

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

Тема диссертации Цыганкова Евгения Александровича — поиск способов увеличения чувствительности квантовых магнитометров с оптической накачкой и улучшения стабильности частоты малогабаритных атомных часов, использующих эффект когерентного пленения населённости (КПН). В таких приборах используются стеклянные кюветы-ячейки с атомами щелочных металлов. Данная тематика стала особенно актуальной и востребованной в последние годы, когда полупроводниковые лазеры стали применяться в компактных стандартах частоты и магнитометрах. Переносные малогабаритные магнитометры используются в задачах геологоразведки, геофизики, для поиска неразорвавшихся снарядов, магнитных аномалий и археологического магнитного картирования. Недорогие малопотребляющие компактные стандарты частоты открывают новые области применения метрологии времени в военных и гражданских приложениях. Они позволяют повысить надёжность автономной навигации беспилотных подводных и летательных аппаратов, спутниковой передачи данных, донной сейсмологии, разведки месторождений в шельфовой зоне и многое другое. Для применения магнитометров и часов в более широком классе задач необходимо найти способы снижения абсолютной погрешности и повышения долговременной стабильности, которые, в основном, определяются ориентационным и световым сдвигом частоты используемых переходов.

Диссертационная работа Цыганкова Е. А. посвящена решению трёх связанных общим подходом и направлением задач. В первой части работы представлен теоретический анализ оптического перехода с полным моментом $F = 1$ в основном и возбуждённом состоянии щелочного атома, который можно использовать в магнитометре, свободном от ориентационного сдвига, вызванного квадратичным эффектом Зеемана. Вторая задача — исследование принципиальной возможности использования синфазного и квадратурного сигналов для подавления светового сдвига частоты резонанса когерентного пленения населённости. В диссертационной работе рассмотрено влияние на эти сигналы спектра полихроматического излучения, нелинейности накачки и поглощения света в оптически толстой ячейке. Третья задача — выяснение механизма асимметрии оптических спектров, вызванной СВЧ-модуляцией тока инжекции диодных лазеров, применяемых в малогабаритных часах, в работе Цыганкова Е. А. дано теоретическое объяснение наблюдаемой аномалии.

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 рассматривается обзор литературы в контексте развития магнитометров и стандартов частоты с оптической накачкой. Описывается принцип оптической накачки и оптического детектирования магнитного резонанса. Далее автор переходит к истории эффекта когерентного пленения населенностей, и обзору ключевых технологий, позволивших создать малогабаритные атомные часы. В характеристике работы обоснована её актуальность, приведена её цель, задачи, новизна и значимость, а также приведены защищаемые положения.

В первой главе представлено теоретическое исследование магнитооптического резонанса на переходе с моментом $F = 1$ в основном и возбужденном состоянии атомов, выполненное с помощью аппарата атомной матрицы плотности. Магнитный резонанс вызывается радиочастотным полем, оптическая накачка осуществляется линейно-поляризованным светом. Решение находится разложением элементов матрицы плотности в ряд методом теории возмущений. Свет накачки выступает также в качестве детектирующего. Сигнал поглощения оказывается модулированным, причем на удвоенной частоте регистрируется единственный двухквантовый резонанс. Подробно исследовано влияние радиочастотного сдвига и квадратичного эффекта Зеемана на структуру резонанса. Установлено, что даже незначительная эллиптичность поляризации света накачки приводит к заметному ориентационному сдвигу частоты. Показано, что этот сдвиг можно значительно уменьшить в схеме с амплитудной модуляцией радиочастотного поля последовательностью прямоугольных импульсов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена эффекту когерентного пленения населенностей уровней сверхтонкой структуры, возбуждаемому полихроматическим излучением. В первой части рассмотрено поле вида $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cos[\omega_0 t + a \cdot \sin(\Omega t + b \cdot \sin \omega_m t)]$, спектральные компоненты боковых полос которого, разнесенные на удвоенную частоту модуляции Ω , вызывают Λ -резонанс просветления. Модуляция с частотой ω_m приводит к синфазному $\sim \cos \omega_m t$ и квадратурному сигналу $\sim \sin \omega_m t$ коэффициента поглощения. Эти сигналы используются для стабилизации частоты Ω . С помощью аппарата атомной матрицы плотности получены аналитические выражения для амплитуд синфазного и квадратурного сигналов в зависимости от глубины модуляции. Найдено, что при некотором значении индекса фазовой модуляции частота перехода между уровнями основного состояния Λ -схемы не зависит от интенсивности света, то есть влияние его вариаций на частоту резонанса подавлено. Учет вклада парциальных световых сдвигов от высших компонент спектра модуляции показал, что полный световой сдвиг может быть подавлен только при не слишком большом уширении оптических переходов. Этот результат ограничивает величину давления буферного газа, при котором световой сдвиг можно подавить выбором индекса модуляции, что задаёт

минимальный размер ячеек малогабаритных часов, обеспечивающих высокую долговременную стабильность.

Во второй части главы рассматривается реальная модель двойной Λ -схемы уровней, описывающая переходы в атоме рубидия с учетом сверхтонкой структуры возбужденного состояния, введена в рассмотрение асимметрия спектра модуляции оптического излучения. Показано, что асимметрия спектра модуляции приводит к несовпадению точки обнуления синфазного и квадратурного сигналов, которая как предполагалось ранее другими авторами, может быть использована для измерения светового сдвига в ячейке с поглощением. Далее при рассмотрении оптически толстой ячейки было найдено, что поглощение излучения приводит к несовпадению нулей синфазного и квадратурного сигналов. Получен вывод, что разность синфазного и квадратурного сигналов не может, в общем случае, быть мерой только светового сдвига, и соответственно, использоваться для стабилизации частоты.

В третьей главе диссертации представлено сравнение общепринятых моделей, описывающих модуляционные спектры диодных лазеров с вертикальным резонатором при СВЧ-модуляции тока, с экспериментальными данными. Показано, что известные модели не описывают тип асимметрии, который наблюдается в эксперименте. Рассмотрен подход на основе нелинейных уравнений, описывающих взаимодействие компонент поля с активной средой лазера. Аналитическое решение с учетом пяти компонент поля позволило адекватно описать наблюдаемую асимметрию спектров излучения лазеров. Отношение мощностей вторых боковых компонент в зависимости от тока инжекции имеет резонансную зависимость, определяемую условием совпадения частоты релаксационных колебаний с удвоенной частотой модуляции.

В Заключении представлены выводы и основные результаты.

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

1. Впервые теоретически описан магнитооптический резонанс на переходе с моментом $F = 1$ в основном и возбужденном состоянии атомов. Получены аналитические выражения, показывающие влияние РЧ-сдвига и нелинейного эффекта Зеемана на его структуру.
2. Впервые решена задача о когерентном пленении населённостей в случае двойной Λ -схемы уровней с учетом асимметрии спектра полихроматического излучения и модуляции, обеспечивающей в коэффициенте поглощения наличие синфазного и квадратурного сигналов. Получены аналитические выражения, показывающие, что в общем случае частоты сигналов нелинейно зависят от интенсивности излучения.
3. Впервые показаны существенные отличия результатов феноменологического описания асимметрии спектров излучения диодных лазеров с вертикальным резонатором в режиме СВЧ-модуляции тока инжекции от результатов подхода, основанного на уравнениях макроскопической электродинамики.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в следующем. Показано, что оптический переход с моментом $F = 1$ в основном и возбужденном состоянии атомов позволяет получить магнитный резонанс, ориентационный сдвиг частоты которого не превышает 10 пТл в пересчете на величину измеряемого магнитного поля. Для малогабаритных атомных часов установлена область давлений буферного газа, в которой можно подавить световой сдвиг частоты резонанса пленения населенностей за счет вариации спектра полихроматического излучения. Установлено, в каком случае синфазный и квадратурный сигнал могут быть использованы для подавления светового сдвига. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для улучшения метрологических характеристик переносных магнитометров с оптической накачкой и малогабаритных атомных часов на эффекте когерентного пленения населенностей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием признанных теоретических подходов, современных методов математического расчета и сравнения результатов исследований с данными авторов, полученными в рамках других подходов

Замечания по диссертационной работе:

1. На стр.18 указано, что “разность энергий крайних подуровней линейно зависит от магнитного поля”. Следует указать, для какой величины магнитного поля справедливо это приближение.
2. На стр.19 утверждается, что чувствительность магнитометра пропорциональна количеству используемых атомов. Необходимо указать, при каких условиях это справедливо.
3. На Рис.1.1 на стр.20 приводится геометрия полей и переходы между уровнями. Направление волнового вектора световой волны не указано.
4. Стр.23–24 в постановке задачи необходимо отметить, каков механизм релаксации из возбужденного состояния и его влияние на вид уравнений.
5. На рис.1.3 (кривая II) на стр.31 приведены значения скорости релаксации когерентностей основного состояния $\Gamma_1 \sim 71$ Гц и $\Gamma_2 \sim 47$ Гц. Стоит пояснить, в чем причина различия скоростей релаксации, какой вклад в релаксацию даёт оптическая накачка.
6. На стр.54 следует пояснить тип релаксации возбужденного состояния и правила отбора для релаксационных переходов из возбужденного состояния в основное, определяющие вид уравнений (2.2b и 2.2c).
7. Уравнения (2.2) на стр. 56 не включают релаксацию в основном состоянии, СТС-структуру основного и возбужденного состояний. Это следовало бы отметить явно при выводе уравнений, указав, что эти вопросы будут рассмотрены в данной работе позже.

8. На стр.62 введена релаксация Γ_0 уровней когерентности основного состояния. Эта величина описывает полевое уширение, а не релаксацию, и при малой интенсивности накачки может быть произвольно мала. Стоит пояснить, по какому критерию выбирается оптимальная частота Раби, и соответственно частота модуляции и индекс фазовой модуляции, от которых зависит ширина резонанса КПН.
9. На стр.75 обсуждается вопрос выбора давления смеси газов, исходя из минимума ширины линии, то есть из кратковременной стабильности. Минимальная ширина линии не обеспечивает лучшую долговременную стабильность. Температурная, долговременная стабильность сигнала КПН связана с выбором состава газа и его давления, оптимизирующего коэффициент поглощения света в ячейке заданного размера.
10. Задача оптимизации долговременной стабильности зависит от множества параметров, и возможно, не имеет однозначного решения. Представляет интерес дать оценку долговременной стабильности малогабаритных часов при вариации основных параметров, рассмотренных в работе: интенсивности света накачки, и индекса модуляции тока лазера при оптимальных условиях.

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.

Автореферат и текст диссертации написаны хорошим языком, прослеживается логика и единый подход автора к решению поставленных задач. К достоинствам диссертационной работы следует отнести грамотное изложение полученных результатов, методичность и ясность.

Результаты диссертационной работы Цыганкова Евгения Александровича **можно классифицировать как решение важной научной задачи** в области многофакторного анализа долговременной стабильности стандартов частоты на основе эффекта КПН и методов экспериментальной реализации результатов исследований.

Заключение по диссертационной работе. Диссертация Цыганкова Евгения Александровича «Магнитооптические резонансы в атомах щелочных металлов и в полихроматических полях» является законченной научно-квалификационной работой. Представленная диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук («Положение о присуждении ученых степеней», утвержденное Постановлением Правительством РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 18.03.2023) и специальности 1.3.19 — Лазерная физика, а ее автор — Цыганков Евгений Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 — Лазерная физика.

Официальный оппонент:

к. ф.-м. н., Пазгалёв Анатолий Серафимович,
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образования науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе» Российской академии наук, кандидат физико-математических наук, лаборатория атомной радиоспектроскопии отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики, Российская Федерация, 194021, Ленинградская область, город Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Федеральное государственное бюджетное образование науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе» Российской академии наук

Тел. +7(904) 556-23-62, +7 (812) 297-31-04

e-mail: anatoly.pazgalev@mail.ioffe.ru

/ Пазгалёв А. С./

20.02.2024 г.

Подпись Пазгалёва Анатолия Серафимовича удостоверяю:

Учёный секретарь
ФГБУН ФТИ им. А. Ф. Иоффе,



Патров Михаил Иванович

Российская Федерация, 194021, город Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

тел.

+7(812) 297-22-45

e-mail:

Michael.Patrov@mail.ioffe.ru

Список основных работ официального оппонента А. С. Пазгалёва 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. K.A. Barantsev, A.N. Litvinov, A.S. Pazgalev, A.K. Vershovskii. Laser Pumping of Alkali Atoms in Conditions of Conservation of the Nuclear Spin State in Collisions in a Gas Cell //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2022. – Т. 134. – №. 5. – С. 560-569.
2. M.V. Petrenko, A.S. Pazgalev, A.K. Vershovskii. Quantum optical magnetic field sensor for neurodiagnostic systems of a new generation //Quantum Electronics. – 2022. – Т. 52. – №. 2. – С. 119.
3. M.V. Petrenko, A.S. Pazgalev, A.K. Vershovskii. Single-beam all-optical nonzero-field magnetometric sensor for magnetoencephalography applications //Physical Review Applied. – 2021. – Т. 15. – №. 6. – С. 064072.
4. K.A. Barantsev, A.N. Litvinov, A.S. Pazgalev, A.K. Vershovskii. Counterpolarization of an Ensemble of Alkaline Atoms during Optical Pumping: Study with Allowance for Atomic Motion //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2021. – Т. 132. – С. 189-199.
5. A.K. Vershovskii, S.P. Dmitriev, G.G. Kozlov, A.S. Pazgalev, M.V. Petrenko. Projection spin noise in optical quantum sensors based on thermal atoms //Technical Physics. – 2020. – Т. 65. – С. 1193-1203.
6. V.I. Petrov, A.S. Pazgalev, A.K. Vershovskii. Isotope shift of nuclear magnetic resonances in ^{129}Xe and ^{131}Xe caused by spin-exchange pumping by alkali metal atoms //IEEE Sensors Journal. – 2020. – Т. 20. – №. 2. – С. 760-766.