

На правах рукописи

ПОДВЯЗНЫЙ Алексей Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ
РАДИООПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ
МЕТАЛЛОВ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

Специальность: 01.04.03 - РАДИОФИЗИКА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Семенов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты:

- кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Плешаков Иван Викторович

- доктор технических наук, профессор Полянский Владимир Александрович

Ведущая организация:

Российский институт радионавигации и времени, Санкт-Петербург

Защита состоится «30» ноября 2006 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29, II учебный корпус, ауд. 470а.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « ____ » _____ 200 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01,
доктор технических наук

Коротков А.С.

Общая характеристика работы

Настоящая работа, выполненная автором в 2001 – 2006 годах, посвящена исследованию влияния нерезонансных компонент света накачки на энергетическую структуру сверхтонкого расщепления в постоянном магнитном поле основного состояния щелочных атомов, используемых в промышленных квантовых дискриминаторах с оптической накачкой. Проведены экспериментальные и теоретические исследования световых сдвигов частоты основных рабочих переходов. Результаты работы позволили оценить величину светового сдвига частоты радиооптического резонанса в атомах исследуемых щелочных металлов; динамику его поведения в зависимости от изменения параметров света накачки, параметров рабочих ячеек и воздействующих на них радиополей и другие аспекты, связанные с проблемой световых сдвигов.

Актуальность темы. Одной из основных проблем, возникающих при разработке как атомных стандартов частоты, так и квантовых парощелочных магнитометров с оптической накачкой, являются погрешности измерения рабочей частоты, вызванные так называемыми световыми сдвигами линии радиооптического резонанса. При использовании ординарных спектральных ламп в качестве источников накачки наибольший вклад в погрешности подобных устройств вносит действие нерезонансных компонент спектра накачки, вызывающее оптический Штарк-эффект в поле световой волны. Теория этого эффекта, развитая в фундаментальных работах В. Хэппера, показывает, что наблюдаемый в экспериментах с парами щелочных атомов световой сдвиг частоты радиооптического резонанса содержит в своем составе три компоненты – скалярную, векторную и тензорную, весовой вклад которых определяется типом магнитодипольного перехода в основном состоянии щелочного атома. Так, например, применительно к атомным стандартам частоты с оптической накачкой, скалярная компонента светового сдвига наблюдается на СВЧ магнитодипольных переходах между состояниями сверхтонкой структуры с разными значениями квантового числа F , характеризующего полный момент атома. Векторная и тензорная компоненты светового сдвига проявляются в квантовых парощелочных магнитометрах, работающих на частоте зеемановских переходов между соседними

магнитными подуровнями основного состояния атомов в условиях действия циркулярно-поляризованного света накачки. При этом в зависимости от знака поляризации света векторная компонента может либо вычитаться, либо складываться с тензорной составляющей, знак которой не зависит от направления поляризации излучения накачки.

До настоящего времени в приложениях практиковалась рекомендация всемерного снижения темпа накачки, позволяющая предельно уменьшить суммарный световой сдвиг и связанное с ним возмущение резонансной частоты квантового дискриминатора. Однако при этом происходит существенное снижение его вариационной чувствительности, максимальное значение которой соответствует темпам накачки, сравнимым со скоростью темновой релаксации атомов рабочего вещества. Возможность взаимной компенсации компонент светового сдвига позволяет рассчитывать на разумный компромисс, сочетающий минимальную погрешность измерений с достаточно высокой дискриминирующей способностью устройства. Это может быть достигнуто в случае соизмеримых величин компонент светового сдвига, раздельное определение которых применительно к зеемановскому резонансу в оптически ориентированных атомах до сих пор не проводилось.

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы является аналитическая и экспериментальная оценка векторной и тензорной компонент светового сдвига частоты радиооптического резонанса, а также выявление роли подобных сдвигов в формировании линии поглощения, наблюдаемой в парах щелочных металлов на СВЧ магнитодипольных переходах в условиях действия эффекта когерентного пленения населенностей (КПН).

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в следующем:

1. Применительно к оптически ориентированным парам цезия и рубидия впервые показана возможность взаимной компенсации тензорной и векторной компонент светового сдвига частоты радиооптического резонанса при различных режимах оптической накачки излучением лампового спектрального источника. Использование результатов исследований в приложениях позволяет существенно

снизить дестабилизирующее действие света накачки на положение спектральной линии квантового устройства без потери его вариационной чувствительности.

2. В условиях действия эффекта КПН при сверхтонкой оптической накачке щелочных паров получены новые значения оптимального темпа оптической релаксации, при котором достигается максимум крутизны дискриминаторной характеристики наблюдаемого сигнала поглощения. Впервые экспериментально и теоретически продемонстрировано отсутствие светового сдвига частоты резонансного сигнала на многоквантовых переходах. Полученные результаты могут быть использованы при разработке СТС магнитометров без систематических погрешностей.

Основные положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В четырехуровневой модели атомов щелочных металлов с ядерным спином $\frac{3}{2}$, для которой три нижних магнитных подуровня ($i = 1, 2, 3$) принадлежат полному моменту $F = 1$ основного состояния, а четвертый верхний ($i = 4$) является эквивалентом пяти магнитных подуровней с $F = 2$, в сигнале радиочастотного КПН-резонанса, индуцируемого в условиях сверхтонкой оптической накачки светом спектральной лампы двумя СВЧ радиополями с равными интенсивностями на переходах $i = 1 \leftrightarrow i = 4$ и $i = 3 \leftrightarrow i = 4$,

а) отсутствует световой сдвиг резонансной частоты многоквантовых переходов вне зависимости от амплитуды приложенных радиополей и темпа оптической и тепловой релаксации;

б) при фазовом детектировании сигнала в условиях периодического сканирования резонансных условий имеет место существенное отличие по сравнению с двухуровневой моделью оптимальных значений темпа накачки и амплитуды радиополей, при которых реализуется максимум дискриминирующей способности сигнала. В частности, этот максимум достигается в условиях одновременной модуляции постоянного магнитного поля и интенсивности света накачки, но с удвоенной, относительно первой, частотой, что принципиально не наблюдается в классической двухуровневой модели атома при магнитном резонансе.

2. В оптически ориентированных парах щелочных металлов (стабильных изотопах цезия, рубидия и калия) при оптической накачке D_1 и D_2 линиями головного дублета от лампового источника для наиболее интенсивного магнитодипольного перехода в основном состоянии с наибольшим значением квантового числа F (характеризующего полный момент атома) векторная и тензорная компоненты светового сдвига частоты радиооптического резонанса проявляют себя следующим образом:

- а) при равных интегральных интенсивностях света накачки в изотопах калия, в сравнении с атомами рубидия и цезия, наблюдается значительный перевес векторной компоненты над тензорной для линии накачки D_2 , в случае же оптической накачки атомов рубидия и цезия линией D_2 – обе компоненты соизмеримы по величине;
- б) выбором знака поляризации излучения спектрального источника можно существенно (более чем на порядок) уменьшить абсолютную величину интегрального светового сдвига за счет взаимной компенсации векторной и тензорной компонент, причем максимум этой взаимной компенсации достигается в случае оптической накачки линией D_1 .

Приоритет результатов. Основные результаты, по которым сформулированы научные положения, получены впервые.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона»: конференции «Технические науки – промышленности региона» и «Инновационный менеджмент наукоемких разработок», СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, февраль, 2002г.
2. Зимняя молодежная школа-конференция «МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ», СПбГУ, г. Санкт-Петербург, декабрь, 2004г.
3. Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона», СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, февраль, 2005г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 статьи, 3 доклада и публикации тезисов на конференциях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 153 страницы машинописного текста, в том числе 8 таблиц и 35 рисунков. Список литературы содержит 122 наименования.

Основное содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность задачи, рассмотренной в диссертации, определены методы, подлежащие анализу, кратко изложено содержание диссертации и выдвинуты защищаемые положения.

Первая глава содержит обзор существующих методов оптической накачки и их приложений в квантовой магнитометрии и технике образцовых мер частоты.

Несомненный приоритет метод оптической накачки получил в атомной физике как универсальный радиоспектроскопический способ исследования тонких физических процессов, связанных с изучением сечений спинового обмена и констант релаксации, межатомных взаимодействий, квадрупольных моментов атомов. Однако, помимо чисто академического использования, этот метод нашел широкое применение и при создании многих приборов квантовой электроники.

Наибольшее прикладное значение метод оптической накачки приобрел в технике квантовых магнитометров и образцовых мер частоты.

Эталонными на сегодняшний день образцами квантовых магнитометров с оптической накачкой признаны щелочно-гелиевые устройства и прецизионные схемы M_{χ} типа на изолированных сверхузких линиях оптически ориентированных паров калия.

Для наиболее распространенного в приложениях метода оптической регистрации магнитного резонанса главными задачами при создании прецизионных квантовых устройств являются предельное уменьшение влияния света накачки на резонансную частоту устройства и разработка практических рекомендаций к выбору оптимальных параметров используемых электромагнитных полей, при которых обеспечивается максимум крутизны дискриминаторной характеристики наблюдаемого сигнала.

В известных публикациях, посвященных проблеме повышения стабильности частоты квантовых парощелочных дискриминаторов, прослеживается сугубо эмпирический подход к поиску новых схемных решений (например, упомянутые ранее варианты импульсной и зонной накачки), позволяющих либо ослабить, либо исключить дестабилизирующее действие резонансного излучения. При этом совершенно игнорируется тот факт, что световой сдвиг имеет сложную многокомпонентную структуру, выявление которой в эксперименте позволяет обнаружить новые возможности улучшения прецизионных свойств квантовых датчиков.

В последние годы опубликовано большое количество работ, посвященных эффекту когерентного пленения населенностей (КПН), который связан с существованием особого суперпозиционного состояния квантовой системы при воздействии на нее двумя электромагнитными полями. Детальное аналитическое исследование этого явления на различных атомных моделях нашло прикладное воплощение в сверхминиатюрных атомных часах. Определенные перспективы эффект КПН имеет и в квантовой магнитометрии, в частности, при создании СТС магнитометров, работающих на так называемой линии темного резонанса. Вопросам оптимизации дискриминаторной характеристики таких линий посвящена одна из глав диссертационной работы.

В заключение первой главы определены поставленные диссертационной работой задачи.

Во второй главе приводятся результаты расчета относительного вклада тензорной и векторной компонент светового сдвига в оптически ориентированных изотопах цезия, рубидия и калия, представляющие прикладной интерес для радиоспектроскопии, в условиях оптической накачки D_1 и D_2 линиями головного дублета от лампового спектрального источника. Для указанных щелочных атомов вычислялись диагональные матричные элементы оператора светового сдвига, определяющие смещение энергоподуровней сверхтонкой структуры между состояниями с разным значением полного момента F , и оценивалось значение светового сдвига для наиболее интенсивного магнитодипольного перехода в состоянии с наибольшим значением F между магнитными подуровнями $m_F = F$ и

$m_F = F - 1$. В основе методики расчетов использовался аппарат поляризационных моментов.

Элементы матрицы оператора светового сдвига определялись из формулы:

$$dE = -\frac{1}{8}|E|^2(e^* \alpha e + e \alpha^+ e^*),$$

где $|E|^2$ – интенсивность света накачки,

e – комплексный вектор поляризации света накачки (подчиняющийся условию нормировки $ee^* = e^*e = 1$),

α – тензор поляризуемости атомной среды.

Затем были рассчитаны спектральные плотности составляющих светового сдвига частоты для соответствующих рангов тензора поляризуемости α .

$$D_{H_s} = \frac{1}{h} \left(\langle F m_F | dE | F m_F \rangle - \langle F' m_F' | dE | F' m_F' \rangle \right)$$

где $\Delta\nu_s$ – спектральная плотность векторной и тензорной составляющих светового сдвига (для рангов α равных соответственно 1 и 2),

h – постоянная Планка,

F и m_F – соответственно квантовые числа, определяющие величину полного момента атома и проекции магнитного момента атома на направление магнитного поля.

Спектральный профиль накачки лампового источника описывался суммой четырех доплеровских контуров для D_1 линии и шестью доплеровскими контурами для линии D_2 . Составляющие светового сдвига в герцах определялись из формулы:

$$dH = Q_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} D_{H_s} \varrho(H) dH,$$

где $\delta\nu$ – интегральное значение светового сдвига,

$\Phi(\nu)$ – спектральный профиль накачки лампового источника,

Q_0^2 – тензор поляризации, равный $\frac{1}{\sqrt{6}}$ для неполяризованного света,

распространяющегося вдоль вектора постоянного магнитного поля.

Были получены расчетные значения векторной и тензорной компонент светового сдвига для температуры спектральной лампы накачки 400°K . Интенсивности D_1 и D_2 линий накачки принимались равными 100 мкВт/см^2 .

Кроме того, исследовалась динамика поведения компонент светового сдвига для линий D_1 и D_2 при красном и фиолетовом смещениях, вызванных изменением давления аргона и гелия, выступающих в качестве буферных газов.

В конце главы сформулированы основные выводы: о соизмеримости компонент светового сдвига в атомах рубидия (кроме резонансной накачки для линии D_1), калия (кроме линии накачки D_2) и цезия; о возможности взаимной компенсации компонент светового сдвига в случае оптической накачки линией D_1 ; о значительном превалировании векторной компоненты над тензорной для линии накачки D_2 , что диктует использование маломощных источников накачки для калиевых магнитометров; о возможности значительного уменьшения светового сдвига при оптимальном выборе давления соответствующего буферного газа.

В третьей главе рассматриваются результаты аналитического исследования четырехуровневой модели сверхтонкого расщепления атомов щелочных металлов.

В существующих парощелочных квантовых дискриминаторах с оптической накачкой используются различные способы создания неравновесного распределения населенностей в структуре магнитных подуровней атомов рабочего вещества. Наиболее распространенными являются способ оптической ориентации с помощью циркулярно-поляризованного света накачки, а также метод сверхтонкой оптической накачки, практикуемый в рубидивых эталонах на газовой ячейке с изотопической фильтрацией резонансного излучения. В последнем случае в качестве селектирующего элемента используется ячейка-фильтр с изотопом Rb^{85} , позволяющая выделить соответствующие компоненты в спектре накачки от лампы с изотопом Rb^{87} и осуществить преимущественное заселение магнитных

подуровней, принадлежащих полному моменту атома с $F = 2$. Действие нерезонансных спектральных компонент света накачки при этом проявляется в увеличении энергетического зазора между состояниями щелочного атома с $F = 1$ и $F = 2$ (скалярная составляющая светового сдвига), величина которого зависит от температуры ячейки-фильтра, а также интенсивности и спектрального профиля контура накачки. Применительно к изотопу Rb^{87} величина светового сдвига достигает весьма существенных значений, если в качестве источника накачки непосредственно (минуя ячейку-фильтр) использовать спектральную лампу с изотопом Rb^{85} . Несмотря на довольно высокое отношение сигнал-шум, столь заметное влияние света накачки на резонансную частоту не позволяет использовать метод изотопической накачки в традиционных схемах рубидиевых квантовых дискриминаторов, где индуцирование магнитодипольных переходов между состояниями с разным значением полного момента осуществляется одним радиополем.

Совершенно иная ситуация складывается, если квантовый дискриминатор работает на частоте так называемого темного резонанса, физическую основу которого составляет эффект когерентного пленения населенностей (КПН). В классической трехуровневой модели атомов эффект КПН наблюдается при их взаимодействии с двумя близкими по частоте электромагнитными полями, индуцирующими переходы между верхним удаленным энергетическим подуровнем и двумя нижними близко расположенными долгоживущими подуровнями. При этом, в окрестности нулевой расстройки используемых полей относительно резонансного значения в оптическом спектре линии флуоресценции наблюдается характерный провал, ширина которого при определенных условиях может быть значительно меньше естественной ширины линии, определяемой временем жизни верхнего состояния. Последнее обстоятельство указывает на целесообразность использования КПН и в радиодиапазоне, в частности, в парощелочных квантовых дискриминаторах, работающих на частоте магнитодипольных переходов между магнитными подуровнями сверхтонкой структуры.

Как показано в этой главе, может быть реализована ситуация, когда влияние светового сдвига частоты на сигнал радиооптического резонанса полностью отсутствует вне зависимости от амплитуды приложенных полей и констант оптической и тепловой релаксации.

Задача решалась аналитически в формализме матрицы плотности и приближении оптически тонкого слоя применительно к четырехуровневой модели атома рубидия-87, у которого три нижних магнитных подуровня принадлежат полному моменту с $F = 1$ основного состояния, а четвертый верхний является эквивалентом пяти магнитных подуровней с $F = 2$. При этом предполагалось, что действие света накачки приводит к перезаселению трех нижних магнитных подуровней за счет верхнего четвертого и увеличению энергетического зазора между состояниями сверхтонкой структуры по линейному закону с ростом интенсивности света. В практике радиооптического резонанса подобная ситуация имеет место, например, для вышеназванного случая сверхтонкой оптической накачки атомов рубидия-87 светом от спектральной лампы с изотопом рубидий-85.

Исследуемая модель рассматривалась с учетом присутствия, помимо двух вышеупомянутых СВЧ-полей, еще одного низкочастотного радиополя, связывающего близко расположенные уровни, что отличается от описанных в литературе четырехуровневых моделей с одним «холостым» уровнем, являющимся резервуаром оттока атомов в цикле оптической накачки.

Модель атомов щелочного металла описывается системой дифференциальных уравнений для матрицы плотности при различных возможных комбинациях радиочастотных полей, индуцирующих магнитодипольные переходы между магнитными подуровнями основного состояния.

В общем виде уравнения для матрицы плотности можно записать следующим образом:

$$i \frac{dc_{mn}}{dt} = [H, c]_{mn} - i(\Gamma c)_{mn}$$

Оператор релаксации $(\Gamma\rho)_{mn} = (\Gamma_m + \Gamma_n)\rho_{mn}/2$, где $\Gamma_i = \gamma$ – скорость тепловой релаксации для $i = 1, 2, 3$ (состояния с $F = 1$); $\Gamma_i = \gamma + \Gamma$, где Γ – скорость оптической релаксации $i = 4$ (состояния с $F = 2$).

Последнее выражение содержит систему из шестнадцати дифференциальных уравнений, четыре из которых описывают эволюцию населенностей, а остальные двенадцать – для недиагональных элементов матрицы плотности – являются уравнениями движения когерентностей в рассматриваемой атомной модели.

В этой главе приводятся результаты решения системы уравнений для различных модификаций темного резонанса, причем как для сигналов постоянного тока фотодетектора, так и для сигналов широко используемой модуляционной методики регистрации. Кроме того, рассмотрено поведение сигнала при разбалансе амплитуд двух приложенных СВЧ-полей.

В заключение главы представлены основные выводы исследования: отсутствие влияния светового сдвига на сигнал темного резонанса на двухквантовом переходе вне зависимости от амплитуды приложенных радиополей и темпа оптической и тепловой релаксации; имеет место значительное отличие по сравнению с двухуровневой моделью оптимальных значений темпа накачки и амплитуды радиополей, при которых реализуется максимум дискриминирующей способности сигнала (в частности, этот максимум достигается в условиях одновременной модуляции постоянного магнитного поля и интенсивности света накачки, но с удвоенной, относительно первой, частотой, что принципиально не наблюдается в классической двухуровневой модели атома при магнитном резонансе).

Четвертая глава. Экспериментальная апробация аналитических исследований, представленных в предыдущих главах, была выполнена на многофункциональной установке, на которой проводились измерения параметров сигнала радиооптического резонанса при одновременном использовании различных радиополей как на низкой частоте, так и в СВЧ диапазоне.

Работа установки осуществлялась в двух режимах: 1) широкополосное детектирование сигнала для оценки его величины и 2) регистрация сигнала в узкой полосе с помощью избирательного усилителя на частоте низкочастотной модуляции постоянного магнитного поля, в котором находилась рабочая ячейка,

или частоты рабочего перехода для точной регистрации резонансной частоты методом фазового детектирования.

С помощью экспериментального макета были измерены величины векторной и тензорной компонент светового сдвига для атомов Cs^{133} и Rb^{87} при 50 %-ном ослаблении интенсивности излучения накачки. При этом было показано, что погрешности, связанные с изменением формы неразрешенного контура линии поглощения при смене знака поляризации света накачки, необходимого для измерения векторной составляющей, в условиях проводимого эксперимента – незначительны, поскольку измерения проводились в условиях магнитного экранирования. Полученные экспериментальные данные согласуются с выводом аналитического исследования, описанного во второй главе.

Проведенные измерения позволяют сделать однозначный вывод о соизмеримости (по порядку величины) вклада векторной и тензорной компонент в интегральный световой сдвиг, что позволяет (управлением интенсивностью D_1 и D_2 линий с помощью интерференционных фильтров) получить эффективную их компенсацию и таким образом улучшить прецизионные свойства квантовых дискриминаторов на оптически ориентированных щелочных парах.

Также описаны результаты измерений радиочастотного и оптического уширений зеемановского резонанса и резонанса на магнитонезависимом $0-0$ переходе, необходимые для оценки поведения формы сигнала темного резонанса в зависимости от изменения температуры ячейки-фильтра, интенсивности света накачки и мощности приложенных СВЧ-полей.

В завершение приведено экспериментальное подтверждение основного вывода аналитического исследования об отсутствии светового сдвига радиооптического СВЧ-резонанса на многоквантовых переходах в условиях действия эффекта КПН.

В заключении приводятся основные результаты работы.

Основные результаты и выводы.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Проведено аналитическое исследование зеемановских световых сдвигов частоты радиооптического резонанса в щелочных атомах на основе квантового формализма поляризационных моментов ориентации и выстраивания в

сверхтонкой структуре основного состояния. Вычислены компоненты светового сдвига частоты на магнитонезависимых и наиболее интенсивных магнитодипольных переходах в атомах Rb^{87} , Rb^{85} , K^{39} , K^{41} и Cs^{133} в условиях резонансной и изотопической оптических накачек. Проведен анализ поведения компонент светового сдвига при изменении давления буферного газа (аргона и гелия) в рабочей ячейке. Проведено сопоставление компонент светового сдвига частоты в оптически ориентированных парах щелочных металлов.

2. На основе формализма матрицы плотности и приближения оптически тонкого слоя проведен расчет четырехуровневой модели атома рубидия-87, у которого три нижних магнитных подуровня принадлежат полному моменту с $F = 1$ основного состояния, а четвертый верхний является эквивалентом пяти магнитных подуровней с $F = 2$. Рассматривалось поведение этой модели в условиях действия эффекта КПН при воздействии двух близко расположенных по частоте радиополей для различных модификаций темного резонанса. Отмечены: отсутствие влияния светового сдвига частоты на сигнал темного резонанса и совершенно иные оптимальные, с точки зрения крутизны дискриминаторной характеристики в области нулевой расстройки частоты, значения темпа накачки и амплитуд приложенных радиополей по сравнению с классической двухуровневой моделью.

3. Произведен монтаж опытной установки, включающий сборку и настройку оптического тракта и систем магнитных катушек, а также отладку СВЧ-части и волноводного тракта. С ее помощью отработана методика, и осуществлены измерения зеемановских компонент светового сдвига в парах Rb^{87} и Cs^{133} ; отработана методика, и осуществлено снятие ориентационной зависимости сигнала; в стандартной схеме оптической накачки с изотопической фильтрацией паров Rb^{87} проведено исследование поведения светового сдвига частоты сигнала радиооптического резонанса на магнитонезависимом $0-0$ переходе в зависимости от изменений интенсивности света накачки и температуры ячейки-фильтра; получен сигнал темного резонанса и подтвержден основной вывод аналитического исследования об отсутствии светового сдвига частоты в сигнале радиооптического резонанса в условиях действия эффекта КПН.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Подвязный А.А., Саканцев А.А., Семенов В.В. О зеемановском световом сдвиге частоты радиооптического резонанса в оптически ориентированных изотопах щелочных металлов. // Известия ВУЗов. Физика. – Томск, 2003. – Т. 46. – № 9. – с. 75-78.
2. Подвязный А.А., Семенов В.В., Ермак С.В. Многочастотный радиооптический резонанс в четырехуровневой модели атомов рубидия с оптической накачкой // Журнал Прикладной Спектроскопии, 2006 . – Т. 73. – № 3. – с. 326-329.
3. Ермак С.В., Подвязный А.А., Семенов В.В. Об индуцировании радиооптического темного резонанса в четырехуровневой модели щелочных атомов с оптической накачкой // Известия ВУЗов. Физика. – Томск, 2006. – Т. 49. – № 8.
4. Подвязный А.А. Исследование нерезонансного светового сдвига частоты на сверхтонких переходах основного состояния щелочных атомов. // Материалы семинаров Политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона». – Санкт-Петербург, Издательство СПбГТУ, 2002. – с. 18.
5. Подвязный А.А., Семенов В.В., Ермак С.В. Создание и исследование квантового вариометра на радиооптическом резонансе для контроля флуктуаций геомагнитного поля. // Труды Зимней молодежной школы-конференции «МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ». – СПб, СПбГУ, 2004. – с. 136-138.
6. Подвязный А.А. Об индуцировании радиооптического темного резонанса в четырехуровневой модели щелочных атомов с оптической накачкой. // Материалы семинаров Политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона». – Санкт-Петербург, Издательство СПбГТУ, 2005. – с. 81-82.