

На правах рукописи



Баранов Алексей Анатольевич

**Ориентационные световые сдвиги частоты СВЧ радиооптического
резонанса в парах щелочных металлов с селективной
оптической накачкой**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель – **Семёнов Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры квантовой электроники ФГАОУ ВО
«СПбПУ»

Официальные оппоненты: **Полянский Владимир Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой высшей математики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный университет гражданской
авиации» (ФГБОУ ВО «СПбГУ ГА»)

Шакин Олег Васильевич,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Физико-
технический институт имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук» (ФГБУН «ФТИ им.
А.Ф. Иоффе»)

Ведущая организация – Акционерное общество "Российский институт радионавигации и времени" (АО «РИРВ»), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится “27” сентября 2016 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.238.08 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте университета eltech.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д.212.238.08.

Автореферат разослан “4 ” июля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.238.08,

Кандидат технических наук, доцент



Смирнов Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Световой сдвиг энергетических подуровней, вызванный взаимодействием атомов с электромагнитным полем накачки, является одним из основных источников погрешности прецизионных измерительных устройств квантовой электроники. К таким устройствам, в частности, относятся стандарты частоты (КСЧ) и магнитометры с оптической накачкой, основным рабочим веществом которых являются атомы щелочных металлов. Конкретный выбор рабочего вещества в таких устройствах определяется областью их использования. Так, например, в квантовой магнитометрии предпочтение отдаётся изотопам калия, отличительной особенностью которых проявляется в существенной неэквидистантности магнитных подуровней в геомагнитном поле. Это позволяет выделить сверхузкие линии магнитного резонанса и использовать их для точных измерений внешнего магнитного поля и его вариаций. В технике атомных стандартов частоты традиционно используются изотопы цезия и рубидия.

В основе принципа работы подобных устройств лежит метод двойного радиооптического резонанса (ДРОР), заключающийся в одновременном воздействии на рабочий образец двух электромагнитных полей – оптического диапазона, создающего оптическую ориентацию атомов, и зондирующего поля радиодиапазона. Данный метод получил широкое распространение после открытия А. Кастлером эффекта оптической накачки и изобретения Ф. Биттером оптического детектирования магнитного резонанса.

Дальнейшие исследования в этой области позволили решить целый ряд задач по миниатюризации конструкции квантовых приборов, в основном, за счёт отказа от СВЧ-резонатора, открывая новые перспективы их применения, как в военных, так и в гражданских целях: на автономных объектах, беспилотных летательных аппаратах и спутниках, в местах, где синхронизация по внешнему корректирующему, высокостабильному сигналу не представляется возможной.

Разработка подобных устройств и фундаментальные исследования вызвали интерес к лазерным источникам накачки, имеющих достоинства высокого к.п.д. преобразования энергии и гибкости управления их спектральным составом. Стабилизация параметров лазерного излучения является одной из основных задач данного направления, поскольку любые флуктуации температуры и тока источника влекут за собой изменение интенсивности, частоты и моды

излучения, что, неизбежно, приводит к возникновению светового сдвига в квантовых устройствах. Проблема сохранения поляризации лазером особенно ярко проявляется в экспериментах с циркулярно-поляризованным светом, как например, в атомных часах на краевом резонансе, в которых из соображений увеличения контраста линии поглощения применяется указанный тип оптического возбуждения щелочных атомов.

Теория световых сдвигов, изложенная в фундаментальной работе В. Хаппера, показывает, что наблюдаемый в экспериментах с парами щелочных атомов световой сдвиг частоты радиооптического резонанса содержит в своём составе три компоненты - скалярную, векторную и тензорную, весомой вклад которых зависит от спектрального состава источника накачки и определяется типом магнитодипольного перехода в основном состоянии щелочного атома. Скалярная компонента светового сдвига $\Delta\nu_0$ не зависит от определяемого углом θ ориентации вектора магнитного поля относительно направления света накачки, в то время как для векторной $\Delta\nu_V$ и тензорной $\Delta\nu_T$ компонент подобная зависимость имеет место, что накладывает жёсткие требования фиксации этого угла в случае, когда значения $\Delta\nu_T$, $\Delta\nu_V$ и $\Delta\nu_0$ оказываются соизмеримы по величине.

Подобная ситуация типична для варианта ламповой оптической накачки паров рубидия спектральной компонентой D_1 - линии головного дублета, где расщепление возбуждённого состояния для атомов Rb^{87} превышает ширину линии поглощения и обеспечивает ведущую роль тензорной компоненты в интегральном световом сдвиге частоты радиооптического резонанса, и, как следствие – ориентационную зависимость частоты наблюдаемого резонанса.

Проблема светового сдвига при использовании лазерных источников накачки решена путём частотной модуляции линии излучения лазера относительно линии атомного перехода. Однако, как это показано в настоящей диссертации, нулевые значения светового и ориентационного сдвигов частоты достигаются при различных значениях расстройки частоты лазера, вне зависимости от типа щелочного атома и номера D-линии головного дублета. При этом, ориентационная погрешность для линии D_2 в изотопе Rb^{85} оказывается на порядок меньше, чем в атомах Rb^{87} и значительно меньше, в сравнении с ориентационной погрешностью обоих изотопов при оптической накачке линией D_1 . Этот результат имеет определенное значение при технической реализации эффекта когерентного пленения населённостей (КПН), где, из соображений усиления контраста резонанса, отдадут предпочтение лазерной накачке паров рубидия и

цезия на оптических переходах D_1 -линии, что, в свою очередь, неизбежно, приводит к проблемам ориентационной погрешности устройства.

При разработке малогабаритных атомных часов с лазерной накачкой возникает проблема минимизации ширины линии наблюдаемого резонанса, связанная с требованием увеличения плотности рабочего вещества для получения достаточно надёжного сигнала в миниатюрной поглощающей ячейке. Оригинальный способ борьбы со спинобменным уширением линии рабочего перехода связан с применением краевого магнитозависимого радиооптического резонанса. Однако, несмотря на существенный выигрыш в факторе качества подобного сигнала в сравнении с традиционным на $0-0$ переходе, вопрос о неизбежном ориентационном сдвиге частоты усугубляется присутствием векторной компоненты светового сдвига.

Целью диссертационной работы является изучение ориентационной зависимости светового сдвига частоты радиооптического резонанса в различных щелочных атомах в условиях оптической накачки ламповым и лазерным источниками, применительно как к СВЧ магнитонезависимым переходам, так и к краевым резонансам.

Научная новизна. В работе впервые обнаружена и исследована ориентационная составляющая светового сдвига в атомных дискриминаторах на парах щелочных металлов, практикуемых в технике квантовых стандартов частоты. Так, например, несмотря на относительно слабую зависимость частоты $0-0$ перехода от абсолютного значения внешнего магнитного поля, требование обеспечения постоянства угла θ между направлением света накачки и вектором внешнего магнитного поля оказывается абсолютно необходимым в условиях использования квантового дискриминатора на движущихся и вращающихся носителях. Как показано в диссертационной работе, в условиях ламповой оптической накачки паров рубидия с изотопическим фильтром, вариация угла θ в один градус даёт такое же относительное смещение резонансной частоты атомного перехода (10^{-12}), что и 30% изменение рабочего магнитного поля напряженностью 0.8 А/м. При использовании лазерных источников накачки, удаётся реализовать нулевые значения светового и ориентационного сдвигов частоты рабочего перехода, но при различных значениях частотной расстройки лазера.

Практическая значимость. Результаты проведенных в диссертационной работе исследований позволяют сделать вывод, что стабильность частоты квантового дискриминатора радикальным образом зависит от ориентации вектора рабочего магнитного поля, относительно оптической оси устройства, причем это высказывание справедливо как

для краевого, так и для магнитонезависимого 0-0 перехода в парах щелочных металлов. Таким образом, требование обеспечения постоянства этого угла является абсолютно необходимым в условиях работы квантового дискриминатора вне стационарных объектов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. В условиях лазерной оптической накачки паров Rb^{87} D_2 -линией головного дублета, ориентационный сдвиг частоты радиооптического СВЧ резонанса на 0-0 переходе между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атомов существенно превышает его значение, наблюдаемое при той же мощности света накачки лампового источника.
2. При использовании изотопического фильтра минимум ориентационного и светового сдвига частоты радиооптического СВЧ резонанса на 0-0 переходе в парах Rb^{87} достигается при различных спектрах накачки лампового источника.
3. Абсолютные значения ориентационного светового сдвига радиооптического СВЧ резонанса на 0-0 переходе в щелочных парах Rb^{87} , Rb^{85} и Cs^{133} зависят от величины разрешения энергоструктуры возбужденного состояния атомов и пропорциональны значению ядерного спина щелочного изотопа.
4. Введение модуляции частоты лазера накачки позволяет подбором индекса и частоты модуляции осуществить одновременное опускание значений светового и ориентационного сдвигов частоты радиооптического СВЧ резонанса.
5. При лазерной оптической ориентации паров Rb^{87} D_2 -линией головного дублета векторная компонента, может быть скомпенсирована скалярной составляющей светового сдвига при σ^+ поляризации света накачки.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертационной работы доложены на следующих международных конференциях:

1. Международный симпозиум по вопросам частоты, Новый Орлеан, США, 2016 (IEEE International Frequency Control Symposium 2016, New Orleans, Louisiana, USA, 2016).
2. 12-ая международная школа-конференция "Spinus 2015 - Магнитный резонанс и его приложения", Санкт-Петербург, 2015, ноябрь.
3. Восьмой симпозиум по вопросам стандартов частоты и метрологии, Потсдам, Германия, 2015 (8th Symposium on frequency standards and metrology, Potsdam, Germany).
4. Европейский форум по вопросам частоты и времени, Невшатель, Швейцария, 2014 (European Frequency and Time Forum EFTF, Neuchatel, Switzerland, 2014).

5. Объединённый американско-европейский симпозиум по контролю частоты и времени, Прага, Чешская республика, 2013 (Joint IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency Time Forum, Prague. Czech Republic, 2013).
6. Европейский форум по вопросам частоты и времени, Гётеборг, Швеция, 2012 (European Frequency and Time Forum EFTF, Gothenburg, Sweden, 2012).
7. VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО – 2012), Санкт-Петербург, Россия.
8. Объединённый американско-европейский симпозиум по контролю частоты и времени, Сан-Франциско, Калифорния, США, 2011 (Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum 2011, San Francisco, California, USA).
9. 40-ая международная научно-практическая конференция «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ», 2011.
10. 39-ая международная научно-практическая конференция «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ», 2010.
11. 38-ая международная научно-практическая конференция «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ», 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в т.ч.: 7 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, из них 7 статей в научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 8 статей по теме проведенного исследования в других журналах и материалах российских и международных научно-технических конференций, 3 патента на различные изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, одного приложения и списка цитируемой литературы из 73 наименований. Материалы работы изложены на 119 страницах, включая 27 рисунков, 1 таблицу.

Краткое содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи. Приведены защищаемые положения, изложены основные результаты работы, их новизна и практическая ценность.

В первой главе изложены физические основы принципа оптической накачки и метода двойного радиооптического резонанса (ДРОР), и их применения в квантовой магнитометрии и технике атомных стандартов частоты. Детально проанализированы современные направления развития метода ДРОР на примере эффекта когерентного

пленения населенностей с использованием лазерных источников накачки. Приведён обзор методов подавления светового сдвига частоты ДРОР и перспективы повышения стабильности квантовых генераторов с оптической накачкой. Первый раздел заканчивается постановкой задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводится математический аппарат поляризационных моментов, позволяющий установить спектральный отклик атомов рабочего вещества на действие монохроматического источника накачки. Теоретически определены зависимости различных компонент светового сдвига частоты ДРОР применительно к оптической накачке лазерным источником и с использованием принципа изотопической фильтрации в условиях накачки спектральной лампы.

Как известно, воздействие электромагнитного поля на среду приводит к появлению в правой части уравнения Шрёдингера оператора светового сдвига δE , который применительно к щелочным атомам выражается в форме (1).

$$\delta E = \delta E_0 + \delta A I J - \sum_F \mu \delta H(F_g) + \sum_F \delta E'(F_g), \quad (1)$$

где δE_0 описывает смещение частоты оптического перехода, впервые обнаруженное в экспериментах с лазерной оптической накачкой, $\delta A I J$ – оператор сверхтонкого взаимодействия, (A – его постоянная, I и J – соответственно операторы ядерного и электронного угловых моментов), $\mu \delta H$ – оператор взаимодействия магнитного дипольного момента атома μ с эффективным магнитным полем δH , наводимым в среде циркулярно-поляризованным излучением накачки (явление, известное как обратный эффект Фарадея). $\delta E'$ – тензорная компонента оператора светового сдвига, связанная с эффектом выстраивания атомов щелочного металла в основном состоянии (образования в результате оптической накачки противоположных по знаку поляризаций в состояниях сверхтонкой структуры с разным значением полного момента атома). Суммирование в этой формуле проводится по значению полного момента атома F_g в основном состоянии.

В щелочных атомах тензорная поправка мала, однако, в рубидии и цезии, где сверхтонкая структура возбуждённого состояния сопоставима с шириной линии поглощения, её следует принимать во внимание.

Графическая интерпретация перечисленных компонент светового сдвига для щелочных атомов с $I=3/2$ выглядит следующим образом (Рисунок 1).

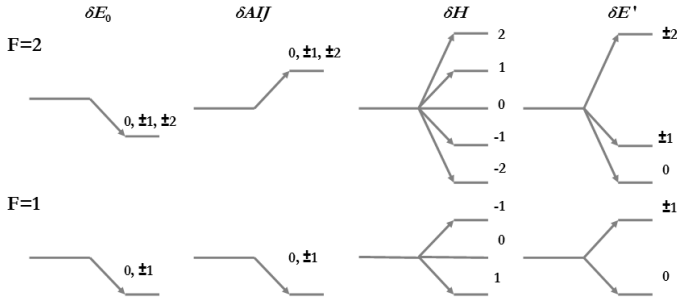


Рисунок 1 - Графическая интерпретация компонент светового сдвига для щелочных атомов с $I=3/2$. Цифрами на этой схеме отмечены значения проекций полного момента атома на выделенное направление (направление магнитного поля).

Оператор $\delta A I J$ вызывает сдвиг в сверхтонких переходах основного состояния. Поскольку невозмущенное расщепление уровней в основном состоянии $1/2A(2I+1)$, можно записать следующие выражения:

$$\delta v_{hfs} = \frac{1}{2} \delta A (2I + 1) = \int_0^{\infty} S_{hfs}(\nu) \Phi(\nu) d\nu \quad (2)$$

$$S_{hfs}(\nu) = -\frac{\lambda^2 r_0 f}{2\pi h c} \left(\frac{M c^2}{2RT} \right)^{1/2} \text{Re} [\zeta^0(aa) - \zeta^0(bb)] \quad (3)$$

$$\zeta^0(F_g F_g) = 2 \sum_{F_e} (2F_e + 1) W^2(J_e I F_g; F_e \frac{1}{2}) Z(F_e F_g) \quad (4)$$

Где $Z(F_e F_g)$ представляет собой доплеровски уширенную резонансную линию поглощения, выраженную в терминах плазма-дисперсионной функции.

$$Z(F_e F_g) \equiv Z[x(F_e F_g) + iy] \quad (5)$$

$$x(F_e F_g) = \frac{1}{\nu} \left(\frac{M c^2}{2RT} \right)^{1/2} \{ [\nu - \nu_{cg}] - [\nu(F_e F_g) - \nu_{cg}] \} \quad (6)$$

$$y = \left(\frac{M c^2}{2RT} \right)^{1/2} \left(\frac{1/2\tau + \gamma_c}{2\pi\nu} \right) \quad (7)$$

При малом давлении буферного газа, параметр уширения y имеет пренебрежимо малое значение. Так, например, для паров Rb^{87} при комнатной температуре $y=10^{-3}$. Для ячеек с парафиновым покрытием, этот параметр можно считать нулевым.

Эффективное магнитное поле, наводимое в среде циркулярно-поляризованным светом, определяется следующим выражением.

$$\delta H(F_g, \nu) = \frac{\lambda^2 r_0 f}{16\pi g_J \mu_0} \left(\frac{M}{2RT} \right)^{1/2} [11 - 4J_e(J_e + 1)] \text{Re} \xi(F_g F_g) \quad (8)$$

$$\xi(F_g, F_g) = \frac{\sum_{F_e} (-1)^{F_e - F_g} (2F_e + 1) W(11F_g, F_g; 1F_e) W^2\left(J_e F_e \frac{1}{2} F_g; 11\right) Z(F_e, F_g)}{W\left(F_g, 11\frac{1}{2}; F_g, \frac{1}{2}\right) W\left(11J_e \frac{1}{2}; 1\frac{1}{2}\right)} \quad (9)$$

где

В изотопах Rb^{87} и Cs^{133} различные компоненты светового сдвига сопоставимы по величине, при этом векторная и тензорная компоненты играют существенную роль в характере проявления светового сдвига при изменении ориентации оптической оси квантового дискриминатора относительно направления рабочего магнитного поля.

$$\delta\nu_i = E_0^2 \int_0^\infty S_i(\nu) \Phi(\nu) d\nu \quad (10)$$

$$S_T = -\frac{2\pi}{hc} (1 - 3\cos^2 \theta) \sum_{F_g} \sqrt{5} \left\{ \frac{3m_e^2 - F_g(F_g + 1)}{\left[(2F_g + 3)(F_g + 1)(2F_g + 1)F_g(2F_g - 1) \right]^{1/2}} \right\} \text{Re} A^2(F_g, F_g) (-1)^{J+1/2-F_g} \quad (11)$$

$$\text{где } A^2(F_g, F_g) = \frac{3\lambda^2 f_0 f_{gc}}{4\pi^2} \left[\frac{Mc^2}{2RT} \right] (2F_g + 1) \sum_{F_e} (2F_e + 1) W(11F_g, F_g; 2F_e) W^2\left(J_e F_e \frac{1}{2} F_g; 11\right) Z(F_e, F_g) (-1)^{F_e - F_g - 1} \quad (12)$$

Где $W(11F_g, F_g; 2F_e)$ - коэффициенты Рака, θ - угол между направлением света накачки и вектором магнитного поля. Величина E_0^2 - тензор поляризации, равный

$$E_0^2 = 1/\sqrt{6} - \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) |e_z|^2 \quad (13)$$

Поскольку в D_2 -линии расщепление возбуждённых уровней щелочных атомов значительно меньше, чем в D_1 , тензорная компонента проявляется здесь в меньшей степени. На рисунке 2 представлены примеры спектральных откликов скалярной, векторной и тензорной компонент светового сдвига, применительно к D_1 -линии Cs^{133} .

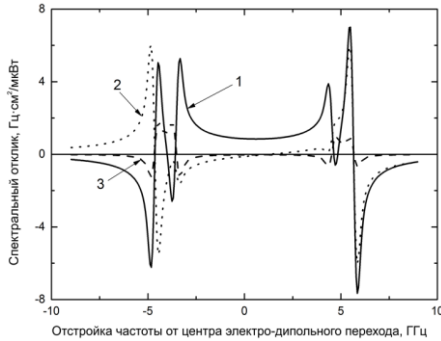


Рисунок 2 - Компоненты светового сдвига энергетических уровней атомов Cs^{133} для случая поглощающей ячейки с антирелаксационным покрытием.

1 – скалярная компонента, 2 – векторная компонента, 3 – тензорная компонента.

Таким образом, из рисунка следует, что все три компонента светового сдвига сопоставимы по величине и, при определённых параметрах оптической накачки, создаются условия для их взаимной компенсации.

В третьей главе дано описание экспериментальной установки и методики исследования ориентационного сдвига частоты радиооптического резонанса для различных режимов спектрально-селективной оптической накачки паров Rb⁸⁷.

Эксперименты были выполнены на лабораторном макете квантового дискриминатора, функциональная схема которого (Рисунок 3) содержит известный набор составных элементов, используемых в технике квантовых стандартов частоты на газовой ячейке. При детектировании сигнала радиооптического резонанса использовалась стандартная методика синхронного детектирования и автоподстройка частоты опорного кварцевого генератора под резонансное значение.

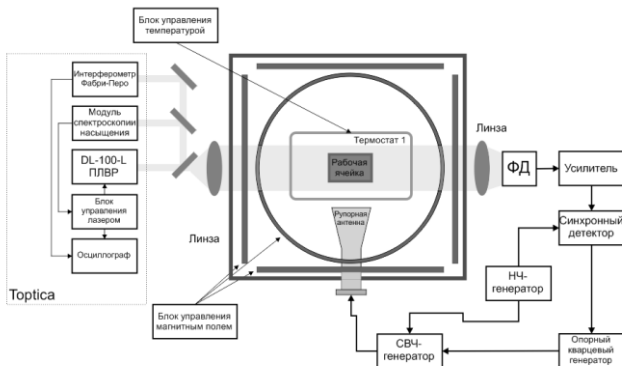


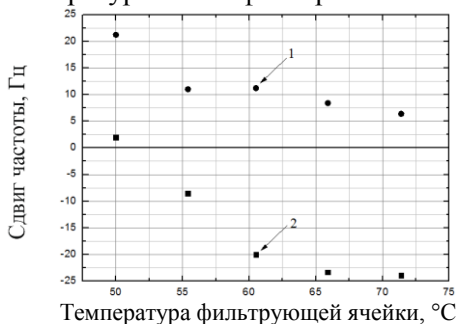
Рисунок 3 - Экспериментальная установка для регистрации светового сдвига в парах Rb⁸⁷ в условиях лазерной накачки.

В случае ламповой оптической накачки с применением изотопического фильтра световой сдвиг регистрировался частотомером при фиксированном изменении интенсивности света накачки с помощью нейтрального и интерференционного фильтров и изменении угла ориентации рабочего магнитного поля (~ 1 мкТл) от $\theta = 0^\circ$ до $\theta = 90^\circ$. При этом было обнаружено, что ни при каком значении температуры ячейки фильтра не удаётся получить нулевой ориентационный сдвиг частоты, что иллюстрирует значимость тензорной компоненты D_1 линии накачки даже в варианте её значительного ослабления относительно линии D_2 . Для выявления оптимального спектра накачки, при котором ориентационный сдвиг частоты 0-0 перехода сведён к минимуму, были измерены и рассчитаны

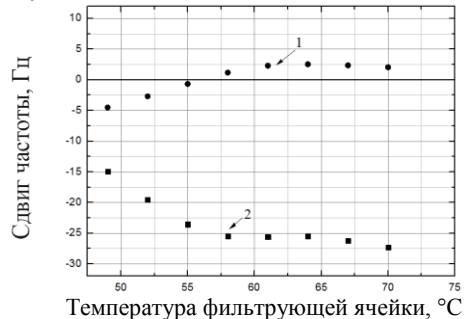
спектры накачки, аппроксимируемые суммой доплеровских контуров с различным весовым вкладом компонент D_1 и D_2 при постоянной интегральной интенсивности источника 100 мкВт/см^2 . В результате, было обнаружено несоответствие требований, предъявляемых к составу спектральных компонент лампового источника, при которых одновременно реализуется минимум как светового, так и ориентационного сдвига резонансной частоты на 0-0 переходе.

В случае оптической накачки лазером, настроенным на один из переходов D_2 -линии, ориентационный сдвиг частоты существенно превышает его значение, наблюдаемое при той же интегральной интенсивности света накачки ламповым источником. При этом обращает на себя внимание то обстоятельство, что ориентационный световой сдвиг имеет место при нулевом суммарном световом сдвиге частоты, соответствующего настройке лазерного источника на резонансную частоту атомного перехода.

Проведённые эксперименты и расчёты позволяют подтвердить в ориентационном сдвиге резонансной частоты 0-0 перехода существенную роль тензорной компоненты светового сдвига, как в случае ламповой, так и лазерной накачки. В эксперименте с ламповым источником при использовании интерференционных фильтров можно лишь ослабить (но не исключить) влияние этой компоненты, что позволяет существенно уменьшить ориентационный световой сдвиг 0-0 перехода. Так, например, как показал расчёт, соотношение интенсивностей линий накачки D_1 и D_2 , как 1 к 20, приводит к десятикратному ослаблению ориентационного сдвига в диапазоне температур ячейки фильтра $60 - 70^\circ\text{C}$ (Рисунок 4б).



а



б

Рисунок 4 - Световые и ориентационные сдвиги частоты 0-0 резонанса в условиях оптической накачки газоразрядной лампой с естественной смесью компонент D_1 и D_2 (а), и при соотношении компонент D_1 и D_2 , как 1 к 20 (б).

Пример экспериментальной зависимости светового и ориентационного сдвигов от температуры фильтрующей ячейки для случая ламповой оптической накачки представлен на рисунке 5а. В экспериментах с лазерной оптической накачкой использовался полупроводниковый лазер с внешним резонатором. Ширина линии лазера составляла 500 кГц, а мощность излучения – 5 мВт. Пример регистрации частоты ДРОП показан на рисунке 5б.

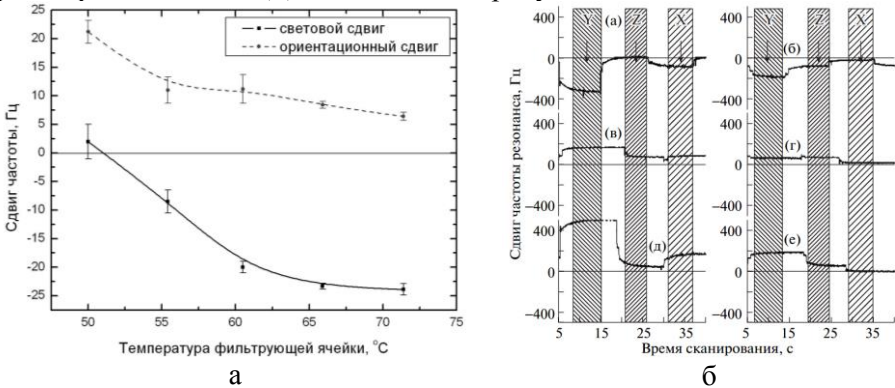


Рисунок 5 - Пример экспериментальной зависимости светового и ориентационного сдвигов от температуры фильтрующей ячейки для случая ламповой оптической накачки (а, слева) и при различных расстройках частоты лазера относительно линии атомного перехода (б, справа): – 280 (а, б), 0 (в, г), 280 МГц (д, е). а, в, д – $H_{СВЧ}$ в плоскости YZ; б, г, е – $H_{СВЧ}$ в плоскости YX.

В четвёртой главе представлены способы подавления ориентационного сдвига частоты СВЧ резонанса в атомах щелочных металлов с лазерной накачкой. Один из них – модуляционная методика – представляет собой развитие известного метода подавления светового сдвига. В качестве объекта исследований были выбраны изотопы рубидия, калия и цезия, наиболее часто используемые в практике радиооптического резонанса. Расчёты проводились по методикам, изложенным во второй главе. При этом контур спектра лазерной накачки аппроксимировался доплеровскими контурами с весовыми множителями, пропорциональными квадрату функции Бесселя частотно модулированного спектрального источника.

Для указанных щелочных атомов рассчитывался световой и ориентационный сдвиги частоты в условиях лазерной накачки линиями D_1 и D_2 с подуровней сверхтонкой структуры основного состояния атомов с полным моментом F и $F+1$ для различных частот и индексов модуляции.

На рисунке 6а представлены зависимости светового и ориентационного сдвигов частоты (в функции частотной расстройки лазера) при сверхтонкой оптической накачке D_2 линией из основного состояния щелочных атомов с полным моментом $F+1$ немодулированным источником накачки. Эффект подавления светового и ориентационного сдвига иллюстрирует рисунок 7б, где представлены соответствующие зависимости для атомов Rb^{87} в условиях лазерной накачки линиями D_2 с подуровней сверхтонкой структуры основного состояния атомов с полным моментом $F=2$. Представленные зависимости соответствовали параметрам лазерного источника накачки с линейной поляризацией выходного излучения, мощностью 100 мкВт/см^2 при ширине спектра излучения 10 МГц . Ориентационный сдвиг частоты определялся при изменении угла между направлениями света накачки и постоянного магнитного поля на 90° .

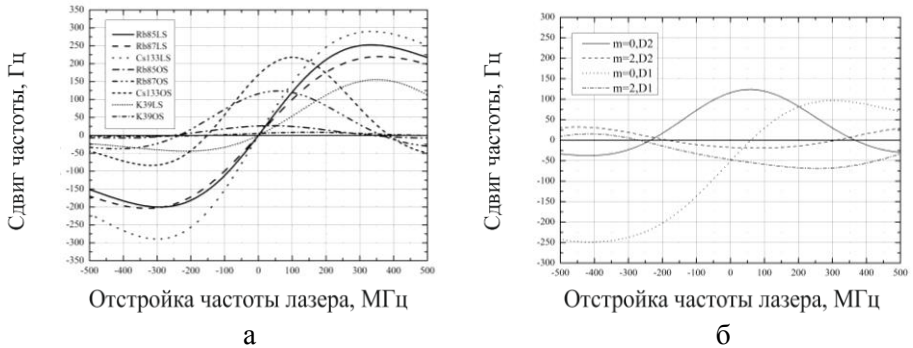


Рисунок 6 - Зависимости светового и ориентационного сдвигов частоты (в функции частотной расстройки лазера) при сверхтонкой оптической накачке D_2 линией из основного состояния щелочных атомов с полным моментом $F+1$ (а) немодулированным источником накачки и при индексе модуляции, равным 2 в парах Rb^{87} (б).

Таким образом, введение модуляции частоты лазера накачки, вследствие модификации его спектра, позволяет значительно уменьшить как величину, так и крутизну зависимостей светового и ориентационного сдвигов в функции расстройки частоты лазера. При одинаковых индексах модуляции эффект ослабления светового и ориентационного сдвигов проявляется в различной степени в зависимости от величины ядерного спина щелочного атома, значения его полного момента в основном состоянии и выбора спектральной линии накачки. Подбором соответствующего индекса модуляции можно реализовать совпадение частотной расстройки лазера, при которой одновременно и световой и ориентационный сдвиг частоты достигает нулевого значения.

Во второй части четвёртой главы представлены результаты исследования световых сдвигов частоты краевого резонанса в атомах щелочных металлов. Подобные резонансы востребованы при разработке малогабаритных атомных часов с лазерной накачкой, где возникает проблема минимизации ширины линии наблюдаемого резонанса, связанная с миниатюризацией конструкции. Такой подход требует увеличения плотности рабочего вещества для получения достаточно надёжного сигнала. С целью уменьшения спинобменного уширения линии в таких условиях используют, краевой резонанс на магнитоинвариантном СВЧ переходе. В разделе анализируется роль светового и ориентационного сдвига частоты радиооптического краевого резонанса в различных щелочных атомах при оценке относительной погрешности малогабаритных атомных часов на краевом резонансе. Анализ показывает, что ведущая роль в световом сдвиге частоты принадлежит векторной компоненте, которая зависит от знака поляризации света накачки, а, следовательно, и от ориентации направления света накачки относительно рабочего магнитного поля.

Однако, если производить регистрацию остаточных магнитных флуктуаций в этом же оптическом тракте при помощи квантового магнитометра (для которого векторная компонента светового сдвига также существенна), то, определив параметры оптической накачки и интенсивности радиополя, при котором достигается наибольший коэффициент корреляции сигналов двух измерительных каналов, можно добиться компенсации векторной составляющей на атомном уровне при существенном увеличении фактора качества сигнала «краевого» резонанса по сравнению с магнитоинвариантным 0-0 переходом.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты проведенных исследований:

- В работе впервые обнаружен и исследован, теоретически и экспериментально, ориентационный световой сдвиг частоты радиооптического резонанса в парах щелочных металлов.
- Предложена модель, позволяющая проанализировать модуляционную методику подавления светового сдвига частоты применительно к его ориентационной составляющей.
- Проведено численное моделирование компонентов спектрального отклика на магнитоинвариантных 0-0 и «краевых» переходах в щелочных атомах, и моделирование интегральных светового и ориентационного сдвигов частоты при ламповой и лазерной накачке.

- Проведена экспериментальная апробация расчётных данных по ориентационному световому сдвигу в парах Rb^{87} .
- Проведено сопоставление расчётных и экспериментальных данных, полученных на лабораторных макетах квантового дискриминатора для исследования ориентационных сдвигов в Rb^{87} в условиях селективной оптической накачки различными спектральными источниками.

Результаты проведенных исследований позволяют констатировать, что, несмотря на относительно слабую зависимость частоты 0-0 перехода от абсолютного значения внешнего магнитного поля, требование обеспечения постоянства угла между направлением света накачки и вектором внешнего магнитного поля оказывается абсолютно необходимым в условиях использования квантового дискриминатора на движущихся и вращающихся носителях.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

В рецензируемых научных журналах, включённых в перечень ВАК:

1. Баранов А.А., Ермак С.В., Сагитов Э.А., Смолин Р.В., Семенов В.В. О корреляции сигналов в тандеме спиновый генератор и СВЧ дискриминатор на щелочных атомах с лазерной накачкой // Письма в журнал технической физики.– 2016.– № 4 (42).– С.38–45.
2. Баранов А.А., Ермак С.В., Сагитов Э.А., Смолин Р.В., Семенов В.В. О компенсации светового сдвига частоты радиооптического СВЧ-резонанса в оптически ориентированных щелочных атомах с лазерной накачкой // Журнал экспериментальной и теоретической физики.– 2015.– № 3 (148).– С.453.
3. Баранов А.А., Ермак С.В., Семенов В.В. Ориентационные сдвиги частоты СВЧ резонанса на сверхтонком 0-0 переходе в парах Rb^{87} с селективной оптической накачкой // Оптика и спектроскопия.– 2013.– №3 (114).– С. 18-21.
4. Баранов А.А., Ермак С.В., Семенов В.В. Подавление ориентационного светового сдвига частоты радиооптического резонанса в щелочных атомах в условиях лазерной накачки // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки.– 2012.– №1(14)–С. 152–155.
5. Баранов А.А., Ермак С.В., Смолин Р.В., Семенов В.В. Световые сдвиги частоты радиооптического резонанса в парах рубидия при селективной оптической накачке // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки.– 2012.– №1(14).–С. 156-160.
6. Баранов А.А., Ермак С.В., Семенов В.В. Ориентационная

зависимость светового сдвига частоты радиооптического СВЧ резонанса в парах рубидия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010.- №3 (104).-С. 95–98.

7. Баранов А.А., Ермак С.В., Разумов А.Н., Семенов В.В. Зависимость формы линии радиооптического резонанса в парах щелочных металлов от параметров внешних электромагнитных полей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. –2009.-№2 (77). –С. 94 – 99.

Патенты:

8. Квантовый M_x магнитометр: пат. 127485 Рос. Федерация: МПК G 01 V 3/14/ Семёнов В.В., Ермак С.В., Баранов А.А., Смолин Р.В.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»). - № 2012150875/28; заявл. 27.11.2012; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. - 2 с: ил.

9. Квантовый M_z магнитометр: пат. 127486 Рос. Федерация: МПК G 01 V 3/14/ Семёнов В.В., Ермак С.В., Баранов А.А., Смолин Р.В.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»). - № 2012154469/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. - 2 с: ил.

10. Радиоспектроскоп: пат. 104388 Рос. Федерация: МПК H 01 S 1/06/ Семёнов В.В., Ермак С.В., Баранов А.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург, государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ГОУ «СПбГПУ»). - № 2010150222/28; заявл. 07.12.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13. - 2 с: ил.

В сборниках материалов конференций:

11. Baranov A., Ermak S., Sagitov E., Smolin R. and Semenov V. Self-generating magnetometer with laser pumping employment in “end resonance” wall coated vapor cell atomic clocks (Применение самогенерирующий магнитометра с лазерной накачкой в атомных часах на «краевом» резонансе, наблюдаемом в ячейках с (антирелаксационным) покрытием стенок) // Proceedings of the 8th Symposium on frequency standards and metrology (in print).– 2016.

12. Baranov A.A., Ermak S.V., Semenov V.V. The orientation dependence of the SHF radio-optical resonance frequency light-shift in rubidium vapors (Ориентационная зависимость светового сдвига частоты СВЧ радиооптического резонанса в парах рубидия) // FCS Proceedings of the 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. –2011. – p. 560-581.
13. Baranov A.A., Ermak S.V., Semenov V.V. Orientation Light Shift Suppression in Alkali Atom Microwave Standards with Laser Pumping (Подавление ориентационного светового сдвига частоты в квантовых стандартах частоты на щелочных атомах с лазерной накачкой) // Proceedings of the IEEE European Frequency and Time Forum (EFTF). – 2012.– p. 72
14. Baranov A.A., Ermak S.V., Semenov V.V. Dynamic Stark Effect in the End Resonance Based Rb Standards with Laser Pumping (Динамический эффект Штарка в рубидиевых стандартах частоты на «краевом» резонансе с лазерной накачкой) // 6th joint meeting between the International Frequency Control Symposium (IFCS) and the European Frequency and Time Forum (EFTF), (21-25 July 2013), IEEE. – 2013. – 1 page.
15. Baranov A.A., Ermak S.V., Semenov V.V. The Light and Orientation End Resonance Frequency Shifts in Alkaline Atoms Vapors (Световые и ориентационные сдвиги частоты в парах щелочных металлов) // Conference proceedings IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 2014.– p. 167-168.
16. Baranov A.A., Ermak S.V., Smolin R.V., Semenov V.V. About long term stability of the self-generating magnetometer in weak magnetic field (О долговременной стабильности самогенерирующего магнитометра в слабых магнитных полях) // Conference proceedings IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, –2014.– p. 173-174.
17. Баранов А.А., Ермак С.В., Смолин Р.В., Семенов В.В., Ориентационные сдвиги частоты СВЧ резонанса на сверхтонком 0-0 переходе в парах щелочных металлов с селективной оптической накачкой // Труды VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО – 2012). –2012.- С.168-170.
18. Баранов А.А., Ермак С.В., Смолин Р.В., Семенов В.В., Предельная разрешающая способность спиновых генераторов на парах щелочных металлов с лазерной оптической накачкой // Труды VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО – 2012). – 2012.- С.151.