образовании Λ -систем, участвуют в формировании пиков наведенного поглощения.
- Показано, что в присутствии магнитного поля существенное влияние на форму линии поглощения и контраст резонансов КПН оказывает явление деполяризации магнитных подуровней, проявляющееся как монотонное падение контраста резонансов КПН с ростом константы деполяризации.
- Рассчитаны и сопоставлены с экспериментальными данными коэффициенты поглощения паров самария с учетом максвелловского распределения атомов по скоростям. Показано, что изменение температуры ведет к изменению абсолютной величины коэффициента поглощения, но практически не сказывается на его форме.
- При наличии поперечного магнитного поля результаты численных расчетов полностью воспроизводят экспериментальные данные как в отношении положения и ширины резонансов КПН, так и в отношении формы спектров. Для продольного же магнитного поля качественные теоретические оценки подтверждают наблюдаемое в эксперименте расщепление резонанса КПН на малую величину ~ 3 МГц, однако его воспроизведение при численном расчете требует выхода за рамки приближений, обычно используемых для описания эффектов влияния доплеровского уширения на формирование спектров КПН.

3. В части III диссертации:

- Предложена двухчастотная эффективная модель для расчета за-

висимости поглощения трехуровневой Λ -системы, взаимодействующей с ЧМ полем, и точная модель для описания динамики формирования резонансов. С их помощью рассчитаны и проанализированы условия возникновения когерентных темных резонансов в случае ЧМ спектроскопии.

- Показано, что при наличии модуляции ($M > 0$) в спектре формируются дополнительные резонансы КПН на частотах, кратных частоте модуляции Ω_{mod} , т.е. резонанс формируется, когда межмодовое расстояние $n\Omega_{\text{mod}}$ равно зеемановскому расщеплению основного состояния ω_{12} . Число резонансов зависит от индекса модуляции и увеличивается с его ростом. Для разных значений интенсивность разных резонансов различна. Это объясняется тем, что зависимость мощности прошедшего через среду модулированного сигнала для данного M пропорциональна квадрату функции Бесселя $J_n^2(M)$. Поскольку квадрат функции Бесселя для данного индекса модуляции принимает нулевые значения при определенных значениях n , следовательно и резонансы на частотах $n\Omega_{\text{mod}}$ практически отсутствуют.
- Показано, что полученные при помощи упрощенной двухчастотной модели результаты качественно подтверждают образование в экспериментальных спектрах дополнительных резонансов КПН на частотах кратных частоте модуляции.
- Теоретически рассчитанный спектр поглощения трехуровневой Λ -системы, взаимодействующей с полем, модулированным по частоте и амплитуде (для индекса частотной модуляции $M = 10$ и индекса амплитудной модуляции равной $R = 2$), подтверждает экспериментальную зависимость.
- Для случая высокочастотной модуляции результаты численных расчетов полностью воспроизводят экспериментальные данные в отношении положения и ширины резонансов и формы спектров.

В приложении А дано описание особенностей резонансов КПН на фоне доплеровски уширенной линии в магнитных полях.

Список публикаций по теме диссертации

- [1] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov, N. N. Kolachevsky, A. V. Akimov, N. A. Kiselev, V. N. Sorokin, and S. I. Kanorsky* Spectroscopy of coherent dark resonances in samarium // Proc. SPIE, Vol. 4749, pp. 147 – 156, 2002.
- [2] *Ю.В.Владимирова, Б.А.Гришанин, В.Н.Задков, Н.Н.Колачевский, А.В.Акимов, Н.А.Киселев, С.И.Канорский* Спектроскопия когерентных темных резонансов в многоуровневых атомах на примере паров самария // ЖЭТФ, 123 (4), с. 710 – 725, 2003.
- [3] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov, V. Biancalana, G. Bevilacqua, E. Breschi, Y. Dancheva, and L. Moi* Theory of frequency-modulation spectroscopy of coherent dark resonances // Proc. SPIE, Vol. 6257, pp. 17 – 29, 2006.
- [4] *Ю.В.Владимирова, Б.А.Гришанин, В.Н.Задков, В.Бьянкалана, Д.Бевилакка, Й.Данчева, Л.Мои* Теория частотно-модуляционной спектроскопии когерентных темных резонансов // ЖЭТФ, 130(10), 2006.
- [5] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov, V. Biancalana, G. Bevilacqua, E. Breschi, Y. Dancheva, and L. Moi* Computer modeling of frequency-modulation spectra of coherent dark resonances // Laser Physics Letters, 3(9), pp. 427 – 436, 2006.
- [6] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov* Modeling of multi-level lambda-system, // First International Conference on Laser Optics for Young Scientists LOYS-2000. St. Petersburg, Russia, June 26 – 30, 2000.
- [7] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov* Spectroscopy of Coherent Dark Resonances in Samarium Vapour // II International Conference for Young Scientists and specialists "Optics-2001". St. Petersburg, Russia, October, 2001.
- [8] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov, N. N. Kolachevsky, A. V. Akimov, N. A. Kiselev and S. I. Kanorsky* Spectroscopy of Coherent Dark

Resonances in Samarium // XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2001). Minsk, Belarus, June 26 – July 1, 2001.

- [9] *J. V. Vladimirova* Coherent population trapping resonances in Samarium vapor // VIII International graduate and postgraduate student conference LOMONOSOV-2001. Moscow, Russia, April 10 – 13, 2001.
- [10] *G.Bevilacqua, V.Biancalana, E.Breschi, Y.Dancheva, L.Moi, Yu.V.Vladimirova, B.A.Grishanin, V.N.Zadkov* Modulation laser spectroscopy of coherent dark resonances// International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO-2005). St. Petersburg, Russia, May 11-15, 2005. Technical Digest, p. ISuA4.
- [11] *Yu.V.Vladimirova, B.A.Grishanin, V.N.Zadkov, G.Bevilacqua, V.Biancalana, E.Breschi, Y.Dancheva, L.Moi* Theory of frequency-modulation spectroscopy of coherent dark resonances // Russian-German Laser Symposium (RGLS-2005). Nizhny Novgorod, Russia, October 1 – 4, 2005. Technical Digest, pp. 63-64.
- [12] *J. V. Vladimirova, B. A. Grishanin, V. N. Zadkov, V.Biancalana, G. Bevilacqua, E. Breschi, Y.Dancheva, and L. Moi* Frequency-modulation laser spectroscopy of coherent dark resonances // European Conference of Nonlinear Optical Spectroscopy ECONOS-2006. Smolenice, Slovak Republik, April 9-11, 2006. Book of Abstracts, p. 59.
- [13] *Yu.V.Vladimirova, B.A.Grishanin, V.N.Zadkov, V.Biancalana, G.Bevilacqua, Y.Dancheva, L.Moi*, Theory of frequency-modulation spectroscopy of coherent dark resonances // XI International Conference on quantum optics 2006. Minsk, Belarus, May 26 – 31, 2006. Book of Abstract, p.40.