

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
спектроскопии Российской академии
наук (ИСАН)

д.ф.-м.н., проф. В.Н. Задков
«07» 02 2024 г.

Отзыв ведущей организации

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

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Цыганкова Е.А. посвящена анализу возможностей улучшения метрологических характеристик переносных магнитометров на основе двойного радиооптического резонанса и малогабаритных атомных часов на эффекте когерентного пленения населённости.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 130 страниц с 22 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 134 наименования.

Во Введении приведён обзор использования атомов щелочных металлов для оптических методов измерения магнитных полей и построения стандартов частоты. В основе рассмотренных методов лежит лазерная спектроскопия атомных систем. На основе анализа литературных данных во Введении изложены актуальность темы исследования, степень её разработанности, а также сформулированы цель и задачи работы. Указаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные защищаемые положения и описан личный вклад соискателя.

В первой главе представлено теоретическое исследование двойного радиооптического резонанса на переходе между основным и возбуждённым состоянием $F_g = 1 \rightarrow F_e = 1$. Рассмотрено взаимодействие атомной системы с линейно-поляризованным излучением промодулированным радиочастотным (РЧ) полем. Использование аппарата атомной матрицы плотности в приближении вращающейся волны и малого насыщения по оптическому полю позволило получить аналитические выражения, описывающие амплитуду

первой и второй гармоник магнитного резонанса по частоте РЧ-поля. Показано, что резонанс имеет структуры, связанные с квадратичным и динамическим эффектом Зеемана. Рассмотрено обобщение при взаимодействии атомной системы с излучением эллиптической поляризации. Показано, что при таком взаимодействии частота магнитного резонанса может испытывать ориентационный сдвиг порядка 5 пТл в земном поле 0,5 Гс при значении коэффициента эллиптичности 1/100. Предложен подход, основанный на модуляции амплитуды РЧ-поля периодической последовательностью прямоугольных импульсов. Такой подход позволяет подавить структуру резонанса, связанную с квадратичным эффектом Зеемана и уменьшить величину ориентационного сдвига более чем на порядок.

Вторая глава посвящена исследованию возможности использования синфазного и квадратурного сигналов, формируемых при спектроскопии магнитонезависимого СВЧ-перехода атомов щелочных металлов, с целью подавления светового сдвига частоты резонанса, вызываемого при взаимодействии атомной системы с полихроматическим излучением. В основе рассмотренного подхода лежит отличие частот, при которых регистрируемые сигналы обращаются в ноль. Такой подход был ранее предложен в работе Уильяма Хаппера для случая двойного радиооптического резонанса, детектируемого с использованием монохроматического излучения. Соискателем была проверена гипотеза, что такой подход будет оправдан и в случае резонанса когерентного пленения населённостей. Для этого была рассмотрена Λ -схема уровней и фазово-модулированное оптическое поле. Модуляция оптического поля формирует спектр полихроматического излучения. Модуляция выбирается таким образом, что первые боковые спектральные компоненты оказываются в резонансе с оптическими переходами в Λ -схеме рассматриваемой атомной системы. В рассматриваемой модели получены аналитические выражения для амплитуд синфазного и квадратурного сигналов и светового сдвига их частот. Показано, что в такой ситуации отличия частот сигналов не происходит. Задача обобщена на случай двойной Λ -схемы уровней и асимметрии спектра полихроматического излучения. Установлено, что возникающая в такой ситуации асимметрия резонанса когерентного пленения населённостей приводит к отличию частот синфазного и квадратурного сигналов. К аналогичному эффекту приводит феноменологический учёт поглощения полихроматического излучения атомами щелочного металла, а также поперечная неоднородность оптического поля в случае отличной от нуля величины светового сдвига. Таким образом показано, что использовать отличие частот сигналов для подбора спектра излучения, обеспечивающего подавление светового сдвига частоты рабочего СВЧ-перехода атомов щелочных металлов, в общем случае нельзя.

В третьей главе исследуется вопрос асимметрии спектров излучения диодных лазеров с вертикальным резонатором в режиме СВЧ-модуляции тока инжекции. Асимметрия проявляется в отличии мощностей спектральных компонент, равноудалённых от несущей. Показано, что широко используемая

в литературе феноменологическая модель поля, одновременно испытывающего фазовую и амплитудную модуляцию на одинаковой частоте, обеспечивает «глобальную» асимметрию спектра излучения: мощность каждой высокочастотной спектральной компоненты больше, чем мощность соответствующей низкочастотной спектральной компоненты, либо наоборот. Такая ситуация не соответствует результатам экспериментальных исследований спектров, обладающих пятью или более спектральных компонент. Рассмотрен подход Богатова А.П. для расчёта спектров указанных излучателей, учитывающий компоненты электрического поля и концентрацию электронов в активной области лазера. Получено аналитическое решение для напряжённостей вторых боковых полос при учёте в спектре пяти спектральных компонент. Показано, что отношение их мощностей является функцией тока инжекции и имеет резонанс. Максимум отношения достигается при условии близости удвоенной частоты СВЧ-модуляции к частоте релаксационных колебаний. Эта особенность получила экспериментальное подтверждение. Из полученного решения следует, что асимметрия спектра излучения возникает при ненулевом факторе амплитудно-фазовой связи, который в свою очередь используется для учёта асимметрии контура усиления, имеющей место в диодных лазерах.

В Заключение перечислены основные результаты работы.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Результаты, представленные в диссертации Цыганкова Е.А., являются достоверными и обоснованными. Аналитические выражения, полученные в диссертационной работе, находятся в согласии с экспериментом, выполненным на сертифицированном научном оборудовании в Лаборатории стандартов частоты Троицкого обособленного подразделения ФИАН им. П.Н. Лебедева.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Полученные в работе результаты новы́ и имеют конкретную научную и практическую значимость. А именно:

1. Показано, что амплитуда второй гармоники двойного радиооптического резонанса падает с ростом измеряемого магнитного поля. Разработана техника, основанная на модуляции фазы РЧ-поля с частотой, соответствующей квадратичному зеемановскому расщеплению магнитных переходов основного состояния атомов щелочных металлов, позволяющая избежать этого эффекта. Это расширяет диапазон полей, которые можно измерять с помощью второй гармоники магнитного резонанса.

2. Установлено, в каком диапазоне однородного уширения оптических переходов Λ -схемы уровней может быть использован метод подавления светового сдвига частоты перехода между её основными состояниями, основанный на подборе спектра полихроматического излучения.

Уширение не должно превышать 0.428 величины интервала между нижними уровнями в случае использования фазово-модулированного оптического поля, первые боковые полосы которого настроены на оптические переходы Λ -схемы. Полученный результат позволил определить уровень давления буферного газа, который следует использовать в газовых кюветах с атомами щелочного металла в малогабаритных атомных часах, при котором можно достичь подавления светового сдвига частоты магнитонезависимого СВЧ-перехода.

3. Продемонстрировано, что частоты синфазного и квадратурного сигналов в общем случае нелинейно зависят от интенсивности оптического излучения. В такой ситуации подавление отклика частот сигналов на вариации интенсивности оптического излучения не обеспечивает подавление светового сдвига частоты перехода между уровнями основного состояния Λ -схемы. Показано, что использование высоких частот модуляции по сравнению с шириной перехода позволяет подавить его нелинейную часть сдвига, связанную с асимметрией спектра полихроматического излучения.

4. Установлено, что широко используемая в литературе феноменологическая модель оптического поля, одновременно испытывающего фазовую и амплитудную модуляцию на одинаковых частотах, не позволяет описать асимметрию спектров излучения диодных лазеров с вертикальным резонатором. Представлено аналитическое решение для случая пяти спектральных компонент в подходе, основанном на уравнениях макроскопической электродинамики и балансом уравнении для концентрации в активной области указанного типа лазеров. Оно корректно описывает экспериментально наблюдаемую асимметрию.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке переносных магнитометров с оптической накачкой с малым ориентационным сдвигом частоты и применены для улучшения метрологических характеристик малогабаритных атомных часов на эффекте когерентного пленения населённости.

Общая оценка работы

Диссертация Цыганкова Е.А. представляет завершённую научно-квалификационную работу высокого уровня. Диссертация написана понятным языком и хорошо структурирована. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.19 – «Лазерная физика». Автореферат корректно представляет общее содержание диссертации и полученные результаты. Результаты работы прошли апробацию на международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Замечания по работе

1. Для описания принципа работы магнитометра в первой главе диссертационной работы используется рисунок 1. Данный рисунок далёк от совершенства и не поясняет в полном объёме материал, изложенный в тексте

работы. Например, в случае, когда вектор электрического поля имеет угол θ с осью квантования «оптическое поле вызывает переходы $|F_g, m_{F_g} = \mp 1\rangle \rightarrow |F_e, m_{F_e} = \mp 1\rangle$ », как верно указано в диссертационной работе. Однако, данные переходы не отмечены на рисунке 1.

2. В диссертационной работе подробно изложен математический анализ, полученных выражений. Однако, не всегда является очевидным, для чего был проведён данный анализ. Например, анализ формы резонансной кривой второй гармоники магнитного резонанса (выражение 1.13). В тексте подробно описано при каких условиях возникают минимумы в структуре резонанса, но не понятно, что делать дальше с данной информацией. Это же справедливо и для последующих глав.

3. За подробным теоретическим рассмотрением, представленным в диссертационной работе, не всегда удаётся понять её значимость для экспериментального исследования. Так, при прочтении диссертационной работы, не остаётся не ясным вопрос, как проводить измерение магнитного поля с использованием предложенного магнитометра?

4. На рисунке 1.5 приведено сравнение использования модулированного и немодулированного РЧ-поля для детектирования магнитного резонанса. В случае использования модулированного РЧ-поля использовалось магнитное поле увеличенное в 17,3 раза. Для демонстрации преимуществ одного подхода перед другим необходимо было привести спектры, полученные при одинаковых значениях магнитного поля.

5. При рассмотрении модуляции тока лазера учитывается только амплитудно-фазовая модуляция (например, выражение 3.1). Не раскрытым является вопрос, приводит ли модуляция тока лазера к частотной модуляции? Этот процесс, по-видимому, учтён при детальном рассмотрении процесса модуляции излучения с использованием уравнений Максвелла.

Приведённые замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости её вклада для области лазерной спектроскопии щелочных металлов в приложении к малогабаритным атомным часам и магнитометрам с оптической накачкой.

Заключение

Диссертация Цыганкова Евгения Александровича «Магнитооптические резонансы в атомах щелочных металлов и в полихроматических полях» удовлетворяет требованиям к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и её автор, Цыганков Евгений Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Доклад Цыганкова Е.А. по материалам диссертации был заслушан и обсуждён на семинаре № 1149 Отдела лазерной спектроскопии ИСАН 31 января 2024 года. Отзыв подготовлен старшим научным сотрудником Лаборатории лазерной спектроскопии Отдела лазерной спектроскопии, кандидатом физико-математических наук Афанасьевым А.Е. и одобрен на заседании семинара № 1149 Отдела лазерной спектроскопии 31 января 2024 года.

Старший научный сотрудник Отдела лазерной спектроскопии Лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Афанасьев Антон Евгеньевич/

Председатель семинара:

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Отделом лазерной спектроскопии ИСАН, доктор физико-математических наук

/Рябов Евгений Артурович/

Подписи сотрудников ИСАН Афанасьева А.Е. и Рябова Е.А. заверяю.

Учёный секретарь ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Кильдиярова Римма Рифовна/



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5.

Телефон: +7 (495)851-05-79

E-mail: isan@isan.troitsk.ru

Список основных работ сотрудников ведущей организации Института спектроскопии РАН по тематике диссертации Е. А. Цыганкова «Магнитооптические резонансы в атомах щелочных металлов и в полихроматических полях» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Afanasiev, A. E., Kalmykov, A. S., Kirtaev, R. V., Kortel, A. A., Skakunenko, P. I., Negrov, D. V., & Balykin, V. I. Single-layer atom chip for continuous operation: Design, fabrication and performance. *Optics & Laser Technology*, 148, 107698 (2022).
2. Afanasiev, A. E., & Balykin, V. I. Zero ac Stark frequency shift of an atom trapped in pulsed laser light. *Quantum Electronics*, 51(3), 248 (2021).
3. Afanasiev A.E., Meysterson A.A., Mashko A.M., Melentiev P.N., Balykin V.I. Atom femto trap: experimental realization. *Applied Physics B*, v.126, 26 (2020) (Springer Nature SharedIt).
4. Afanasiev A.E., Mashko A.M., Meysterson A.A., Balykin V.I. Spectroscopy of atoms in an optical dipole trap using spectrally selective heating by a probe laser field. *Quantum Electronics*, v. 50, p. 206 (2020).
5. Afanasiev A.E., Mashko A.M., Meysterson A.A., Balykin V.I. Spectroscopy of Rubidium Atoms in a Femtosecond Pulsed Optical Dipole Trap. *JETP Letters*, 111, 608 (2020).