

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Ликерова Родиона Фаридовича** «Релаксационные и магнитные свойства 3d- и 4f- ионов в монокристаллах ортосиликатов $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$ по данным ЭПР», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Диссертационное исследование Р.Ф.Ликерова посвящено магнитно-резонансному исследованию свойств образованных 3d и 4f ионами магнитных центров в кристаллах ортосиликатов Y_2SiO_5 и Sc_2SiO_5 . Целью исследования было определение характеристик спинового гамильтониана примесных центров, определение характеристик тонкой и сверхтонкой структуры спектров магнитного резонанса и, в частности, определение релаксационных свойств для исследованных примесных центров. Актуальность поставленных задач связана с возможными применениями в квантовой информатике: ядерный спины изолированных магнитных центров обладают большим временем хранения информации, кристаллы ортосиликатов оптического качества применяются в лазерных устройствах, что позволяет использовать оптические методики для воздействия на электронные состояния примесных центров, а электрон-ядерное взаимодействие позволяет «передавать» ядерным спинам это воздействие. Таким образом, получение информации о расположении примесных центров в структуре ортосиликатов, о свойствах их электронной и ядерной подсистем и их взаимодействии составляет актуальную задачу, решение которой носит также и определенную методическую ценность для развития техники применения методов магнитно-резонансной спектроскопии.

Выбор метода исследования – спектроскопии магнитного резонанса (непрерывного и импульсного) – адекватен поставленным задачам. Высокая чувствительность методики магнитного резонанса к изменениям окружения магнитного иона позволяет различать сигналы примесных центров в разном кружении и идентифицировать это окружение. Методика спинового эха и другие импульсные методики являются одним из наиболее надежных способов определения времени жизни спиновых состояний.

В ходе выполнения поставленных задач Р.Ф.Ликеров произвел достаточно большое количество работ по подготовке образцов, проведению экспериментов по непрерывному магнитному резонансу, обработке результатов экспериментов по непрерывному и импульсному магнитному резонансу и общей интерпретации полученных данных. Таким

образом, в работе присутствует несомненный личный вклад автора, позволяющий судить о его квалификации.

Диссертационное исследование Р.Ф.Ликерова состоит из введения, пяти содержательных глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, коротко описываются задачи и методы исследования и формулируются выносимые на защиту положения.

В первой главе содержится литературный обзор по теме диссертационного исследования. В частности, в этом обзоре обосновывается по литературным сведениям возможность использования кристаллов ортосиликатов в качестве матриц для введения магнитных центров, что позволяет осуществить связь между оптическим воздействием на кристалл («чтением/записью» информации) и квантовым состоянием ядерного спина примесного центра («хранением» информации). В этой главе также приводится обзор известных свойств примесных центров, образованных редкоземельными 4f элементами и переходными 3d элементами. Этот обзор показывает, что исследуемые в работе центры характеризуются большими (до нескольких секунд при сверхнизкой температуре) временами спин-решеточной релаксации, что подтверждает возможность их использования для хранения квантовой информации.

Во второй главе рассматривается применяемая в диссертационном исследовании методика и характеризуются используемые образцы. В этом разделе подробно описана и охарактеризована (таблицами и рисунками) структура исследуемых ортосиликатов иттрия и скандия, описаны возможные позиции примесных центров в их структуре. После этого коротко рассмотрены принципы магнитного резонанса, обсуждается возможность определения различных характеристик из анализа спектров магнитного резонанса, даётся краткое описание импульсных методов ЭПР и преимущества их применения для определения релаксационных характеристик спиновых состояний магнитного центра.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования кристаллов ортосиликата иттрия (как изотопически обогащенного, так и с природным содержанием изотопов кремния) с магнитными центрами Nd и Yb.

Проведен анализ полученного методом импульсного ЭПР спектра резонансного поглощения магнитных центров Nd^{3+} с ярко выраженной сверхтонкой структурой, для двух компонент сверхтонкой структуры определена методом спинового эхо температурная зависимость времени спин-решеточной и фазовой релаксации в интервале температур 4-10 К. Сильная зависимость времени спин-решеточной релаксации от температуры (изменение на 6 порядков!) описана с учетом процессов релаксации Рамана и Аминова-Орбаха. Для времени фазовой релаксации показано, что в кристаллах изотопически чистых по кремнию (только кремний-28) время фазовой релаксации оказывается в 2-3 раза больше. По известным из оптических измерений данным для энергий крамеровских дублетов иона неодима в ортосиликате и измеренным в ЭПР эксперименте значениям главных компонент g-тензора определены параметры кристаллического поля для ионов Nd^{3+} .

Для ионов Yb^{3+} обнаружено два набора спектров поглощения со сверхтонкой структурой, соответствующих различным кристаллографическим позициям. Измерены времена спин-решеточной и фазовой релаксации для некоторых из линий сверхтонкой структуры. Показано, что температурная зависимость времени спин-решеточной релаксации описывается суммой вкладов Рамана и Аминова-Орбаха. Различие времен фазовой релаксации, измеренных «простым» методом спинового эха и при помощи последовательности импульсов Карра-Парселла-Мейбаума-Гилла (КПМГ) указывают на

большую роль процессов спиновой диффузии в процесс фазовой релаксации, так как вклад таких процессов подавляется последовательностью импульсов КПМГ.

В четвёртой главе исследуется поведение парамагнитных центров Cr^{3+} в матрицах ортосиликатов иттрия и скандия. В отличие от редкоземельных ионов, для переходного 3d иона хрома расщепление уровней тонкой структуры невелико (около 50 ГГц), поэтому наблюдается богатый спектр магнитного резонанса из нескольких линий тонкой структуры с дополнительным сверхтонким расщеплением. Наблюдаемая картина резонансного поглощения дополнительно осложняется наличием двух магнитно-неэквивалентных позиций примесного иона.

Для обоих матричных кристаллов (иттриевого и скандиевого) из анализа угловой зависимости спектров ЭПР определены главные значения и ориентация осей для D-тензора, описывающего тонкую структуру спектра, и определены параметры сверхтонкого взаимодействия. При этом обнаружена интересная особенность спектра магнитного резонанса – в некоторых ориентациях магнитного поля сверхтонкая структура преобразуется из четверки линий, ожидаемых для «обычно разрешенных» переходов с нулевым изменением проекции ядерного спина, в тройку линий, соответствующих «обычно запрещенным» переходам между подуровнями с ненулевым изменением проекции ядерного спина. Проведен теоретический анализ интенсивности разрешенных и запрещенных переходов, показывающий связь этого эффекта со смешиванием электронных спиновых подуровней в присутствии D-тензора орторомбической симметрии. Этот результат является наверно наиболее интересным результатом работы, так как показывает возможность изменения состояния ядерного спина за счёт легко возбуждаемых переходов между электронными спиновыми состояниями.

Также при помощи методики импульсного ЭПР исследованы времена релаксации для центров хрома, показано, что время спин-решеточной релаксации и в этом случае описывается суммой рамановского вклада и вклада Аминова-Орбаха

В пятой главе исследован парамагнитный резонанс центров V^{4+} в кристалле Sc_2SiO_5 . Обнаружена чётко выраженная сверхтонкая структура спектра магнитного резонанса без признаков расщепления спиновых подуровней в нулевом поле, что свидетельствует о спине примесного центра $S=1/2$. Это наблюдение позволяет сделать вывод, что ионы Sc^{3+} при образовании примесного центра замещаются зарядово неэквивалентными ионами V^{4+} . Анализ угловых зависимостей спектров ЭПР позволил определить параметры тензора сверхтонкого взаимодействия и g-тензора для формирующихся примесных центров. При помощи методики импульсного ЭПР измерены времена спиновой релаксации в интервале температур от 4 до 30 К.

В заключении перечисляются основные результаты диссертационного исследования.

В целом представленный текст диссертации достаточно полно и понятно отражает суть проведённой работы. Автореферат корректно отражает содержание и основные результаты диссертационной работы. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах.

К работе имеются следующие замечания:

1. На мой взгляд, в квалификационной работе, каковой является диссертационная работа, в области экспериментальной физики желательно уделить больше внимания описанию используемых экспериментальных методик. К сожалению, в работе нет схемы экспериментальной установки, не поясняется есть ли принципиальные отличия в приборах, используемых для

- измерений непрерывного и импульсного ЭПР (например – добротность резонатора), не указывается на использование модуляционной методики в непрерывном ЭПР (что приводит к наблюдению производной от поглощения), описание импульсных методов дано очень поверхностно (описывается несколько типов импульсных последовательностей, но не обсуждается, что именно они позволяют измерить).
2. При представлении результатов анализа данных в тексте диссертационной работы часто не уделяется внимание анализу точности и надежности результатов либо не указываются какие-то используемые ограничения. Например, при анализе времен релаксации центров неодима (рис. 3.3) отсутствие информации о погрешности не позволяет судить, насколько существенно различие между свойствами образца с природным содержанием изотопов кремния и образца, обогащенного по кремнию-28.
 3. Одним из ярких экспериментальных результатов работы является наблюдение доминирующей интенсивности «запрещенных» переходов с изменением проекции ядерного спина на 1 в некоторых ориентациях магнитного поля для магнитных центров хрома. Этот эффект интересен как методически, так и в связи с возможностью управления состояниями ядерного спина. Однако, к сожалению, иллюстративный экспериментальный материал приведен крайне скупо и читателю приходится прилагать усилия, чтобы понять почему наблюдение квадруплета линий относится к разрешенным переходам, а наблюдение триплета линий магнитного резонанса – к запрещенным переходам. Теоретический анализ этого эффекта (рис. 4.5 и 4.18) в тексте диссертации приводится без подкрепления формулами, по которым эти вероятности рассчитывались.
 4. Одной из сквозных идей диссертационного исследования является измерение и анализ времен релаксации (спин-решеточной и фазовой) при помощи импульсного ЭПР. Здесь также имеются следы некоторой неаккуратности при представлении и формулировке результатов. Например, в разных местах диссертации рамановский вклад в спин-решеточную релаксацию описывается как T^9 (стр.40) или как T^7 (стр.77), а на стр. 102 перепутаны коэффициенты при рамановском вкладе и вкладе Аминова-Орбаха (причем эта путаница со степенями рамановского вклада прослеживается не только в формулах, но и в размерностях определенных при подгонке коэффициентов). Кроме того, автор неоднократно повторяет некорректное, на мой взгляд, утверждение, что использование импульсной последовательности Карра-Парселла-Мейбаума-Гилла позволяет «увеличить время фазовой релаксации» - если два метода измерения (два типа последовательностей) номинально одной физической величины дают сильно разные результаты, то, на мой взгляд, корректнее говорить, что измеряются по сути разные характеристики, чем говорить, что изменение метода измерения существенно улучшает физические свойства системы.
 5. В работе есть многочисленные опечатки и редакторские недочеты. Например, в оглавлении отсутствует название Главы 3; во введении при описании разработанности темы нет ссылок на список литературы (приводятся только фамилии авторов ключевых работ); есть незначительная путаница в ссылках по тексту (таблица 3.5 ссылается на формулу (1), хотя на самом деле подразумевается ссылка на формулу (2) из работы).

Перечисленные недостатки отчасти носят редакторский и стилистический характер и не снижают ценности работы. В представленном диссертационном исследовании получен ряд новых экспериментальных результатов по свойствам магнитных центров в матрицах

ортосиликатов, определены характеристики тонкой и сверхтонкой структуры этих центров, определены занимаемые примесными центрами позиции, определены их релаксационные свойств. Полученные результаты представляют методический интерес по развитию применения методик магнитно-резонансной спектроскопии в физике, а также возможно могут представлять интерес для применений в области квантовой информатики и лазерных технологий. В работе достаточно полно отражена оригинальность исследования и личный вклад автора.

Я считаю, что диссертационная работа «Релаксационные и магнитные свойства 3d- и 4f- ионов в монокристаллах ортосиликатов $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$ по данным ЭПР» **удовлетворяет требования** п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а сам соискатель Ликеров Родион Фаридович **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Глазков Василий Николаевич



28.02.2024
м. подп.

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П. Л. Капицы Российской академии наук

Контактная информация:
телефон: +7(499)137-32-48,
электронная почта: glazkov@kapitza.ras.ru

Адрес: Россия, 119334 г. Москва, ул. Косыгина, д.2
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физических проблем им. П. Л. Капицы
Российской академии наук

Подпись ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физических проблем им. П. Л. Капицы Российской академии наук Глазкова В. Н. заверяю:



зам. директора ИФП РАН
А.М.Трояновский

