

Государственное научно-производственное объединение
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ
НАУК БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ

Объект авторского права

УДК 535.14; 537.635; 543.429.22; 544.175; 538.958

МАРКЕВИЧ
Сергей Александрович

**ДИССИПАТИВНАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ДИНАМИКА
МНОГОФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КУБИТАХ
ПРИ МОНО- И БИХРОМАТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск 2023

Научная работа выполнена в государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Научный руководитель **Сайко Александр Петрович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теории твердого тела государственного научно-производственного объединения «Научнопрактический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Официальные оппоненты: **Комаров Фадей Фадеевич**, доктор физико-математических наук, академик НАН Беларуси, профессор, заведующий лабораторией элионики научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Могилевцев Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель заведующего центром квантовой оптики и квантовой информатики государственного научного учреждения «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация Белорусский государственный университет

Защита состоится 15 июня 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.06.01 при государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению») по адресу: 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 19, пом. 5. Тел. +375(17)378-11-68 (ученый секретарь совета), email: ifttnanb@physics.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Автореферат разослан «___» мая 2023 года.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор физ.-мат. наук

Д.В. Карпинский

ВВЕДЕНИЕ

Возросший интерес к изучению квантовых систем, управляемых внешними полями, связан с достижениями в области создания искусственных двухуровневых атомов (кубитов), таких как полупроводниковые квантовые точки, азотно-вакансионные центры в алмазе, сверхпроводниковые цепи и т. д. Они используются в качестве рабочей среды для устройств зондирования магнитных и электрических полей, в Раби-спектроскопии, в фотонике и квантовых информационных технологиях, для демонстрации и изучения таких квантовых нелинейных явлений, как многофотонные резонансы, сдвиг Блоха – Зигерта, интерференция Ландау – Зинера – Штюкельберга и др.

Большие возможности управления состояниями кубита открывает применение бихроматического излучения (микроволнового и радиочастотного полей) для его возбуждения, позволяющее извлекать богатую информацию о формировании многофотонных переходов, изучать зависимости спектральных и релаксационных характеристик от отстроек от резонанса и фазы возбуждающих полей в рамках нестационарной Раби-спектроскопии. Недавно осцилляции Раби и когерентная динамика многофотонных рамановских переходов экспериментально и теоретически изучались при возбуждении «твердотельной» спиновой системы – азотно-вакансионного центра в алмазе – сверхсильным микроволновым полем, модулированным по амплитуде радиочастотным полем. С другой стороны, бихроматическое возбуждение осуществляется и в стационарной ЭПР-спектроскопии, что также приводит к реализации сложных многофотонных процессов, трактовка которых затруднена при использовании сильных электромагнитных полей.

Одной из проблем теоретического описания сильного взаимодействия кубита с управляющими электромагнитными полями (когда сила связи по величине сопоставима с энергией кубита и частотами полей) является неприменимость так называемого приближения вращающейся волны, делаая необходимым учет антирезонансных взаимодействий кубита с управляющим излучением, что приводит к возникновению частотных сдвигов типа Блоха – Зигерта, «одетым» квантовым состояниям, многоквантовым процессам и другим эффектам.

Использование современных аналитических методов и компьютерного моделирования позволяет дать адекватное описание диссипативной когерентной динамики многофотонных переходов в твердотельных кубитах, сильно взаимодействующих с классическими моно- и бихроматическими полями, в применении к задачам резонансной флуоресценции, импульсной магниторезонансной и рамановской спектроскопии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования по теме диссертации выполнялись в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». В диссертации представлены результаты исследований, выполненных в рамках следующих проектов и программ: ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», 2011–2015 гг. задание 1.05 «Динамика спектроскопических переходов, перенос заряда и установление дальнего порядка в низкоразмерных квантовых системах. Разработка статистико-механических моделей молекулярных и ионных систем для исследования равновесных свойств, фазовых переходов и ионно-электронного переноса в конденсированных средах», № ГР 20113333, задание 1.12 «Диссипативная когерентная динамика возбужденных электронных состояний полупроводниковых и магнитных наноструктур в импульсных электромагнитных полях», № ГР 20143211; ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», 2016–2020 гг. задание 1.07 «Многоквантовые переходы и когерентная динамика резонансных сред во внешних электромагнитных полях: полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками, наноструктурированные магнетики, опто- и спин-механические гибридные системы», № ГР 20160366; проект БРФФИ № Ф14Р-160 «Фемтосекундная многоимпульсная селективная спектроскопия диссипативной динамики колебательно-вращательных состояний молекул в жидкости, а также электронных и спиновых состояний в полупроводниковых наноструктурах», № ГР 20143239; проект БРФФИ № Ф08-080 «Многофотонное эхо и нутации в спиновых системах», № ГР 20081711; проект БРФФИ № Ф06М-100 «Динамика когерентных нестационарных сигналов, генерирующихся в неоднородно уширенных двухуровневых квантовых системах конечных размеров», № ГР 20066088.

Тема диссертационной работы соответствует пункту 6.7 приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы «Научные основы создания и функционирования оптико-электронных микросистем, устройств молекулярной электроники и кремниевой фотоники, электронных и оптических систем обработки информации на спиновых эффектах; нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585), пункту 8 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы «Многофункциональные материалы и технологии» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190), пункту 4 приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы; наноматериалы и нанотехнологии,

нанодиагностика» (Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является теоретическое описание диссипативной когерентной динамики многофотонных переходов в «твердотельных» кубитах, сильно взаимодействующих с классическими моно- и бихроматическими электромагнитными полями, в применении к задачам резонансной флуоресценции, импульсной магниторезонансной и рамановской спектроскопии.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

– рассмотреть эволюцию кубита в сверхсильном резонансном монохроматическом классическом поле с учетом диссипации и дефазировки вне приближения вращающейся волны (ПВВ);

– теоретически объяснить условия перехода между режимами сужения и уширения линий триплета Моллова для квантовых точек (КТ) в твердых телах;

– определить особенности релаксации дважды «одетых» состояний кубита в бихроматическом (микроволновое (МВ) плюс радиочастотное (РЧ)) поле в режиме сильной связи спиновой системы с МВ полем;

– теоретически исследовать возможности подавления дефазирующего эффекта неоднородности микроволнового поля в образце в бихроматическом МВ и РЧ поле;

– определить особенности статистики «одетых» состояний кубитов при их бихроматическом возбуждении специального типа, когда МВ поле переводит кубит из основного в возбужденное состояние, а резонансная частота кубита модулируется РЧ полем с частотой, близкой к частоте Раби кубита в МВ поле либо значительно ее превосходящей;

– провести аналитическое описание многофотонных переходов в стационарном ЭПР при слабой модуляции вблизи резонанса Раби ($\omega_2 \ll \omega_1 \approx \omega_{rf}$) и сильной и быстрой модуляции ($\omega_2 > \omega_1 \ll \omega_{rf}$). Теоретическое описание наблюдаемой инверсии сигнала ЭПР, а также сильного различия между синфазными и квадратурными сигналами;

– описать временные и спектральные особенности осцилляций Раби при многофотонных рамановских переходах в твердотельной спиновой системе: азотно-вакансионный центр в алмазе в режиме сверхсильной связи спиновой системы с низкочастотным полем, приводящему к нарушению ПВВ и проявлению эффекта Блоха – Зигерта (БЗ);

– предложить способ прямого измерения сдвига БЗ.

Объектом исследования являются твердотельные кубиты (полупроводниковые квантовые точки, P1- и NV-центры в алмазе, E'-центры в кварце, сверхпроводниковые кубиты), взаимодействующие с моно- и бихроматическими электромагнитными полями.

Предмет исследования – резонансная флуоресценция, динамика многофотонных квантовых переходов и антигруппировка и статистика

квантов, стационарная спектроскопия ЭПР при различных режимах модуляции энергии твердотельных кубитов.

Методы исследования – метод матрицы плотности; несекулярная теория возмущений, основанная на методе усреднения Крылова – Боголюбова – Митропольского; супероператоры Линдблада для описания процессов диссипации и дефазировки; квантовая регрессионная теорема при вычислении корреляционных функций первого и второго порядков и др.

Научная новизна

Основные результаты диссертации имеют мировой уровень новизны и получены впервые:

- предложено теоретическое объяснение условий перехода между режимами сужения и уширения линий триплета Моллова для КТ в твердотельных матрицах;

- дано теоретическое описание спектра многофотонного излучения при сверхсильном возбуждении двухуровневой системы в дисперсионном приближении, когда модифицируются не только энергия двухуровневой системы, но и ее релаксационные параметры;

- определены особенности релаксации дважды «одетых» состояний кубита в бихроматическом МВ и РЧ поле в режиме сильной связи спиновой системы с РЧ полем и поведение линий триплета Моллова в зависимости от фазы РЧ поля;

- теоретически продемонстрирована возможность подавления дефазировочного эффекта неоднородности микроволнового поля в образце в бихроматическом МВ и РЧ поле;

- показано, что корреляционная функция второго порядка для резонансной флуоресценции кубита, возбуждаемого МВ и РЧ полями, обладает свойствами, подтверждающими эффект антигруппировки испускаемых фотонов;

- описаны многофотонные переходы, возбуждаемые МВ и РЧ полями между дважды «одетыми» состояниями спиновых кубитов в стационарной ЭПР спектроскопии, для режимов слабой модуляции вблизи резонанса Раби и сильной быстрой модуляции. Получены аналитические выражения для синфазного и квадратурного сигналов ЭПР с учетом частотных сдвигов БЗ;

- продемонстрировано проявление первичного и предсказана возможность формирования вторичного (на кратных частотах РЧ поля) резонанса Раби в спектральном отклике спиновой системы;

- изучена когерентная динамика рамановских переходов, возбуждаемых сверхсильным амплитудно-модулированным МВ полем в кубите вне ПВВ;

- показана уникальная возможность прямого наблюдения частотного сдвига БЗ в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий.

Положения, выносимые на защиту

1. Ширины спектральных линий триплета Моллова, формирующегося при возбуждении двухуровневой квантовой точки (КТ) сильным

нерезонансным лазерным импульсом, зависят от отстройки частоты лазерного поля от частоты перехода в КТ: 1) увеличение отстройки приводит к уширению боковых линий и сужению центральной линии триплета Моллова при условии, что скорость фазовой (поперечной) релаксации $\tilde{\gamma}_{\perp}$ больше скорости энергетической (продольной) релаксации кубита $\tilde{\gamma}_{\parallel}$; 2) для $\tilde{\gamma}_{\perp} < \tilde{\gamma}_{\parallel}$ с увеличением отстройки сужаются боковые линии, а центральная линия уширяется; 3) при равенстве $\tilde{\gamma}_{\perp} = \tilde{\gamma}_{\parallel}$ (условие кроссовера между режимами сужения и уширения) значения ширин всех линий триплета Моллова равны и не зависят от отстройки.

При сверхсильном возбуждении двухуровневой квантовой системы электромагнитным полем происходит формирование трех различных режимов ее диссипативной динамики: 1) коллапс и возрождение осцилляций разности населенностей с реализацией инверсии квазиуровней; 2) экспоненциальное затухание осцилляций, приводящее к их стационарному состоянию с конечной амплитудой; 3) монотонное затухание осцилляций до нуля (стационарная стабилизация одинаково населенных квазиуровней двухуровневой системы).

2. В спиновом кубите, возбуждаемом классическим бихроматическим полем, состоящим из сильного резонансного микроволнового (МВ) поля и слабого радиочастотного (РЧ) поля с частотой ω_{rf} , близкой к константе взаимодействия МВ поля с кубитом ω_1 , формируются триpletные квазиуровни энергии (дважды «одетые» этими полями квантовые состояния), между которыми совершаются осцилляции Раби. Увеличение отстройки $\omega_1 - \omega_{rf}$ при $T_2 < T_1$ (при $T_2 > T_1$) уменьшает (увеличивает) скорость затухания осцилляций Раби на боковых частотах и увеличивает (уменьшает) скорость затухания на центральной частоте (T_1 – время продольной и T_2 – время поперечной релаксации кубита). Увеличение фазы ψ РЧ поля от 0 до $\pi/2$ приводит к постепенному уменьшению центральной линии в фурье-спектре осцилляций Раби и усилению боковых линий вплоть до полного исчезновения центральной линии при $\psi = \pi/2$. Эти изменения повторяются в обратном порядке при дальнейшем увеличении фазы РЧ поля от $\pi/2$ до π .

Дополнительная декогеренция осцилляций Раби, вызываемая неоднородностями амплитуды МВ поля, которые ограничивают время манипулирования кубитом, эффективно подавляется при резонансе Раби ($\omega_1 = \omega_{rf}$), что показано для гауссовского, косинусоидального и линейного распределений амплитуды МВ поля.

Корреляционная функция второго порядка для резонансной флуоресценции кубита, возбуждаемого МВ и РЧ полями, обладает свойствами, подтверждающими эффект антигруппировки испускаемых фотонов.

3. Несекулярная теория возмущений, основанная на методе усреднения Крылова – Боголюбова – Митропольского, дает аналитическое описание многофотонных переходов, возбуждаемых МВ и РЧ полями между дважды

«одетыми» состояниями спиновых кубитов, в методе стационарного электронного спинового резонанса для режимов: 1) слабой модуляции статического магнитного поля вблизи резонанса Раби, когда $\omega_2 \ll \omega_1 \approx \omega_{rf}$, 2) сильной быстрой модуляции при $\omega_2 > \omega_1 \ll \omega_{rf}$ (где ω_1 и ω_2 – частоты Раби для МВ и РЧ полей, соответственно, ω_{rf} – частота РЧ поля).

4. Для когерентной динамики рамановских переходов, возбуждаемых сверхсильным амплитудно-модулированным МВ полем в двухуровневой системе (кубите), характерно доминирующее значение вклада частотного сдвига Блоха – Зигерта (БЗ) «одетых» квантовых состояний кубита, что количественно согласуется с известными экспериментальными данными для рамановских переходов второго и третьего порядков на NV-центрах в алмазе, причем амплитуда и фаза возникающих осцилляций Раби сильно зависят от начальной фазы низкочастотного поля и отстройки от частоты многофотонных резонансов. Выбором параметров кубита и поля модуляции (соответствующих их сверхсильному взаимодействию) можно реализовать ситуацию, когда осцилляции Раби будут формироваться только благодаря эффекту БЗ, что проявляется в когерентной динамике населенностей квантовых уровней в виде осцилляций БЗ. Соответственно, в фурье-спектрах когерентного отклика появляются дублеты с расщеплением между спектральными линиями, равным двойному сдвигу БЗ.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены лично соискателем. Научный руководитель, доктор физико-математических наук А.П. Сайко сформулировал задачи и направления исследования, участвовал в выработке подходов к решению поставленных задач, интерпретации и обсуждению результатов и представлении полученных результатов для печати. Соавтор Г.Г. Федорук доктор физико-математических наук проводил эксперименты, участвовал в обсуждении численных расчетов и представлении полученных результатов для печати. Результаты исследований других соавторов не включены в работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на следующих международных научных конференциях и семинарах. Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела»: ФТТ-2007 (Минск, 23–26 октября, 2007), ФТТ-2013 (Минск, 15–18 октября, 2013), ФТТ-2016 (Минск, 22–25 ноября, 2016), ФТТ-2018 (Минск, 24–28 сентября, 2018), ФТТ-2021 (Минск, 22–26 ноября, 2021); XXII Conference on Radio and Microwave Spectroscopy (RAMIS 2007) (Będlewo, Poland, 22–25 April 2007); The International Conference «Modern Development of Magnetic Resonance» (Zavoisky 100) (Kazan, Russia, 24–29 September 2007); I Forum EMR-PL (Rzeszow, 19–21 May 2010); V Forum EMR-PL (Wrocław, 5–8 June 2018); Second International Conference «Modern Applications of

Nanotechnology» (Minsk, Belarus, 6–8 May 2015).

Аналитические расчеты и методы, разработанные при исследованиях по диссертационной работе, использовались при выполнении договоров с Объединенным институтом ядерных исследований в Дубне и проектов БРФФИ, что подтверждается справкой о практическом использовании результатов исследования.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 научных работах, в том числе в 18 статьях [1-А–18-А] в рецензируемых научных журналах (10,3 авторского листа), соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 8 статьях [19-А–26-А] и 2 тезисах [27-А; 28-А] в сборниках материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка цитируемых литературных источников из 174 наименований на 13 страницах и 28 наименований публикаций соискателя на 3 страницах и одного приложения на 2 страницах. Изложена на 145 страницах, включая 49 рисунков на 25 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая часть **главы 1** посвящена описанию диссипативной когерентной динамики одиночных КТ в условиях сильного взаимодействия их с акустическими фононами матричной решетки в ПВВ. Основное внимание уделено теоретическому объяснению условий перехода между режимами сужения и уширения линий триплета Моллова в зависимости от отстройки. Для теоретического описания КТ использована модель двухуровневой системы с энергией ω_0 между основным $|1\rangle$ и возбужденным $|2\rangle$ состояниями (считаем $\hbar = 1$), которая возбуждается когерентным лазерным полем с частотой ω_L и взаимодействует с фононным термостатом. Для учета эффектов влияния фононов на когерентное взаимодействие лазера с КТ, таких как декогеренция и диссипация, использовалось управляющее уравнение с релаксационным супероператором Линдблада:

$$i\partial\rho/\partial t = [H, \rho] + i\Lambda\rho, \quad (1)$$

где $H = \Delta s^z + \Omega(s^+ + s^-)/2$ – гамильтониан КТ, $s^{\pm,z}$ – компоненты оператора псевдоспина, $\Delta = \omega_0 - \omega_L$, $\Omega = \Omega_0 e^{-W(T)/2}$, Ω_0 – частота Раби, описывающая когерентную накачку экситонов лазерным полем, а $e^{-W(T)}$ – фактор Дебая – Валлера, T – абсолютная температура и $2\Lambda\rho = (\gamma_{21} + \gamma_{ph}^-)D[s^-]\rho + (\gamma_{12} + \gamma_{ph}^+)D[s^+]\rho + \eta D[s^z]\rho$ – релаксационный

супероператор, $D[O]\rho = 2O\rho O^+ - O^+O\rho - \rho O^+O$, γ_{21} и γ_{12} – скорости релаксации фотонных излучательных процессов из возбужденного состояния $|2\rangle$ КТ в основное состояние $|1\rangle$ и наоборот, скорость γ_{ph}^- соответствует процессу усиленного радиационного затухания, а скорость γ_{ph}^+ представляет процесс некогерентного возбуждения, вызванного экситон-фононным взаимодействием, а η – скорость дефазировки.

С помощью оператора канонического преобразования для матрицы плотности получен гамильтониан «одетой» лазерным излучением КТ и преобразовано управляющее уравнение. Для объяснения поведения ширины триплета Моллова найдены скорости продольной Γ_{\parallel} и поперечной Γ_{\perp} релаксации «одетых» состояний КТ, которые равны ширинам центральной и боковых линий триплета Моллова соответственно. Используя метод матрицы плотности, получено выражение для двухвременной корреляционной функции первого порядка, реальная часть которой описывает осцилляции Раби КТ, а ее спектральная плотность представляет собой триплет Моллова. Анализ полученных выражений для скоростей релаксации и спектральной плотности излучения КТ показал, что реализация режимов сужения или уширения зависит от соотношения между скоростью поперечной $\tilde{\gamma}_{\perp} = (\gamma_{12} + \gamma_{21} + \gamma_{ph}^- + \gamma_{ph}^+ + \eta) / 2$ и продольной $\tilde{\gamma}_{\parallel} = \gamma_{12} + \gamma_{21} + \gamma_{ph}^- + \gamma_{ph}^+$ релаксации. А именно, когда $\tilde{\gamma}_{\perp} < \tilde{\gamma}_{\parallel}$ ($\tilde{\gamma}_{\perp} > \tilde{\gamma}_{\parallel}$) (рисунок 1), увеличение отстройки частоты лазерного поля от частоты перехода КТ приводит к уширению (сужению) боковых линий и сужению (уширению) центральной линии спектрального триплета Моллова (рисунок 2), а при $\tilde{\gamma}_{\perp} = \tilde{\gamma}_{\parallel}$ ширины линий не зависят от отстройки и равны друг другу. Сравнение аналитически рассчитанных ширины линий триплета Моллова с численно рассчитанными и экспериментально измеренными ширинами в других исследованиях представлено на рисунке 3.

Вторая часть **главы 1** посвящена описанию диссипативной динамики кубита при его глубоко сверхсильном возбуждении в высокочастотном дисперсионном режиме, когда частота ω поля и энергия взаимодействия электромагнитного поля с кубитом g значительно превышают частоту перехода кубита ε ($\omega, g \gg \varepsilon$). В этом случае не используется ПВВ. Гамильтониан взаимодействия кубита с полем записывается в виде $H = \varepsilon s^z - 2gs^x \cos \omega t$, где s^x – проекция оператора псевдоспина на ось x . Исследуется влияние величины параметра $a = 2g / \omega$ на вид осцилляций Раби, их спектр и поведение скоростей релаксации. Для решения поставленной задачи используется управляющее уравнение с релаксационным супероператором Линдблада для матрицы плотности (1). С помощью оператора канонического преобразования для матрицы плотности получен новый гамильтониан H_1 и преобразовано управляющее уравнение.

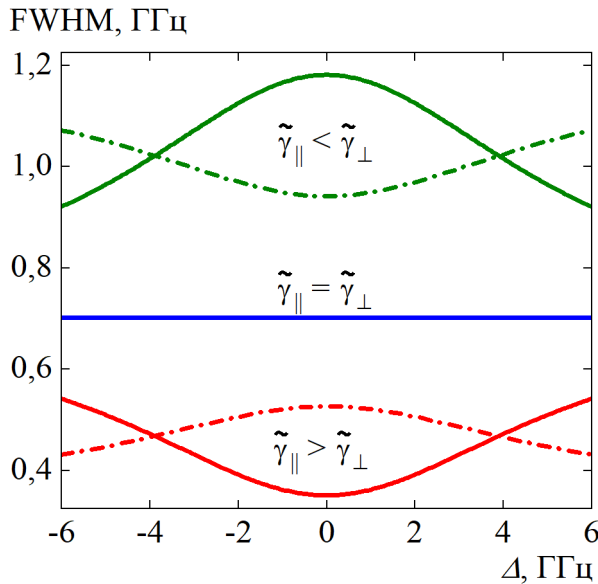
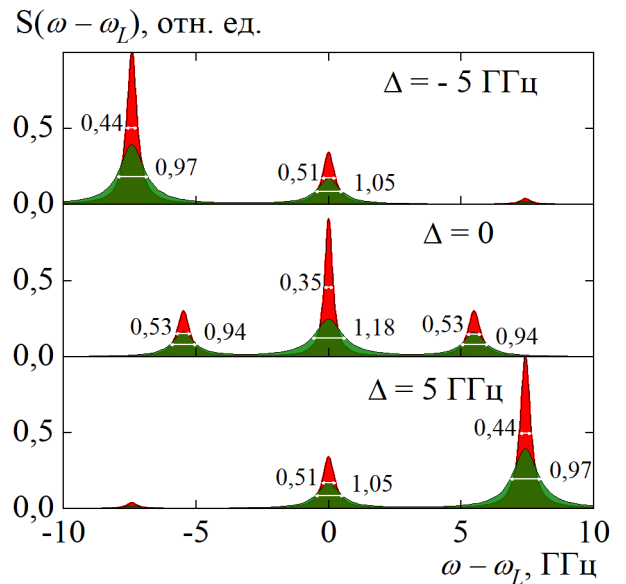
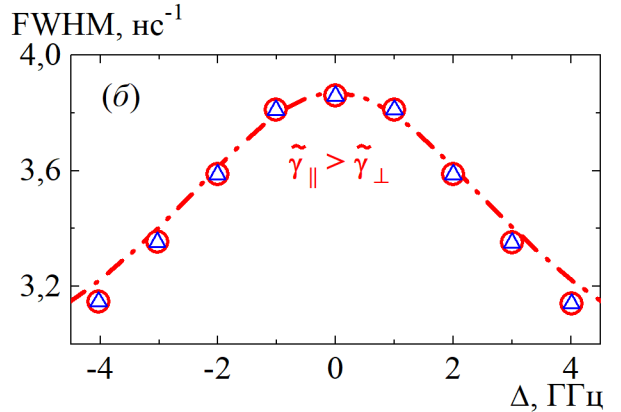
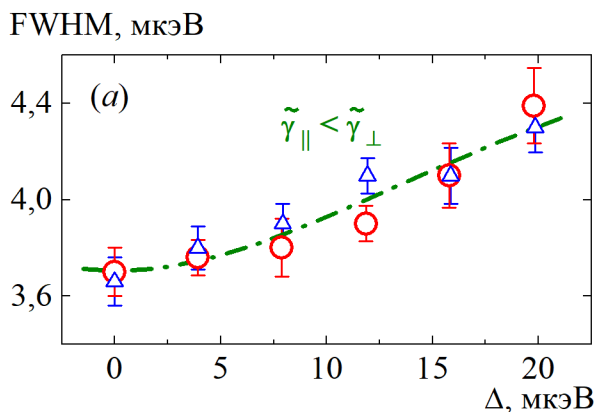


Рисунок 1 – Ширина (FWHM) боковых (штрихпунктирная линия) и центрального (сплошная линия) линий триплета Моллова как функция отстройки лазер-КТ [8-А]



Красный цвет соответствует $\tilde{\gamma}_{||} > \tilde{\gamma}_{\perp}$, зеленый цвет – $\tilde{\gamma}_{||} < \tilde{\gamma}_{\perp}$. На рисунке показаны значения ширин линий Рисунок 2 – Спектр излучения КТ для различных значений отстройки лазер-КТ [8-А]



Символы соответствуют экспериментальным данным¹⁾ (а) и численным расчетам²⁾ соответственно для красной (○) и синей (△) боковых линий, штрихпунктирная линия – аналитический расчет

Рисунок 3 – Зависимость ширин (FWHM) боковых линий Моллова от отстройки лазер-КТ [8-А]

Быстро осциллирующие члены в преобразованном управляющем уравнении устранены методом усреднения Крылова – Боголюбова – Митропольского (КБМ).

¹⁾ Ulhaq A., Weiler S., Roy C., Ulrich S.M., Jetter M., Hughes S., Michler P. Detuning-dependent Mollow triplet of a coherently-driven single quantum dot // Optics Express. – 2013. – Vol. 21, № 4. – P. 4382–4395.

²⁾ McCutcheon D.P.S., Nazir A. Model of the optical emission of a driven semiconductor quantum dot: phonon-enhanced coherent scattering and off-resonant sideband narrowing // Physical Review Letters. – 2013. – Vol. 110, № 21. – P. 217401 (5 pp.).

В высокочастотном пределе отношение $\varepsilon / \omega \ll 1$ является малым параметром и гамильтониан H_1 заменяется его эффективным аналогом вплоть до третьего порядка по этому малому параметру. Из эффективного гамильтониана найдена поправка третьего порядка к квазиэнергии кубита и показано, что различные подходы, такие как метод усреднения, метод двойных рядов Дайсона и метод ренормгруппы, дают разные выражения с суммами произведений функций Бесселя всех порядков и при численном вычислении отличаются незначительно.

Найденное выражение для разности населенностей кубита позволило выделить и объяснить три качественно различных режима его поведения при сверхсильном возбуждении. На рисунке 4 показаны эти режимы: 1) коллапс и возрождение осцилляций разности населенностей ($a = 3,8$); 2) монотонное затухание осцилляций до нуля ($a = 5,5$); 3) экспоненциальное затухание осцилляций с выходом на стационарное состояние с конечной амплитудой ($a = 7,0$).

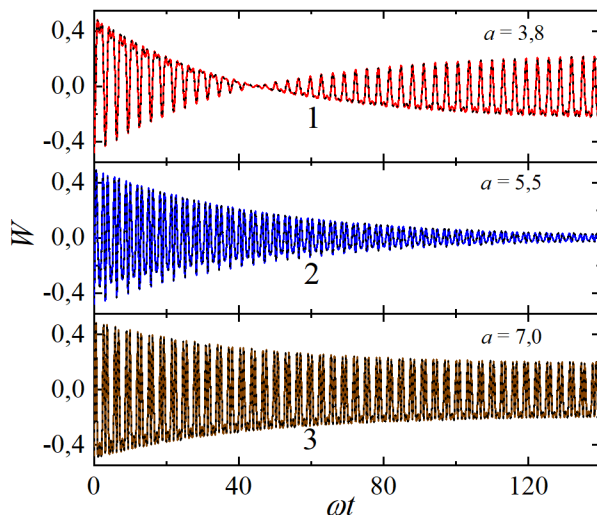
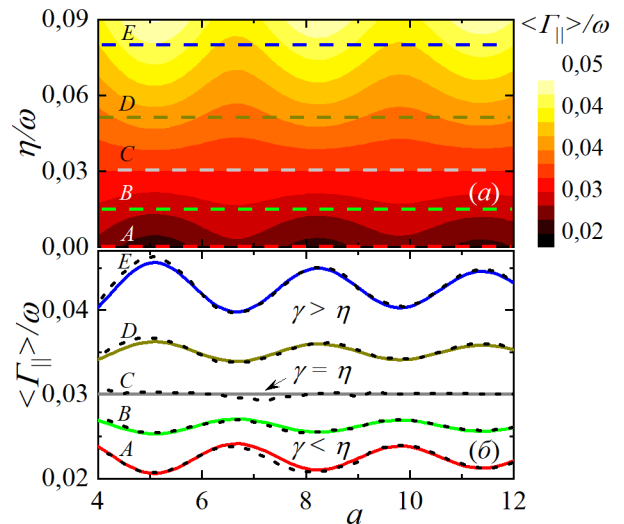


Рисунок 4 – Эволюция разности населенностей W для трех значений величины a , соответствующих трем режимам осцилляций [12-А; 24-А]



(б) Срезы (а). Пунктирные линии на (б) – численные результаты Рисунок 5 – Зависимость скорости продольной релаксации от a и η [12-А]

Получены выражения ренормированных усредненных скоростей продольной и поперечной $\langle \Gamma_{\perp} \rangle$ релаксации «одетого» полем кубита. Определено, что поведение $\langle \Gamma_{\parallel} \rangle$ и $\langle \Gamma_{\perp} \rangle$ зависит от соотношения скоростей энергетической релаксации и чистой дефазировки «голового» кубита. На рисунке 5 показано поведение скорости релаксации $\langle \Gamma_{\parallel} \rangle$ в зависимости от параметра a и чистой дефазировки η .

Полученные аналитические выражения для спектра осцилляций разности населенностей кубита и численный расчет для разных режимов осцилляций хорошо согласуются между собой.

Глава 2 посвящена описанию когерентной динамики спиновых кубитов, возбуждаемых классическим бихроматическим полем, состоящим из сильного резонансного МВ поля и более слабого РЧ поля с частотой, близкой к частоте Раби МВ поля. Гамильтониан исследуемой системы имеет вид $H = H_0 + H_{\perp}(t) + H_{\parallel}(t)$, где $H_0 = \omega_0 s^z$ – гамильтониан зеемановской энергии кубита в статическом магнитном поле B_0 , $\omega_0 = \gamma B_0$ – ларморовская частота вращения спина электрона в статическом магнитном поле B_0 , γ – гиромагнитное отношение электрона, $2\omega_1 = \gamma B_1$, $2\omega_2 = \gamma B_2$, B_1 и B_2 являются амплитудами линейно поляризованных МВ и РЧ полей, тогда как $H_{\perp}(t) = \omega_1(s^+ + s^-)\cos\omega_{mw}t$ и $H_{\parallel}(t) = 2\omega_2 s^z \cos(\omega_{rf}t + \psi)$ – гамильтонианы взаимодействия кубита с линейно поляризованными МВ и РЧ полями соответственно. Здесь ω_{mw} и ω_{rf} – частоты полей МВ и РЧ, ψ – фаза РЧ поля, фаза МВ поля принята равной нулю. Для учета процессов диссипации и декогеренции используется супероператор Линдблада, как в **главе 1**. После применения канонических преобразований и метода усреднения КБМ найдена матрица плотности, эффективный гамильтониан и скорости релаксации дважды «одетого» кубита, которые при разных соотношениях между временами продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации по-разному зависят от отстройки $\delta = \omega_1 - \omega_{rf}$. Определено условие инверсии разности населенностей кубита в стационарном состоянии. Построены зависимости спектра сигнала поглощения от частоты РЧ поля и от его фазы (рисунок б); эти зависимости позднее были использованы японскими исследователями³⁾ при тестировании созданного ими портативного устройства для наблюдения импульсного магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе.

На рисунке 7 показан эффект подавления декогеренции осцилляций Раби, вызванной неоднородностью амплитуды МВ поля при реализации резонанса Раби путем создания дважды «одетых» квантовых состояний кубита, что продемонстрировано на примере гауссовского и косинусоидального распределений амплитуды МВ поля. Этот эффект был использован упомянутыми выше японскими исследователями³⁾ для наладки оптимальной работы созданного ими устройства.

Получено выражение корреляционной функции второго порядка для резонансной флуоресценции кубита отдельно для режимов слабого МВ поля (ω_1 / ω_{rf} – малый параметр) и слабого РЧ поля (ω_2 / ω_{rf} – малый параметр). Показано, что в режиме слабого МВ поля выбором параметров РЧ поля ($z = 2\omega_2 / \omega_{rf}$) можно плавно перейти от периодически меняющейся статистики квантов к чисто субпуассоновской, от режима группировки к

³⁾ Mariani G., Umemoto A., Nomura S. A home-made portable device based on Arduino Uno for pulsed magnetic resonance of NV centers in diamond // AIP Advances. – 2022. – Vol. 12, № 6. – P. 065321 (15 pp.).

антигруппировке квантов (рисунок 8), а в режиме слабого РЧ поля отчетливо проявляется эффект «коллапса-возрождения» и изменением амплитуды ω_2 РЧ поля можно замедлять или ускорять его развитие, изменяя тем самым статистику излучаемых квантов (рисунок 9).

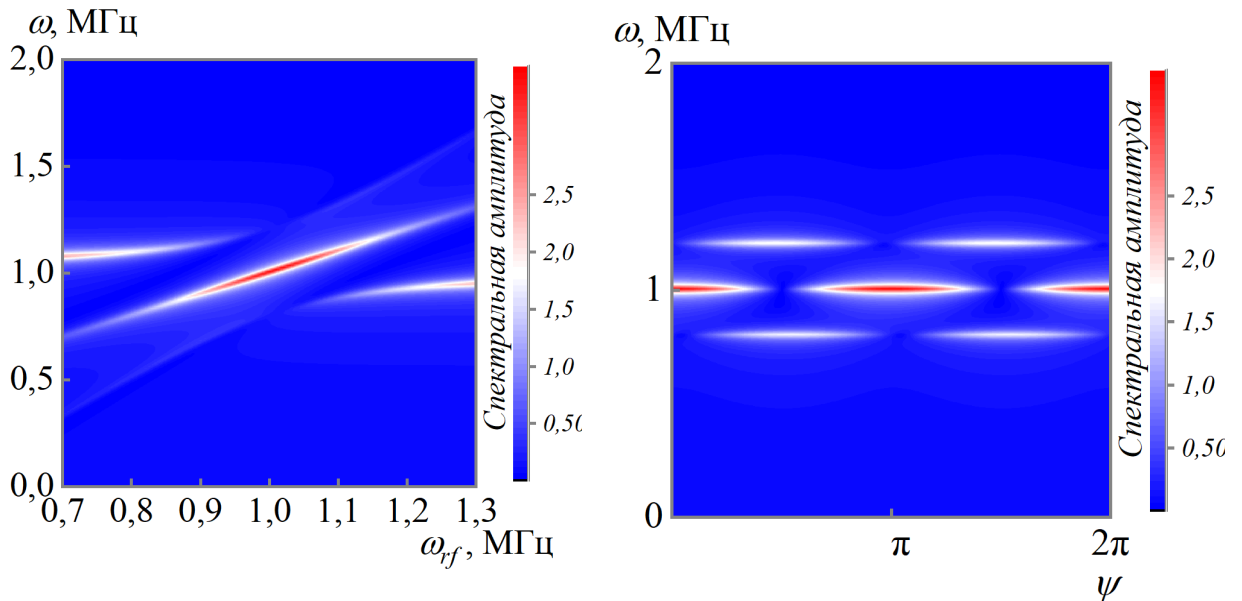


Рисунок 6 – Спектры осцилляций Раби в зависимости от частоты ω_{rf} и фазы ψ РЧ поля [9-А]

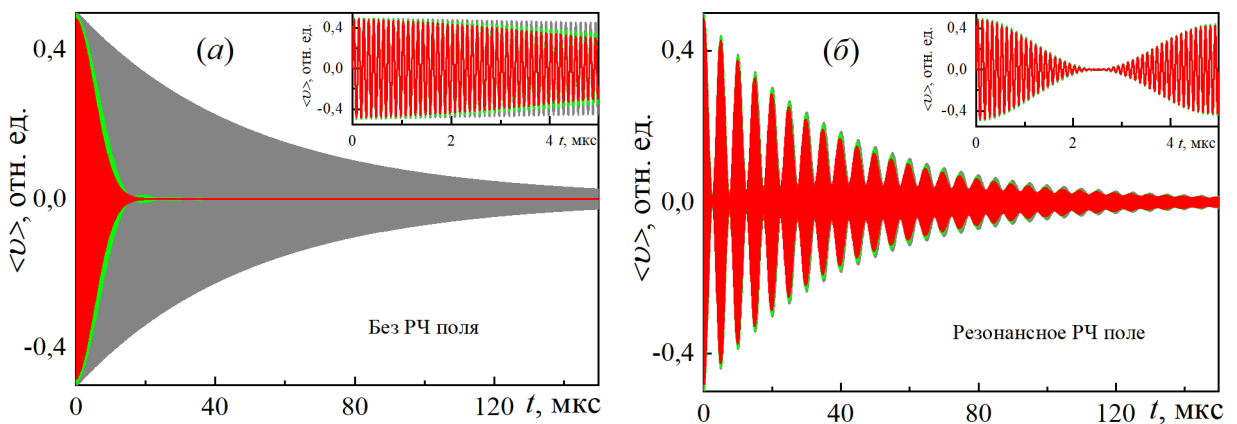


Рисунок 7 – Осцилляции Раби, возбуждаемые однородным (серые линии) и неоднородным (красные и зеленые линии) МВ полем без РЧ поля (а) и с резонансным РЧ полем (б). Осцилляции Раби для распределений неоднородности по ω_1 , аппроксимированных функциями Гаусса (красные линии) и косинуса (зеленые линии) [14-А; 25-А]

В главе 3 рассматривается резонанс Раби в стационарном ЭПР в случае, когда частота модуляционного РЧ поля превышает ширину линии ЭПР и многофотонные переходы приводят к появлению боковых модуляционных линий в спектре ЭПР. Используя несекулярную теорию возмущений, основанную на методе усреднения КБМ, получены аналитические выражения для амплитуд гармоник синфазного и квадратурного сигналов в режиме

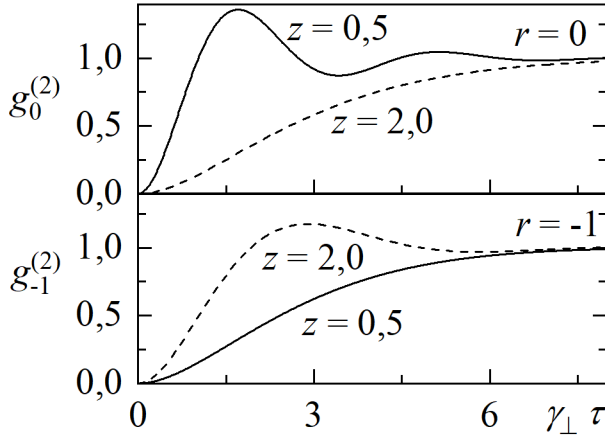


Рисунок 8 – Корреляционная функция $g_r^{(2)}(\tau)$ в отсутствии РЧ кванта $r = 0$ и при испускании одного РЧ кванта $r = -1$ [10-А; 22-А]

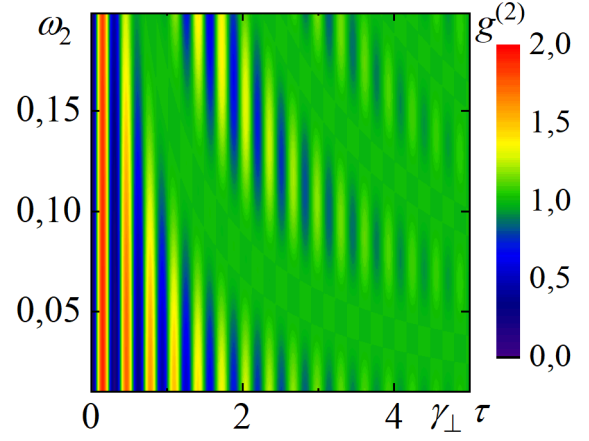


Рисунок 9 – Корреляционная функция $g^{(2)}(\tau)$ в зависимости от ω_2 [10-А]

слабой модуляции вблизи резонанса Раби ($\omega_2 \ll \omega_1 \approx \omega_{rf}$) с учетом частотного сдвига Блоха – Зигерта (БЗ):

$$A_j^0 = -\sigma_0 \sum_k \frac{w_k}{2\Gamma_{\perp}} \frac{J_{j-k}(a) + J_{-j-k}(a)}{1 + w_k^2 / \Gamma_{\perp} \Gamma_{\parallel} + \square_k^2 / \Gamma_{\perp}^2}, \quad A_j^{\pi/2} = \sigma_0 \sum_k \frac{\square_k w_k}{2\Gamma_{\perp}^2} \frac{J_{j-k}(a) - J_{-j-k}(a)}{1 + w_k^2 / \Gamma_{\perp} \Gamma_{\parallel} + \square_k^2 / \Gamma_{\perp}^2}, \quad (2)$$

где $a = 2\omega_2 \cos \theta / \omega_{rf}$, $\cos \theta = \Delta / \Omega$ и $\sin \theta = \omega_1 / \Omega$, $\Omega = (\omega_1^2 + \Delta^2)^{1/2}$ – обобщенная частота Раби в МВ поле, $\Delta = \omega_0 - \omega_{mw}$, $w_k = (\omega_1 \omega_{rf} k / \Delta) J_{-k}(a)$ и $\square_k = \Omega - k\omega_{rf} + \Delta_{BS}(k)$,

$$\Delta_{BS}(k) = \frac{\omega_2^2 \sin^2 \theta}{2\omega_{rf}} \left[\sum_{n \neq -k+1} \frac{1}{n+k-1} (J_n^2(a) + J_n(a)J_{n-2}(a)) + \sum_{n \neq -k-1} \frac{1}{n+k+1} (J_n^2(a) + J_n(a)J_{n+2}(a)) \right]. \quad (3)$$

Показано, что квадратурные сигналы двухфотонных ($k = 2$) переходов в этом режиме в несколько раз сильнее, чем синфазные при использовании параметров, близких к экспериментальным условиям. Объяснены положения боковых линий и величины их ширин в зависимости от отстроек $\omega_1 - \omega_{rf}$ и $\Delta = \omega_0 - \omega_{mw}$ с учетом БЗ. На рисунке 10 показана инверсия первой боковой линии первой гармоники квадратурного сигнала при прохождении через резонанс Раби, которая объясняется изменением знака множителя числителя ее выражения при изменении знака отстройки $\omega_1 - \omega_{rf}$. Установленный факт наличия такой инверсии при реализации резонанса Раби был непосредственно

использован впоследствии экспериментаторами⁴⁾, которые на его основе предложили калибровочный стандарт для определения амплитуды микроволнового поля в ЭПР спектроскопии на основе Р1-центров в алмазе.

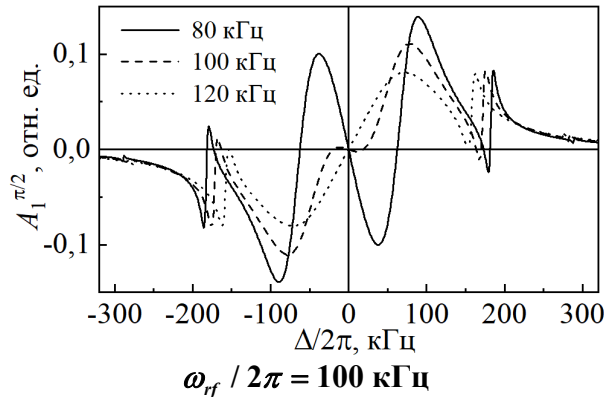


Рисунок 10 – Амплитуда первой гармоники квадратурного сигнала для режима $\omega_2 \ll \omega_1 \approx \omega_{rf}$ для разных ω_1 [11-A]

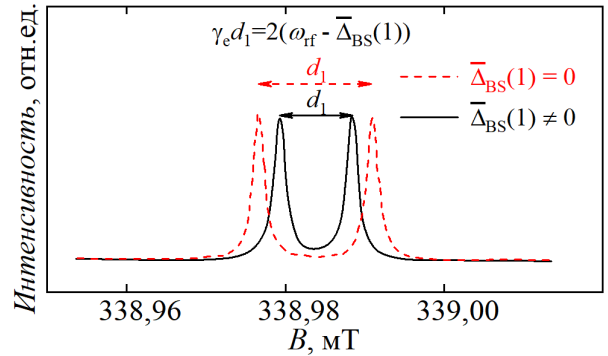


Рисунок 11 – Интенсивность первой гармоники квадратурного сигнала с учетом и без учета сдвига БЗ для режима $\omega_2 > \omega_1 \ll \omega_{rf}$ ⁵⁾

Подобные выражения для амплитуд получены в режиме сильной и быстрой модуляции ($\omega_2 > \omega_1 \ll \omega_{rf}$), где сдвиг БЗ равен $\bar{\Delta}_{BS}(k) = \sum_{n \neq k} \omega_1^2 J_n^2(\bar{a}) / 2(k-n)\omega_{rf}$, $\bar{a} = 2\omega_2 / \omega_{rf}$, а положения линий определяются уравнением $\bar{\omega}_k = \Delta - k\omega_{rf} + \bar{\Delta}_{BS}(k) = 0$. Учет в полученных в диссертации формулах сдвига БЗ позволил экспериментаторам⁵⁾ увеличить точность измерения амплитуды МВ поля в резонаторе с поликристаллическим образцом фталоцианина лития (рисунок 11).

Также продемонстрировано проявление первичного и предсказана возможность формирования вторичного (на кратных частотах РЧ поля) резонанса Раби в спектральном отклике спиновой системы, реализуемых при фазово-чувствительной регистрации на одной гармонике, а также во временной эволюции стационарного отклика, образованного всеми гармониками частоты модуляции.

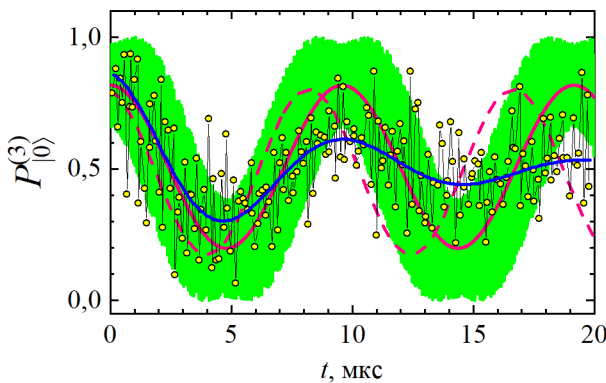
В главе 4 проводится теоретическое описание многофотонных рамановских переходов в двухуровневой спиновой системе, возбуждаемой МВ полем, амплитудно модулируемым низкочастотным РЧ полем.

Гамильтониан взаимодействия во вращающейся системе отсчета записывается в виде $H = \Delta_z \sigma^z / 2 + \Delta_x \sigma^x / 2 + A \sin(\omega t + \psi) \sigma^x$, где Δ_x –

⁴⁾ Rakvin B., Carić D., Kveder M. CW-EPR spectra of P1 centers in HPHT diamond in the vicinity of Rabi resonance: possible standard for B1 evaluation in EPR and DNP enhanced NMR spectroscopies // Journal of Magnetic Resonance Open. – 2022. – Vol. 10-11, № 1981. – P. 100039 (9 pp.).

⁵⁾ Rakvin B., Carić D., Kveder M. Enhanced accuracy of the microwave field strength measurement in a CW-EPR by pulsed modulation technique // Journal of Magnetic Resonance. – 2018. – Vol. 287. – P. 123–127.

амплитуда МВ поля, $\Delta_z = \Delta E - \omega_d$, ΔE – энергия перехода между уровнями $|0\rangle$ и $|-1\rangle$ NV центра в алмазе, ω_d – частота МВ поля, A и ω – амплитуда и частота РЧ поля, σ^z и σ^x – операторы Паули. С помощью метода КБМ получены аналитические выражения для матрицы плотности и найдена населенность $P_{|0\rangle}^{(k)}(t)$ основного спинового уровня $|0\rangle$ для рамановского перехода k -го порядка с учетом сдвига БЗ ω_k^{BS} . Сравнение экспериментально⁶⁾ измеренной и теоретически рассчитанной эволюции населенности приведено на рисунке 12. На рисунке 13 представлены эволюция населенности для рамановских переходов первого порядка ($k=1$) и ее спектр. Если амплитуда РЧ поля $A \rightarrow A^*$, при которой функция Бесселя $J_k(a \rightarrow a^*) \rightarrow 0$ (где $a = 2A \sin \theta / \omega$), то частота Раби в ПВВ для k -го перехода $\Omega_k = 2kAJ_k(a) \cos \theta / a \rightarrow 0$, а вне ПВВ – $\Omega_k^* \rightarrow \omega_k^{BS}$. В результате амплитудная модуляция эволюции населенности исчезает (средний график на рисунке 13, а) и возникают осцилляции с постоянной амплитудой и периодически изменяющейся частотой. В этом случае осцилляции Раби с частотой БЗ наблюдаются как частотная модуляция когерентного отклика и представлены на рисунке 13, а красной линией.



Синие линии – затухающие осцилляции Раби, соответствующие фитированию экспериментальных данных (желтые круги). Красные сплошные и пунктирные линии – осцилляции Раби, рассчитанные с учетом сдвига БЗ и без учета, соответственно

Рисунок 12 – Эволюция населенности основного спинового уровня для рамановских переходов третьего порядка [16-А]

На рисунке 13, б показано, что каждый триплет спектра при $\Delta A = A - A^* \rightarrow 0$ превращается в дублет, расстояние между пиками которого равно удвоенному сдвигу БЗ. Таким образом, показана возможность прямого наблюдения частотного сдвига БЗ в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий. Аналогичные графики также получены для переходов более высоких порядков. Определено, что идентифицировать порядок k перехода можно по порядковому номеру m единственного синглета в спектре, а именно $k = m / 2$. Например, для первого порядка второй триплет вырождается в синглет, показанный на рисунке 13, б красной стрелкой.

⁶⁾ Shu Z., Liu Y., Cao Q., Yang P., Zhang S., Plenio M.B., Jelezko F., Cai J. Observation of Floquet Raman transition in a driven solid-state spin system // Physical Review Letters. – 2018. – Vol. 121, № 21. – P. 210501 (14 pp.).

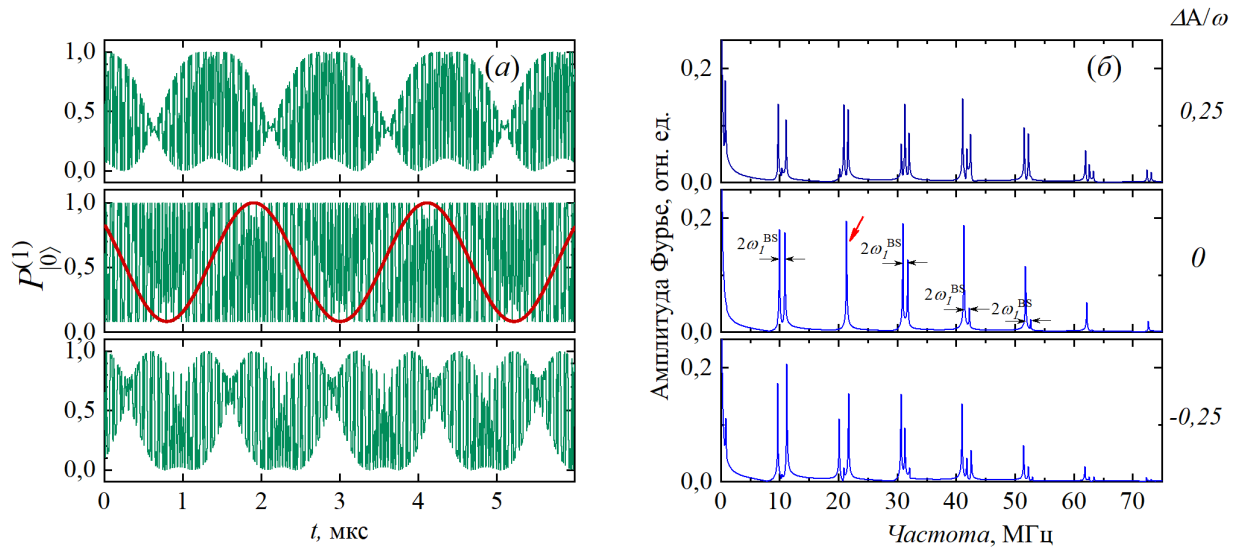


Рисунок 13 – Эволюция населенности основного спинового уровня (а) и ее спектр (б) для рамановских переходов первого порядка [17-А; 18-А]

Действительно, используя разложение уравнения для населенности при $\Delta A / \omega = 0$ с помощью ряда функций Бесселя, зависящая от времени его часть может быть записана как

$$\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(a^*) \exp\left\{i\left[\left((n-k)\omega - \omega_k^{BS}\right)t - a^* + n\pi/2\right]\right\} + \text{к.с.}$$

Из этого выражения непосредственно следует, что линии с более высокой частотой в дублете $(2k\omega - \omega_k^{BS}, 2k\omega + \omega_k^{BS})$ при $n = -k$ и $n = 3k$ исчезают, потому что их амплитуда $J_{-k}(a^*) = 0$ при $\Delta A / \omega = 0$. Предложенный здесь способ прямого наблюдения осцилляций БЗ может быть использован в качестве нового метода исследования квантовых систем при бихроматическом возбуждении в сверхсильном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Аналитически описаны временные и спектральные особенности излучения фотонов квантовой точкой, возбуждаемой нерезонансным лазерным импульсом. Показано, что увеличение отстройки частоты лазерного поля от частоты экситонного перехода квантовой точки приводит к уширению (сужению) боковых линий и сужению (уширению) центральной линии спектрального триплета Моллова при условии, когда скорость поперечной релаксации больше (меньше) скорости продольной релаксации кубита. Определено условие кроссовера между режимами сужения и уширения, при котором значения ширин всех линий триплета Моллова равны и не зависят от отстройки. Предсказанные режимы согласуются с численными расчетами и экспериментальными данными [7-А; 8-А; 21-А].

2. Определены три качественно различных режима диссипативной динамики двухуровневой системы при сверхсильном возбуждении: 1) коллапс и возрождение осцилляций разности населенностей; 2) экспоненциальное затухание осцилляций, приводящее к их стационарному состоянию с конечной амплитудой; 3) монотонное затухание осцилляций до нуля. В частности, описанный режим с установившимися стационарными осцилляциями может быть использован для длительных манипуляций с квантовой информацией, так как в этом режиме когерентные колебания не ограничены временами релаксации [12-А; 24-А].

3. Обнаружено, что спектр многофотонного излучения при сверхсильном возбуждении двухуровневой системы в дисперсионном приближении состоит из когерентной (узкие дельта-подобные линии на нечетных гармониках возбуждающего поля) и некогерентной (лоренцевы линии на частотах четных гармоник, сдвинутых на величину квазиэнергии двухуровневой системы) составляющих.

Существенно модифицируются не только энергетические состояния двухуровневой системы, но и ее релаксационное поведение. Скорость релаксации $\langle \Gamma_{\parallel} \rangle$ определяется величиной параметра $a = g / \omega$ (g – константа взаимодействия, ω – частота поля) и соотношением скоростей энергетической релаксации γ и чистой дефазировки η : когда $\gamma > \eta$, $\langle \Gamma_{\parallel} \rangle$ уменьшается и изменяется в соответствии с поведением функции Бесселя $J_0(2a)$; при $\gamma < \eta$ $\langle \Gamma_{\parallel} \rangle$ увеличивается и ее вариации инвертируются по сравнению с предыдущим случаем, поскольку функция Бесселя меняет свой знак. При выполнении условия $\gamma = \eta$ величина $\langle \Gamma_{\parallel} \rangle$ не зависит от a и является такой же, как и при слабом возбуждении.

Установлено, что возбуждающее поле может инвертировать некоторые лоренцевы линии спектра излучения, т. е. на определенных частотах вместо,

например, излучения может происходить поглощение фотонов на квазиуровнях двухуровневой системы [15-А].

4. Исследована когерентная динамика спиновых кубитов, возбуждаемых классическим бихроматическим полем, состоящим из сильного резонансного микроволнового (МВ) поля и более слабого радиочастотного (РЧ) поля с частотой ω_{rf} , близкой к частоте Раби ω_1 МВ поля. Показано, что скорости релаксации дважды «одетых» этими полями квантовых состояний кубита не зависят от фазы РЧ поля и определяются соотношением между временами продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации, а именно при $T_2 < T_1$ (при $T_2 > T_1$) увеличение отстройки $\delta = \omega_1 - \omega_{rf} + \Delta_{BS}$ (где Δ_{BS} – сдвиг Блоха – Зигерта (БЗ)) уменьшает (увеличивает) скорость затухания осцилляций Раби на частотах $\omega_{rf} \pm \varepsilon$ (где $\varepsilon = \sqrt{\delta^2 + \omega_2^2}$, ω_2 – константа взаимодействия РЧ поля с кубитом) и одновременно увеличивает (уменьшает) скорость затухания на частоте ω_{rf} [9-А; 10-А; 13-А; 14-А; 19-А; 20-А; 23-А; 27-А].

5. Теоретически установлено, что при увеличении фазы ψ РЧ поля от 0 до $\pi/2$ происходит постепенное уменьшение интенсивности центральной линии в фурье-спектре осцилляций Раби и усиление боковых линий вплоть до полного исчезновения центральной линии при $\psi = \pi/2$. Эти изменения повторяются в обратном порядке при дальнейшем увеличении фазы от $\pi/2$ до π . (Картина изменений в интервале $\pi \leq \psi \leq 2\pi$ точно такая, как и в интервале $0 \leq \psi \leq \pi$). Результаты по фазовой чувствительности фурье-спектров осцилляций Раби были непосредственно использованы японскими исследователями при тестировании созданного ими портативного устройства для наблюдения импульсного магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе [9-А].

6. Теоретически показано, что дополнительная декогеренция осцилляций Раби, которая вызывается неоднородностями амплитуды МВ поля и ограничивает время манипулирования кубитом, может быть эффективно подавлена при реализации резонанса Раби, что продемонстрировано на примере гауссовского, косинусоидального и линейного распределений амплитуды МВ поля. Предложенная методика подавления декогеренции использовалась при отладке работы импульсного спектрометра магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе [14-А; 25-А; 28-А].

7. Корреляционная функция второго порядка для резонансной флуоресценции кубита, возбуждаемого МВ и РЧ полями, обладает свойствами, подтверждающими эффект антигруппировки испускаемых фотонов. Акты излучения и поглощения являются многофотонными: излучение или поглощение каждого микроволнового фотона происходит (при $\omega_1 \ll \omega_{rf}$) одновременно с излучением или поглощением множества радиочастотных фотонов. Эти процессы управляются выбором параметров РЧ поля, благодаря чему можно плавно перейти от периодически меняющейся статистики квантов к чисто субпуассоновской, от режима группировки к

антигруппировке квантов. При $\omega_1 = \omega_{rf}$ имеет место эффект коллапса и возрождения колебаний корреляционной функции, вызванный индуцированными РЧ полем осцилляциями Раби между «одетыми» состояниями кубита [10-А; 22-А].

8. С помощью несекулярной теории возмущений, основанной на методе усреднения Крылова – Боголюбова – Митропольского, описаны многофотонные переходы, возбуждаемые МВ и РЧ полями между дважды «одетыми» состояниями спиновых кубитов в стационарном ЭПР для режимов: 1) слабой модуляции вблизи резонанса Раби, когда $\omega_2 \ll \omega_1 \approx \omega_{rf}$ и 2) сильной быстрой модуляции $\omega_2 > \omega_1 \ll \omega_{rf}$ (где ω_1 и ω_2 – частоты Раби МВ и РЧ полей, соответственно, ω_{rf} – частота РЧ поля). Получены аналитические выражения для синфазного и квадратурного сигналов ЭПР с учетом частотных сдвигов БЗ, обусловленных кумулятивным эффектом нерезонансных взаимодействий между возбуждающими полями и спиновой системой. Фитирование экспериментальных данных по полученным формулам с учетом сдвигов БЗ позволит добиваться увеличения точности измерения амплитуды микроволнового магнитного поля в резонаторе. Предсказанная инверсия линии двухфотонного поглощения в квадратурном сигнале в режиме слабой модуляции при прохождении через резонанс Раби подтверждена экспериментально другими исследователями, что позволило им предложить калибровочный стандарт для определения амплитуды МВ поля в ЭПР спектроскопии на основе Р1-центров в алмазе. Полученные результаты могут быть теоретической основой для дальнейшего развития многофотонной стационарной спектроскопии [11-А; 1-А–6-А].

9. Изучена когерентная динамика рамановских переходов, возбуждаемых сверхсильным амплитудно-модулированным МВ полем в двухуровневой системе (кубите). Вращающаяся компонента сверхсильного низкочастотного поля модуляции возбуждает многофотонные переходы между «одетыми» квантовыми состояниями кубита, вызывая осцилляции населенностей этих состояний с частотой Раби. Антивращающаяся компонента поля модуляции также дает значительный вклад в частоту Раби из-за эффекта БЗ. Показано, что с увеличением порядка рамановского перехода частота Раби за счет вращающейся компоненты поля уменьшается, а вклад частотного сдвига БЗ антивращающейся компоненты в частоту переходов между квантовыми состояниями становится доминирующим, причем амплитуда и фаза осцилляций Раби сильно зависят от начальной фазы низкочастотного поля и отстройки от частоты многофотонного резонанса, что хорошо согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными данными для рамановских переходов второго и третьего порядков на NV-центрах в алмазе. Показано, что подходящим выбором параметров кубита и поля модуляции (соответствующих их сверхсильному взаимодействию) можно реализовать ситуацию, когда осцилляции Раби будут формироваться только благодаря эффекту БЗ, что непосредственно проявляется в когерентной

динамике населенностей квантовых уровней в виде названных нами осцилляций БЗ. Соответственно, в фурье-спектрах когерентного отклика появляются дублеты с расщеплением между спектральными линиями, равным двойному сдвигу БЗ. Уникальная возможность прямого наблюдения частотного сдвига БЗ в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий открывает новые возможности использования когерентной рамановской динамики для исследования управляемых квантовых систем в режиме сверхсильного взаимодействия [16-А; 17-А; 18-А; 26-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационного исследования, касающиеся поведения фурье-спектров осцилляций Раби в части их зависимости от фазы РЧ поля, были непосредственно использованы японскими исследователями при тестировании созданного ими портативного устройства для наблюдения импульсного магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе³⁾. Более того, для наладки оптимальной работы этого устройства они использовали предложенную нами методику подавления дополнительной декогеренции осцилляций Раби, вызываемой неоднородностями амплитуды МВ поля (которые ограничивают время манипулирования кубитом), путем реализации резонанса Раби на дважды «одетых» квантовых состояниях кубита.

Был проведен эксперимент⁵⁾ с использованием поликристаллического фталоцианина лития по прецизионному измерению амплитуды микроволнового магнитного поля в резонаторе стационарного ЭПР спектрометра. Для теоретической обработки экспериментальных данных использовались полученные в диссертации формулы для сигналов поглощения ЭПР и в режиме слабой модуляции вблизи резонанса Раби, и в режиме сильной (и быстрой) модуляции. Учет в данных формулах сдвигов типа Блоха – Зигерта, обусловленных кумулятивным эффектом нерезонансных взаимодействий между возбуждающими полями и спиновой системой, позволил экспериментаторам добиться увеличения точности измерения амплитуды микроволнового магнитного поля в резонаторе. Предсказанная возможность инверсии линии двухфотонного поглощения в квадратурном сигнале в режиме слабой модуляции при прохождении через резонанс Раби не только подтвердилась на эксперименте другими исследователями⁴⁾, но и позволила им в результате предложить калибровочный стандарт для определения амплитуды микроволнового поля в ЭПР спектроскопии на основе Р1-центров в алмазе.

Предсказанная уникальная возможность прямого наблюдения частотного сдвига Блоха – Зигерта в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий открывает новые пути использования когерентной рамановской динамики для исследования управляемых квантовых систем в режиме сверхсильного взаимодействия.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. Saiko A.P., Fedoruk G.G., Markevich S.A. Effective field and the Bloch-Siegert shift at bichromatic excitation of multiphoton EPR // *JETP Letters*. – 2006. – Vol. 84, № 3. – P. 130–135; *Письма в ЖЭТФ*. – 2006. – Т. 84, № 3. – С. 159–164.

2-А. Saiko A.P., Fedoruk G.G., Markevich S.A. Multiphoton transitions in a spin system driven by strong bichromatic field // *JETP*. – 2007. – Vol. 105, № 5. – P. 893–899; *ЖЭТФ*. – 2007. – Т. 132, №. 5. – С. 1026 – 1033.

3-А. Fedoruk G.G., Saiko A.P., Markevich S.A., Poklonskaya O.N. Pulsed EPR of P1 centers in synthetic diamond under bichromatic excitation conditions // *Technical Physics Letters*. – 2009. – Vol. 35, № 3. – P. 237–240; *Письма в ЖТФ*. – 2009. – Т. 35, №. 5. – С. 86 – 94.

4-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Multiphoton transient EPR nutations in a doubly resonant bichromatic field // *Current Topics in Biophysics*. – 2010. – № 33. – P. 61–64.

5-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Kolasa A., Markevich S.A. Dissipative dynamics of qubits driven by a bichromatic field in the dispersive regime // *Physica Scripta*. – 2012. – Vol. 85, № 4. – P. 045301 (6 pp.).

6-А. Сайко А.П., Федорук Г.Г., Маркевич С.А. Когерентная динамика спиновых кубитов в бихроматическом поле // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2013. – Т. 4. – С. 16–22.

7-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Decrease in the damping rate of Rabi oscillations of artificial atoms at nonresonant excitation // *JETP Letters*. – 2013. – Vol. 98, № 4. – P. 201–203; *Письма в ЖЭТФ*. – 2013. Т. 98, № 4. – С. 228–230.

8-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Detuning-dependent narrowing of Mollow triplet lines of driven quantum dots // *JETP*. – 2014. – Vol. 118, № 4. – P. 655–661; *ЖЭТФ*. – 2014. – Т. 145, № 4. – С. 747–753.

9-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Relaxation, decoherence, and steady-state population inversion in qubits doubly dressed by microwave and radiofrequency fields // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. – 2014. – Vol. 47, № 15. – P. 155502 (10 pp.).

10-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Microwave photon antibunching at the modulation of the resonance frequency of a qubit emitter // *JETP Letters*. – 2015. – Vol. 101, № 3. – P. 193–198; *Письма в ЖЭТФ*. – 2015. – Т. 101, № 3. – С. 212–217.

11-А. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Multi-photon transitions and Rabi resonance in continuous wave EPR // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2015. – Vol. 259. – P. 47–55.

12-А. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Dissipative two-level systems under ultrastrong off-resonant driving // *Physical Review A*. – 2016. – Vol. 93, № 6. – P. 063834 (6 pp.).

13-A. Fedaruk R., Strzelczyk R., Tadyszak K., Markevich S.A., Augustyniak-Jabłokow M.A. Effect of Rabi splitting on the low-temperature electron paramagnetic resonance signal of anthracite // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2017. – Vol. 274. – P. 73–79.

14-A. Saiko A.P., Fedaruk R., Markevich S.A. Suppression of electron spin decoherence in Rabi oscillations induced by an inhomogeneous microwave field // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2018. – Vol. 290. – P. 60–67.

15-A. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Emission spectrum of a qubit under its deep strong driving in the high-frequency dispersive regime // *JETP Letters*. – 2018. – Vol. 107, № 2. – P. 129–133; *Письма в ЖЭТФ*. – 2018. – Т. 107, № 2. – P. 132–133.

16-A. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Multiphoton Raman transitions and Rabi oscillations in driven spin systems // *Physical Review A*. – 2018. – Vol. 98, № 4. – P. 043814 (8 pp.).

17-A. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Bloch–Siegert oscillations in the Rabi model with an amplitude-modulated driving field // *Laser Physics*. – 2019. – Vol. 29, № 12. – P. 124004 (5 pp.).

18-A. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Possibility of direct observation of the Bloch–Siegert shift in coherent dynamics of multiphoton Raman transitions // *JETP Letters*. – 2019. – Vol. 110, № 7. – P. 441–446; *Письма в ЖЭТФ*. – 2019. – Т. 110, № 7. – P. 435–436.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

19-A. Fedaruk G.G., Saiko A.P., Markevich S.A. Dynamics of multiphoton EPR transitions in a strong bichromatic field // *Modern Development of Magnetic Resonance: Abstracts of the International Conference, Kazan, 24–29 September 2007* / Ed.by K.M. Salikhov. – Kazan, 2007. – P. 158–159.

20-A. Fedaruk R., Saiko A.P., Markevich S.A. Multiplication of Qubits in a Doubly Resonant Bichromatic Field: A transient nutation EPR study. // *I Forum EMR-PLI Forum EMR-PL: Abstracts, Rzeszów, Poland, 19-21 May 2010*/Ed. by K. Dziliński. – Rzeszów, 2010. – Vol. 2. – С. 110–114.

21-A. Сайко А.П., Маркевич С.А., Федорук Г.Г. Сужение боковых линий триплета Моллова при нерезонансном возбуждении квантовых точек // *Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2013): сб. докл. VI Междунар. науч. конф., Минск, 15–18 октября 2013* / редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Т. 2. – С. 315 – 317.

22-A. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Photon Antibunching in the Resonance Fluorescence of a Qubit Excited by Microwave and Radio-Frequency Fields // *Proceedings of the 2nd International Conference on Modern Applications of Nanotechnology, Belarus - Iran, Minsk, 6–8 May 2015* / Scientific and practical materials research center. – Minsk, 2015. – P. 100 (3 pp.).

23-A. Fedaruk R., Strzelczyk R., Tadyszak K., Markevich S. A., Augustyniak-Jabłokow M.A. Manifestation of Rabi splitting in the low-temperature EPR of anthracite // *Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2016):*

материалы VII Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 ноября 2016 / редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 2. – С. 232 – 234.

24-А. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. The coherent dynamics of two-level system under ultrastrong off-resonant driving // Наноструктурные материалы-2016: Беларусь - Россия - Украина (НАНО-2016): сб. докл. V Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 ноября 2016 / редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 100-103.

25-А. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Electron spin coherence enhanced by Rabi resonance in solids // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2018): материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 24–28 сентября 2018 / редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 2. – С. 134 – 136.

26-А. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Counter-rotating effects in coherent dynamics of Raman transitions// Actual Problems of Solid-State Physics: Proc. of the IX International Scientific Conference, Minsk, 22–26 November 2021 / Ed. by: V.M. Fedosyuk [et al.]. – Minsk, 2021. – Vol. 1. – P. 108–112.

Тезисы докладов на научных конференциях

27-А. Fedaruk R., Saiko A.P., Markevich S.A. Effective fields of multiphoton EPR transitions in a bichromatic (microwave and radio frequency) field //XXII Conference on Radio and Microwave Spectroscopy (RAMIS 2007), Będlewo, Poland, 22-25 April 2007.– Będlewo, 2007. – P. 14.

28-А. Saiko A.P., Markevich S.A., Fedaruk R. Coherent manipulation of electron qubits in pulsed EPR experiments with the bichromatic driving // V Forum EMR-PL: Abstracts, Wrocław, 19-21 May 2018/ Ed. by: R. Starosta [et al.]. – Wrocław, 2018. – P. 36.

РЕЗЮМЕ

Маркевич Сергей Александрович

Диссипативная когерентная динамика многофотонных переходов в твердотельных кубитах при моно- и бихроматическом возбуждении

Ключевые слова: осцилляции Раби, многофотонные резонансы, сдвиг Блоха – Зигерта.

Цель работы: теоретическое описание диссипативной когерентной динамики многофотонных переходов в твердотельных кубитах, сильно взаимодействующих с классическими моно- и бихроматическими полями, в применении к задачам резонансной флуоресценции, импульсной магниторезонансной и рамановской спектроскопии.

Методы исследования: метод матрицы плотности; несекулярная теория возмущений, основанная на методе усреднения Боголюбова; супероператоры Линдблада для описания процессов диссипации и дефазировки; квантовая регрессионная теорема при вычислении корреляционных функций первого и второго порядков и др.

Полученные результаты и их новизна состоят в теоретическом объяснении условий перехода между режимами сужения и уширения линий триплета Моллова для квантовых точек в твердых телах, в определении новых режимов диссипативной динамики двухуровневой системы при сверхсильном возбуждении в дисперсионном приближении; в объяснении характера релаксации дважды «одетых» состояний кубита в бихроматическом микроволновом (МВ) и радиочастотном (РЧ) поле в режиме сильной связи спиновой системы с РЧ полем; в получении корреляционной функции второго порядка для резонансной флуоресценции кубита в бихроматическом поле для режимов слабого и сильного МВ поля; в демонстрации возможности подавления дефазировочного эффекта неоднородности микроволнового поля в образце в бихроматическом поле; в описании многофотонных переходов между дважды «одетыми» состояниями спиновых кубитов в стационарной ЭПР спектроскопии для режимов слабой модуляции вблизи резонанса Раби и сильной быстрой модуляции; в получении аналитических выражений для синфазного и квадратурного сигналов поглощения ЭПР с учетом частотных сдвигов Блоха – Зигерта; в описании когерентной динамики рамановских переходов в кубите, возбуждаемых сверхсильным амплитудно-модулированным МВ полем вне приближения вращающейся волны; в демонстрации возможности прямого наблюдения частотного сдвига Блоха – Зигерта в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий.

Рекомендации по использованию: создание устройств магнитосенсорики, спинтроники, фотоники.

Областью применения являются спинтроника, фотоника, квантовая метрология, магнитосенсорика, квантовые вычисления.

РЭЗІЮМЭ

Маркевіч Сяргей Аляксандравіч

Дысіпатыўная кагерэнтная дынаміка шматфатонных пераходаў у цвёрдацельных кубітах пры мона- і біхраматычным узбуджэнні

Ключавыя словы: асцыляцыі Рабі, шматфатонныя рэзанансы, зрух Блоха – Зігерта.

Мэта працы: тэарэтычнае апісанне дысіпатыўнай кагерэнтнай дынамікі шматфатонных пераходаў у цвёрдацельных кубітах, якія моцна ўзаемадзейнічаюць з класічнымі мона- і біхраматычнымі палямі, у прымяненні да задач рэзананснай флуарэсцэнцыі, імпульснай магнітарэзананснай і раманаўскай спектраскапіі.

Метады даследавання: метады матрыцы шчыльнасці; несекулярная тэорыя ўзбурэнняў, заснаваная на метады асераднення Багалюбава; супераператары Ліндблада для апісання працэсаў дысіпацыі і дэфазіроўкі; квантавая рэгрэсійная тэарэма пры вылічэнні карэляцыйных функцый першага і другога парадкаў і інш.

Атрыманыя вынікі і іх навізна складаюцца ў тэарэтычным тлумачэнні ўмоў пераходу паміж рэжымамі звужэння і пашырэння ліній трыплета Молава для квантавых кропак у цвёрдых цэлах, у вызначэнні новых рэжымаў дысіпатыўнай дынамікі двухузроўневай сістэмы пры звышмоцным узбуджэнні ў дысперсійным набліжэнні; у тлумачэнні характару рэлаксацыі двойчы апранутых станаў кубіта ў біхраматычным мікрахвалёвым (МХ) і радыёчастотным (РЧ) поле ў рэжыме моцнай сувязі спінавай сістэмы з РЧ полем; у атрыманні і апісанні карэляцыйнай функцыі другога парадку для рэзананснай флуарэсцэнцыі кубіту ў біхраматычным поле для рэжымаў слабога і моцнага МХ поля; у дэманстрацыі магчымасці падаўлення дэфазіруючага эфекту неаднароднасці мікрахвалёвага поля ва ўзоры ў біхраматычным поле; у апісанні шматфатонных пераходаў паміж двойчы «апранутымі» станамі спінавых кубітаў у стацыянарнай ЭПР спектраскапіі для рэжымаў слабой мадуляцыі зблізка рэзанансу Рабі і моцнай хуткай мадуляцыі; у атрыманні аналітычных выказаў для сінфазнага і квадратурнага сігналаў ЭПР з улікам частотнага зруха Блоха – Зігерта; у апісанні кагерэнтнай дынамікі раманаўскіх пераходаў у кубіце, якія ўзбуджаюцца звышмоцным амплітудна-мадуляваным МХ полем па-за набліжэння хвалі якая верціцца; у дэманстрацыі магчымасці прамога назірання частотнага зруха Блоха – Зігерта у выглядзе асцыляцый, а таксама ў выглядзе расшчаплення спектральных ліній.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: стварэнне прылад магнітасэнсорыкі, спінтронікі, фатонікі.

Вобласцю прымянення з'яўляюцца спінтроніка, фатоніка, квантавая метралогія, магнітасэнсорыка, квантавыя вылічэнні.

SUMMARY

Markevich Siarhei Alexandrovich

Dissipative coherent dynamics of multiphoton transitions in solid-state qubits under mono- and bichromatic excitation

Keywords: Rabi oscillations, multiphoton resonances, Bloch – Siegert shift.

The aim of this research is to provide a theoretical description of the dissipative coherent dynamics of multiphoton transitions in solid-state qubits that strongly interact with classical monochromatic and bichromatic fields. The research is applied to problems of resonant fluorescence, pulsed magnetic resonance, and Raman spectroscopy.

The research methods include the density matrix method, non-secular perturbation theory based on the Bogolyubov averaging method, the Lindblad superoperators method for describing dissipation and dephasing processes, and the quantum regression theorem for calculating correlation functions of the first and second orders.

The results obtained and their novelty consist of: a theoretical explanation of the conditions for the transition between the regimes of narrowing and broadening of the Mollow triplet lines for quantum dots in solids; determination of new regimes of dissipative dynamics of a two-level system driving by ultrastrong field in the dispersive regime; explanation of the nature of the relaxation of doubly dressed states of a qubit in a bichromatic microwave (MW) and radiofrequency (RF) field in the regime of strong coupling of the spin system with the RF field; obtaining and describing the second-order correlation function for the resonant fluorescence of a qubit in a bichromatic field for regimes of weak and strong MW fields; demonstration of the possibility of suppressing the dephasing effect of the inhomogeneity of the microwave field in the sample in a bichromatic field; description of multiphoton transitions between doubly "dressed" states of spin qubits in continuous wave EPR spectroscopy for regimes of weak modulation near the Rabi resonance and strong fast modulation; obtaining analytical expressions for the in-phase and out-of-phase absorption EPR signal, considering the Bloch-Siegert shift; description of the coherent dynamics of Raman transitions of a qubit driven by a superstrong amplitude-modulated MW field out of the rotating-wave approximation; demonstration of the possibility of direct observation of the Bloch-Siegert effect in the form of oscillations, as well as in the form of splitting of spectral lines.

The recommendations for use include the creation of devices for magnetosensorics, spintronics, and photonics.

This research has applications in spintronics, photonics, quantum metrology, magnetosensorics, and quantum computing.



Научное издание

Маркевич Сергей Александрович

**ДИССИПАТИВНАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ДИНАМИКА
МНОГОФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КУБИТАХ
ПРИ МОНО- И БИХРОМАТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Подписано в печать 10.05.2023.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,51. Тираж 60 экз. Заказ № 160.

ФТИ НАН Беларуси.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.
220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.