

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Цыганкова Евгения Александровича «Магнитооптические резонансы в атомах щелочных металлов и в полихроматических полях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 — Лазерная физика

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация Цыганкова Евгения Александровича посвящена актуальной и востребованной на сегодняшний день тематике — поиску способов улучшения метрологических характеристик магнитометров с оптической накачкой и миниатюрных атомных часов на эффекте когерентного пленения населенностей на атомах щелочных металлов.

Указанные устройства находят ряд важных применений в геологии и геофизике, спутниковых системах связи, навигации, медицине, во многих других технических применениях и в фундаментальной физике.

В работе Е. А. Цыганкова представлено теоретическое исследование магнитного резонанса на переходе $F_g=1 \rightarrow F_e=1$, имеющего место в атомах ^{87}Rb и ^{39}K , ^{41}K , детектируемого излучением эллиптической поляризации и сделана оценка ориентационного сдвига его частоты. Рассмотрен эффект когерентного пленения населённости в случае Λ -схемы уровней и выполнен анализ возможности использования квадратурного сигнала для подавления светового сдвига частоты перехода между уровнями её основного состояния, вызываемого полихроматическим излучением. Выполнен расчёт спектра СВЧ-модулированного диодного лазера с вертикальным резонатором в подходе, основанном на уравнениях макроскопической электродинамики, с учётом пяти спектральных компонент и их нелинейного взаимодействия в активной области диодного лазера, и установлена причина возникновения его асимметрии.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста. Список литературы включает 134 наименования.

Во Введении представлен обзор литературы, показывающий актуальность и степень разработанности исследуемой темы: двойного радиооптического резонанса в приложении к переносным магнитометрам и эффекта когерентного пленения населённости, используемого в малогабаритных атомных часах. Обоснована актуальность диссертационной

работы, указаны её цель, задачи, практическая значимость и новизна. Там же приведены выносимые на защиту положения.

В первой Главе решена задача о магнитооптическом резонансе на оптическом переходе $F_g = 1 \rightarrow F_e = 1$, зондируемом монохроматическим излучением эллиптической поляризации. Исходная система уравнений для элементов атомной матрицы плотности редуцирована с помощью приближения вращающейся волны для оптического и РЧ-поля и адиабатического исключения возбуждённого состояния. Получены аналитические выражения, описывающие амплитуды осцилляций коэффициента поглощения оптического поля на одинарной и удвоенной частоте РЧ-поля. Показано, что контур магнитного резонанса имеет структуры, связанные с динамическим и квадратичным эффектом Зеемана. Представлено аналитическое решение для случаев гармонической модуляции фазы РЧ-поля и его амплитуды периодической последовательностью импульсов в приближении малой частоты Раби РЧ-поля по сравнению со скоростью релаксации элементов матрицы плотности основного состояния.

Во второй Главе рассмотрен эффект когерентного пленения населённостей для случая двойной Λ -схемы уровней, интервал между уровнями основного состояния которой равен ω_g . Для оптического поля вида $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cdot \cos[\omega_0 t + a \cdot \sin(\Omega t + b \cdot \sin \omega_m t)]$, первые боковые полосы которого настроены на оптические переходы, в рамках аппарата и приближений, использованных в Главе 1, получены аналитические выражения для амплитуд осцилляций коэффициента поглощения оптического поля $\propto \cos \omega_m t$ (синфазный сигнал) и $\propto \sin \omega_m t$ (квадратурный сигнал). Задача обобщена на случай оптического поля с отличными по мощности первыми боковыми полосами. Для случая $b < 1$ при линейризации по двухфотонной расстройке частоты $\delta = 2\Omega - \omega_g$ получены аналитические выражения для сдвигов частот нулей сигналов. Показано, что их величины отличны в силу того, что резонанс когерентного пленения населённостей перестаёт быть чётной функцией δ ; что указанные сдвиги нелинейно зависят от интенсивности оптического излучения. Таким образом, найдено объяснение нетривиального экспериментального факта, согласно которому оптические спектры, обеспечивающие нулевой световой сдвиг, могут соответствовать разным значениям 2Ω .

Третья Глава диссертации посвящена исследованию причин возникновения асимметрии спектров излучения диодных лазеров с вертикальным резонатором в режиме СВЧ-модуляции тока инжекции. Показано, что в широко представленном в литературе феноменологическом подходе фазово-амплитудной модуляции монохроматического поля мощность каждой высокочастотной компоненты может быть либо больше, либо меньше мощности соответствующей низкочастотной компоненты. Этот результат идеализированной модели противоречит эксперименту.

Аналитическое решение для случая пяти полос излучения, полученное соискателем в подходе на основе уравнений макроскопической электродинамики, корректно описывает асимметрию спектров лазеров. Показано, что она возникает при учёте фактора амплитудно-фазовой связи R , отвечающего за асимметрию контура усиления, присущую диодным лазерам. При $R \neq 0$ происходит изменение фаз источников, формирующих боковые полосы излучения, что приводит к нарушению равенства $\mathcal{E}_k = \mathcal{E}_k^*$, имеющего место для $R = 0$.

В Заключении представлены основные результаты и выводы работы.

Новизна научных положений и результатов. Новизна научных результатов отражена в тексте диссертации и автореферата и заключается в следующем:

1. Впервые решена задача о двойном радиооптическом резонансе на переходе $F_g = 1 \rightarrow F_e = 1$, регистрируемым монохроматическим излучением эллиптической поляризации. Показано, что ориентационный сдвиг частоты резонанса, связанный с квадратичным эффектом Зеемана, можно уменьшить более чем на порядок за счёт модуляции амплитуды РЧ-поля периодической последовательностью импульсов.
2. Впервые рассмотрена задача об эффекте когерентного пленения населённостей в случае Λ -схемы уровней и поля вида $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cdot \cos[\omega_0 t + a \cdot \sin(\Omega t + b \cdot \sin \omega_m t)]$. Получены аналитические выражения для амплитуд синфазного и квадратурного сигналов и светового сдвига их частоты. Показано, что последний можно подавить в ограниченном интервале однородного уширения оптических переходов. Задача обобщена на случай двойной Λ -схемы уровней и неравных мощностей первых боковых полос оптического излучения. Установлено, что в такой ситуации частоты нулей сигналов становятся отличными, а также начинают нелинейно зависеть от интенсивности оптического излучения.
3. Впервые сопоставлены феноменологический подход описания спектров диодных лазеров в режиме СВЧ-модуляции тока инжекции и подход, основанный на уравнениях макроскопической электродинамики. Показано, что первый не позволяет описать наблюдаемую в эксперименте асимметрию спектров. В рамках второго подхода получено аналитическое решение, корректно передающее асимметрию спектров с пятью боковыми полосами излучения.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в следующем.

Установлено, что амплитуда второй гармоники двойного радиооптического резонанса на оптическом переходе $F_g=1 \rightarrow F_e=1$ падает с ростом величины измеряемого магнитного поля. Указанного эффекта можно избежать за счёт техники, предложенной соискателем, заключающейся в модуляции фазы РЧ-поля с частотой, равной частоте квадратичного зеемановского расщепления интервалов между соседними магнитными подуровнями состояния $F_g=1$. Продемонстрировано, что указанный переход позволяет получить магнитный резонанс с ориентационным сдвигом частоты, связанным с квадратичным эффектом Зеемана, эквивалентный изменению измеряемого магнитного поля меньше чем на 10 пТл.

Показано, что световой сдвиг частоты резонанса когерентного пленения населённостей можно подавить в ограниченном диапазоне однородного уширения оптических переходов. Таким образом установлена область давления буферного газа, которую следует использовать в газовых ячейках малогабаритных атомных часов. Показано, что отличие частот синфазного и квадратурного сигналов связано с асимметрией резонанса и его не следует использовать для контроля спектра полихроматического излучения, обеспечивающего нулевой световой сдвиг его частоты. Более предпочтительными являются техники, основанные на модуляции интенсивности излучения.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для разработки переносных магнитометров с оптической накачкой с малым ориентационным сдвигом частоты магнитного резонанса и для улучшения метрологических характеристик малогабаритных атомных часов на эффекте когерентного пленения населённостей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием современных методов математического моделирования и согласием полученных результатов с экспериментальными данными, полученными Лабораторией стандартов частоты Физического института академии наук им. П. Н. Лебедева на поверенном оборудовании.

Замечания по диссертационной работе:

1. Недостаточное внимание уделено обсуждению способов уменьшения скорости релаксации основного состояния атомов щелочных металлов: нанесению на внутренние стенки газовых ячеек антирелаксационных покрытий или напуск в них буферного газа.

2. Желательно более широкое освещение прикладных направлений, в которых используются исследуемые в работе физические эффекты.
3. На мой взгляд, восприятие результатов исследования многопараметрических систем улучшилось бы за счет дополнения пусть и упрощенной, но физически ясной картиной эффектов.
4. В первой главе при сравнении с экспериментом получено, что скорости релаксации недиагональных элементов матрицы плотности, описываемые феноменологическими константами Γ_1 и Γ_2 , различны ($2\pi \cdot 74$ и $2\pi \cdot 48$ Гц). Этот результат требует пояснения.
5. В некоторых выражениях, например (2.34) на странице 68, не указана область суммирования по индексу s . Оно, очевидно, производится от $-\infty$ до ∞ , так как в предыдущих выкладках используется разложение в комплексный ряд Фурье. Область суммирования следует указать в явном виде.

Перечисленные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию, были представлены на представительных конференциях и симпозиумах в России, а также на Международных конференциях, своевременно опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации.

Судя по автореферату и тексту диссертации, следует отметить логичность подхода автора к решению поставленных задач. К достоинствам диссертационной работы следует также отнести грамотное и корректное изложение полученных результатов.

Результаты диссертационной работы Цыганкова Евгения Александрович **можно классифицировать как решение важной научной задачи** в области теоретического исследования оптически детектируемых резонансов в многоуровневых атомах полями сложной временной конфигурации.

Заключение по диссертационной работе. Диссертация Е. А. Цыганкова «Магнитооптические резонансы в атомах щелочных металлов и в полихроматических полях» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Цыганков Евгений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 — Лазерная физика.

Официальный оппонент:

д. ф.-м. н. Крайнов Владимир Павлович,
профессор кафедры теоретической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ),

Российская Федерация, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ)

Тел. +7 (495) 408-45-54

e-mail: vpkrainov@mail.ru / Крайнов В. П. /

Крайнов

16.02.2029 г.

Подпись сотрудника Московского физико-технического института Крайнова Владимира Павловича удостоверяю:

Ученый секретарь
ФГАОУ МФТИ



Евсеев Евгений Григорьевич,

Российская Федерация, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ)

Тел. +7 (495) 576-41-77

e-mail: evseev.eg@mipt.ru

Список основных работ официального оппонента В. П. Крайнова по тематике защищаемой диссертации Е. А. Цыганкова «Магнитооптические резонансы в атомах щелочных металлов и в полихроматических полях» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. С. Н. Андреев, В. С. Беляев, А. П. Матафонов, В. П. Тараканов, Б. В. Загреев, В. П. Крайнов, С. А. Муханов, А. В. Лобанов, Численное моделирование выхода ядерных реакций $^{11}\text{B}(\text{p}, 3\alpha)$ и $^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})^{11}\text{C}$, инициируемые мощным пикосекундным лазерным излучением, ЖЭТФ, Т. 162, вып. 1(7), сс. 34-44 (2022)
2. А.М. Ишханян, В.П. Крайнов, Расчет спектра фоторекомбинации при облучении атомов сильным лазерным полем на основе марковского приближения, Оптика и Спектроскопия, Т. 130, вып. 4, сс. 474-476 (2022).
3. В. С. Беляев, А. П. Матафонов, С. Н. Андреев, В. П. Тараканов, В. П. Крайнов, В. С. Лисица, А. Ю. Кедров, Б. В. Загреев, А. С. Русецкий, Н. Г. Борисенко, А. И. Громов, А. В. Лобанов, Исследования выхода ядерной реакции $^{11}\text{B}(\text{p}, 3\alpha)$, инициируемой мощным пикосекундным лазерным излучением, Ядерная Физика, Т. 85, № 1, сс. 34-44 (2022).
4. В. С. Беляев, Б. В. Загреев, А. Ю. Кедров, А. Г. Кольчугин, В. П. Крайнов, А. П. Матафонов, Экспериментальное и теоретическое исследование распространения пучков протонов под действием лазерного излучения с учетом пересоединения магнитных силовых линий, ЖЭТФ, Т. 160, вып. 4(10), сс. 474-482 (2021).
5. A.I. Ishkhanyan, V.P. Krainov, The Markoff approximation for high harmonic generation during laser-atom interaction, Laser Physics Letters, Vol. 18, N 4, 046001 (2021).
6. В.С. Беляев, А.П. Матафонов, В.П. Крайнов, А. Ю. Кедров, Б.В. Загреев, А.С. Русецкий, Н.Г. Борисенко, А. И. Громов, А. В. Лобанов, В. С. Лисица, Совместные исследования ядерных реакций $^{11}\text{B}(\text{p}, 3\alpha)$ и $^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})^{11}\text{C}$ как метод определения абсолютного выхода альфа-частиц в пикосекундной лазерной плазме, Ядерная Физика, Т. 83, № 5, сс. 370-379 (2020).
7. Danis N. Yangaliev, Vladimir P. Krainov, and Oleg I. Tolstikhin, Quantum theory of radiation by nonstationary systems with application to high-order harmonic generation, Phys. Rev. A, V. 101, N 1, 013410 (2020).