

**РЕШЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА УрФУ 1.3.04.16
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК**

от «26» марта 2024 г. №4

о присуждении Ликерову Родиону Фаридовичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «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» по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений принята к защите диссертационным советом УрФУ 1.3.04.16 «30» января 2024 г., протокол № 2.

Соискатель, Ликеров Родион Фаридович 1995 года рождения, в 2019 г. окончил ФГАУО ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет» по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика»; в 2023 г. окончил очную аспирантуру ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» Министерства науки и Высшего Образования Российской Федерации по научной специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений; работает в должности младшего научного сотрудника в лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков в Казанском физико-техническом институте имени Е. К. Завойского – обособленном структурном подразделении ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» Министерства науки и Высшего Образования Российской Федерации с 01.11.2019 и по настоящее время.

Диссертация выполнена в лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского обособленного структурного подразделения - ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» Министерства науки и Высшего Образования

Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Еремина Рушана Михайловна, Казанский физико-технический институт – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» Министерства науки и Высшего Образования Российской Федерации, лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Герашенко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, лаборатория кинетических явлений, ведущий научный сотрудник;

Глазков Василий Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем имени П.Л. Капицы Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник;

Романов Николай Георгиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, лаборатория микроволновой спектроскопии кристаллов, старший научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертационную работу.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 17 работ, из них 8 статей опубликованных в рецензируемых научных изданиях и проиндексированы в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации 4,185 п. л., авторский вклад 0,592 п. л.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1) Eremina R. Investigations of $Y_2SiO_5: Nd^{143}$ by ESR method / R. Eremina, T. Gavrilova, I. Yatsyk, I. Fazlizhanov, **R. Likеров**, V. Shustov, Yu. Zavartsev, A. Zagumennyi, S. Kutovoi // JMMM. – 2017. – V. 440. – P. 13 – 14. 0,125 п.л. / 0,014 п.л. (Scopus, Web of Science);

2) Sukhanov A. A. ESR Study of $Y_2SiO_5:Nd^{143}$ Isotopically Pure Impurity Crystals for Quantum Memory / A. A. Sukhanov, V. F. Tarasov, R. M. Eremina, I. V. Yatsyk, **R. F. Likеров**, A. V. Shestakov, Yu. D. Zavartsev, A. I. Zagumennyi, S. A. Kutovoi // Appl. Magn. Reson. – 2017. – V. 48, Iss. 6. – P. 589 – 596. 0.5 п.л. / 0,056 п.л. (Scopus, Web of Science);

3) Sukhanov A. A. Crystal environment of impurity Nd^{3+} ion in yttrium and scandium orthosilicate crystals / A.A. Sukhanov, **R.F. Likеров**, R.M. Eremina, I.V. Yatsyk, T.P. Gavrilova, V.F. Tarasov, Y.D. Zavartsev, S.A. Kutovoi // Journal of Magnetic Resonance. – 2018. – V. 295. – P. 12 – 16. 0,31 п.л. / 0,039 п.л. (Scopus, Web of Science);

4) **Likеров R. F.** Spin relaxation of the $^{171}Yb^{3+}$ ion in the $Y_2^{28}SiO_5$ crystal / **R.F. Likеров**, V.F. Tarasov, A.A. Sukhanov, A.V. Shestakov, R.M. Eremina, Yu. D. Zavartsev, S.A. Kutovoi // Magn. Reson. Solids. – 2020. – V. 22. – 20201. 0,81 п.л. / 0,12 п.л. (Scopus, Web of Science);

5) Tarasov V. F. EPR spectroscopy of ^{53}Cr monoisotopic impurity ions in a single crystal of yttrium orthosilicate Y_2SiO_5 / V.F. Tarasov, I.V. Yatsyk, **R.F. Likеров**, A.V. Shestakov, R.M. Eremina, Yu. D. Zavartsev, S.A. Kutovoi // Optical Materials. – 2020. – V. 105. – 109913. 0,31 п.л. / 0,044 п.л. (Scopus, Web of Science);

6) Tarasov V. F. EPR Spectroscopy of $^{53}Cr^{3+}$ Monoisotopic Impurity Ions in a Single Crystal of Scandium Orthosilicate Sc_2SiO_5 / V.F. Tarasov, R.M. Eremina, K.B. Konov, **R.F. Likеров**, A.V. Shestakov, Yu. D. Zavartsev, S.A. Kutovoi // Appl. Magn. Reson. – 2021. – V. 52. – P. 5 – 14. 0,63 п.л. / 0,089 п.л. (Scopus, Web of Science);

7) Sukhanov A. A. Temperature Dependencies of the Spin Relaxation Times for the Isotopically Pure Chromium Impurity $^{53}\text{Cr}^{3+}$ in the Yttrium Orthosilicate Single Crystal $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ / A.A. Sukhanov, V.F. Tarasov, **R.F. Likero**v, R.M. Eremina, Yu. D. Zavartsev, S.A. Kutovoi // Appl. Magn. Reson. – 2021. – V. 52. – P. 1175 – 1185. 0,69 п.л. / 0,11 п.л. (Scopus, Web of Science);

8) **Likero**v R. F. Hyperfine effects and electron spin relaxation of $^{51}\text{V}^{4+}$ doped into scandium orthosilicate $\text{Sc}_2^{28}\text{SiO}_5$: CW and pulsed X – band electron spin resonance studies / **R.F. Likero**v, R.M. Eremina, I.V. Yatsyk, K.B. Konov, V.A. Shustov, Yu. D. Zavartsev, S.A. Kutovoi // Appl. Magn. Reson. – 2023. – V. 53. – P. 477 – 489. 0,81 п.л. / 0,12 п.л. (Scopus, Web of Science).

На автореферат поступило 4 положительных отзыва от:

Гончарь Людмилы Эдуардовны, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет путей сообщения», г. Екатеринбург;

Котова Леонида Нафанаиловича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой радиофизики и электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина», г. Сыктывкар;

Оглобличева Василия Владимировича, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, заведующего лаборатории диффузии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург;

Уланова Владимира Андреевича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры «Промышленная электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический

университет», г. Казань.

В отзывах на автореферат были приведены следующие замечания как к тексту автореферата, так и к его содержанию:

- 1) Некорректно приведено обозначение группы симметрии $C2/c$ на странице 9;
- 2) Отсутствует анализ гамильтониана (3) с точки зрения симметрии примесного центра;
- 3) В работе указываются конкретные изотопы ионов, выступавших в качестве примесей. Но если для ионов хрома, неодима и иттербия такой подход понятен, т.к. стабильных изотопов у этих ионов несколько, то в случае ионов ванадия указание изотопа кажется излишним в силу того, что у ванадия только один стабильный изотоп – ^{51}V ;
- 4) В автореферате отсутствует минимально-необходимое описание конкретных методик импульсных экспериментов ЭПР, что затрудняет понимание полученных данным методом результатов;
- 5) Не приведены кривые восстановления времен спин-решеточной релаксации и их обработки, достаточно было бы привести несколько характерных примеров;
- 6) В автореферате часто встречается температура $T = 4 \text{ K}$, хотя известно, что температура кипения жидкого гелия при нормальном атмосферном давлении составляет $T = 4,215 \text{ K}$. Обычно, округление происходит до значения $T = 4,2 \text{ K}$;
- 7) В таблице 2 на странице 12 и на рисунке 5 на странице 13 не указано, для какой ориентации кристаллов $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ и $\text{Sc}_2^{28}\text{SiO}_5$ были получены результаты изучения температурной зависимости времен релаксации T_1 и T_m для ионов $^{143}\text{Nd}^{3+}$;
- 8) На рисунке 8а (страница 16) на вертикальной оси указаны значения скорости спин-решеточной релаксации для иона $^{53}\text{Cr}^{3+}$ в кристалле $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$, в то время как в подрисуночной подписи указывается, что эта ось соответствует времени спин-решеточной релаксации;

9) В тексте автореферата обнаружено небольшое число синтаксических ошибок.

Выбор официальных оппонентов обусловлен их высокой научной компетентностью в области физики магнитного резонанса диэлектрических кристаллов, легированных редкоземельными ионами и группы железа, известных своими работами в изучении особенностей релаксационных и резонансных явлений в этих системах.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, является научно-квалификационной работой, в которой решена научная экспериментальная задача – исследованы особенности процессов спиновой релаксации парамагнитных центров, образованных примесными редкоземельными ионами и ионами группы железа в монокристаллах ортосиликатов, что имеет значение для практической реализации устройств оптической квантовой памяти.

Также была решена теоретическая научная задача, а именно получены параметры кристаллического поля в модели эффективного спинового гамильтониана для описания экспериментальных зависимостей спектров стационарного электронного парамагнитного резонанса примесных ионов неодима, что имеет значение для улучшения теоретических подходов к описанию процессов, проходящих в исследуемых системах.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку.

В рамках выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

Показано, что замещение ионов скандия (Sc^{3+}) и иттрия (Y^{3+}) в монокристаллах ортосиликатов зависит в первую очередь от вида

примесного иона. Так, ионы неодима $^{143}\text{Nd}^{3+}$, хрома $^{53}\text{Cr}^{3+}$ и ванадия $^{51}\text{V}^{4+}$ замещают ионы скандия или иттрия в кристаллографической позиции с шестикратным кислородным окружением, в то время как ионы иттербия замещают ионы иттрия в двух кристаллографических позициях, имеющих как шести-, так и семикратное кислородное окружение.

Из аппроксимации экспериментальных ориентационных зависимостей спектров стационарного ЭПР были найдены параметры эффективного спинового гамильтониана, отвечающего за взаимодействие примесного иона $^{143}\text{Nd}^{3+}$ с кристаллическим полем в ортосиликатах моноклинной симметрии, позволяют получить значения электронных уровней энергии основного состояния и значения компонент g -тензора, которые с хорошей степенью точности описывают экспериментальные результаты ЭПР и оптических измерений. Для системы $^{51}\text{V}^{4+}:\text{Sc}_2^{28}\text{SiO}_5$ показано, что параметры эффективного спинового гамильтониана, полученные из анализа ориентационных зависимостей спектров ЭПР измеренных в двух ортогональных плоскостях, описывают эти зависимости с достаточной степенью точности.

Для всех исследованных образцов было показано, что температурная зависимость спин-решеточной релаксации может быть описана моделью, состоящей из трех компонент, описывающих различные процессы релаксации: однофононный прямой процесс релаксации, двухфононный процесс релаксации Рамана и двухфононный процесс релаксации Аминова – Орбаха. Также, поведение температурной зависимости времени спин-решеточной релаксации зависит от изотопической чистоты применяемой кристаллической матрицы. Обнаружено, что в монокристалле $^{143}\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ вклад процесса Рамана в спин-решеточную релаксацию изменяется в два раза по сравнению с монокристаллом $^{143}\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$. Кроме этого, для этих двух образцов было выявлено, что время фазовой релаксации для монокристалла с изотопически чистым кремнием, измеренное для двух компонент сверхтонкой структуры спектра ЭПР, длиннее, чем для монокристалла с естественным содержанием изотопов кремния: при

температуре $T = 4$ К, $T_m = 124 \pm 0.2$ мкс против $T_m = 97 \pm 0.2$ мкс для высокополевой компоненты сверхтонкой структуры ($H = 5880$ Э и $H = 5840$ Э соответственно) и $T_m = 47 \pm 0.2$ мкс против $T_m = 29 \pm 0.2$ мкс для низкополевой компоненты сверхтонкой структуры ($H = 3090$ Э и $H = 2540$ Э соответственно).

Для ионов, допированных в кристаллы $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$, время спин-решеточной релаксации при 10 К составляет $T_1 \approx 1,3$ мс для ионов хрома Cr^{3+} и $T_1 \approx 3,5$ мс для ионов ванадия V^{4+} , что значительно выше соответствующих значений для ионов Nd^{3+} ($T_1 \approx 8$ мкс) и ионов иттербия Yb^{3+} ($T_1 \approx 30$ мкс). Этот факт делает перспективным использование кристаллов $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$, легированных элементами группы железа, в устройствах квантовой памяти в области рабочих температур выше $T = 10$ К.

При использовании Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) метода было получено значение времени фазовой релаксации, в семь раз превышающее соответствующие результаты измерений двухимпульсным методом, а именно, $T_m = 146 \pm 10$ мкс при $T = 5$ К для ионов $^{171}Yb^{3+}$ в монокристалле $Y_2^{28}SiO_5$.

В диссертационной работе были впервые выполнены измерения релаксационных характеристик примесных ионов $^{143}Nd^{3+}$, $^{171}Yb^{3+}$, $^{53}Cr^{3+}$, $^{51}V^{4+}$ в изотопически чистых монокристаллах ортосиликатов $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$, в состав которых входит только изотоп кремния ^{28}Si вместо изотопов природного содержания.

Все эти результаты имеют следующую область применения: результаты, касающиеся релаксационных процессов, позволяют определиться с выбором примесных ионов и монокристаллов для реализации устройств оптической квантовой памяти; в то же время, параметры моделей спинового гамильтониана, полученные в работе и описывающие экспериментальные результаты с хорошей точностью, позволяют разработать подходы для теоретического описания результатов, которые будут получены для других похожих систем в дальнейшем.

На заседании 26 марта 2024 г. диссертационный совет УрФУ 1.3.04.16 принял решение присудить Ликерову Р. Ф. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет УрФУ 1.3.04.16 в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета
УрФУ 1.3.04.16



Германенко Александр Викторович

Ученый секретарь
диссертационного совета
УрФУ 1.3.04.16



Овчинников Александр Сергеевич

26 марта 2024 г.