

ОГЛАВЛЕНИЕ



организаторы

программный комитет

спонсоры

предисловие

Организаторы



Общественная организация
«Российское акустическое
общество»



Научный совет РАН
по акустике



АО «Акустический институт
имени академика
Н.Н. Андреева»

Спонсоры

Финансовую поддержку конференции оказали:



Генеральный спонсор:
Акционерное общество
«Акустический институт
имени академика Н.Н.
Андреева»



Спонсор:
Группа компаний
«Акустик Групп»

Место проведения конференции: город Москва, ул. Шверника, дом 4.
Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева»

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Егерев Сергей Викторович – сопредседатель, д.ф.-м.н., ИНИОН РАН
Есинов Игорь Борисович – сопредседатель, д.ф.-м.н., АО «АКИН»
Миронов Михаил Арсеньевич – сопредседатель, к.ф.-м.н., АО «АКИН»
Максимов Герман Адольфович – зам председателя, д.ф.-м.н., АО «АКИН»
Гурбатов Сергей Николаевич (ННГУ, Нижний Новгород)
Балакшиев Владимир Иванович (МГУ, Москва)
Бибииков Николай Григорьевич (АКИН, Москва)
Бобровницкий Юрий Иванович (ИМАШ РАН, Москва)
Вировлянский Анатолий Львович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Вознесенский Александр Сергеевич (ГИ НИТУ МИСиС, Москва)
Диденкулов Игорь Николаевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Ерофеев Владимир Иванович (ИПМ РАН, Нижний Новгород)
Канев Николай Григорьевич (АКИН, Москва)
Кедринский Валерий Кириллович (ИГЛ СО РАН, Новосибирск)
Копьев Виктор Феликсович (ЦАГИ, Москва)
Кузнецова Ирен Евгеньевна (ИРЭ РАН, Москва)
Куличков Сергей Николаевич (ИФА РАН, Москва)
Лучинин Александр Григорьевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Ляксо Елена Евгеньевна (СПбГУ, Санкт-Петербург)
Макаров Денис Владимирович (ТОИ ДВО РАН, Владивосток)
Малеханов Александр Игоревич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Петников Валерий Георгиевич (ИОФ РАН, Москва)
Потапова Родмонга Кондратьевна (МГЛУ, Москва)
Савицкий Олег Анатольевич (АКИН, Москва)
Сапожников Олег Анатольевич (МГУ, Москва)
Серебряный Андрей Нинелович (АКИН, ИО РАН, Москва)
Субботкин Антон Олегович (ИОФ РАН), Москва
Тарасов Сергей Павлович (ИНЭП ЮФУ, Таганрог)
Томилина Татьяна Михайловна (ИМАШ РАН, Москва)
Хохлова Вера Александровна (МГУ, Москва)
Цукерников Илья Евсеевич (НИИСФ РААСН, Москва)
Чижов Виталий Юрьевич (ФГУП КГНЦ, Санкт-Петербург)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Максимов Герман Адольфович (АКИН) – председатель
Юдина Елена Васильевна (РАО, АКИН) – зам. председателя
Григорьев Альберт Генрихович (АКИН); *Корольков Захар Александрович* (АКИН)
Ларичев Владимир Андреевич (АКИН); *Лесонен Дмитрий Николаевич* (АКИН)
Марухин Владимир Юрьевич (АКИН)

УДК 534

ISBN 978-5-89118-890-7

DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38817

Сборник Трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. –
М., ГЕОС, 2024, 1232с.

Всероссийская политематическая научная конференция «XXXVI сессия Российского акустического общества» с успехом состоялась в Москве в октябре 2024 года. На конференции были рассмотрены современные проблемы развития акустики, в частности, в области физической акустики, нелинейной акустики, оптоакустика, акустики океана, геоакустики, акустических метаматериалов, архитектурной и строительной акустики, атмосферной акустики, биоакустики и медицинских приложениях акустических методов, в акустике речи, ультразвуковых технологий, при распространении и дифракции волн, аэроакустики, акустоэлектроники, музыкальной акустики и шумов и вибраций. В научную программу конференции были включены более 180 докладов и приняли участие более 150 ученых, которые представили свои доклады во всех областях акустики. В конференции приняли участие ученые и специалисты из более 50 научных учреждений, предприятий и университетов из более чем 15 городов России.

Представленные в докладах результаты относятся как к фундаментальным, так и к прикладным исследованиям и техническим разработкам, связаны с развитием акустических технологий. Наряду с докладами, представленными на конференции ведущими российскими специалистами, значительная часть результатов получена с участием молодых ученых. Более 70 докладов представлено на конференции молодыми специалистами и аспирантами. Активное участие научной молодежи в конференции указывает на перспективы дальнейшего развития представленных исследований и разработок.

В настоящий сборник трудов конференции включены 180 докладов. Разнообразие тематики и высокий научный уровень представленных материалов свидетельствуют о том, что работы отечественных специалистов в области акустики развиваются весьма успешно и по многим из направлений они сохраняют передовые позиции.

Материалы настоящего сборника будут полезны как для начинающих ученых, аспирантов и студентов соответствующих специальностей обучения, так и для широкого круга специалистов в области акустики и ее приложений.

Материалы сданы в издательство 1-18 сентября 2024 г.

Подписано к тиражированию дисков 18.09.2024

Уч.-изд. 154.0 п.л. Тираж 210 экз.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ PLENARY REPORTS	6
СЕКЦИЯ АКУСТИКА ОКЕАНА OCEAN ACOUSTICS SECTION.....	36
СЕКЦИЯ АРХИТЕКТУРНАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА ARCHITECT AND BUILDING CONSTRUCTION ACOUSTICS SECTION	222
СЕКЦИЯ АТМОСФЕРНАЯ АКУСТИКА ATMOSPHERIC ACOUSTICS SECTION	282
СЕКЦИЯ АЭРОАКУСТИКА AEROACOUSTICS SECTION.....	333
СЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ ACOUSTIC METAMATERIALS SECTION	429
СЕКЦИЯ МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА MUSIC ACOUSTICS SECTION	451
СЕКЦИЯ ШУМЫ И ВИБРАЦИИ NOISE AND VIBRATIONS SECTION	473
СЕКЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН WAVE PROPAGATION AND DIFFRACTION SECTION	514
СЕКЦИЯ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА ACOUSTOELECTRONICS SECTION.....	584
СЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ACOUSTICS MEASUREMENTS AND STANDARDIZATION SECTION.....	666
СЕКЦИЯ БИОАКУСТИКА И МЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ BIOACOUSTICS AND MEDICAL APPLICATION OF ACOUSTIC METHODS.....	688
СЕКЦИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА PHYSICAL ACOUSTICS SECTION.....	829
СЕКЦИЯ АКУСТИКА РЕЧИ SPEECH ACOUSTICS SECTION	966
СЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА NONLINEAR ACOUSTICS SECTION.....	1065
СЕКЦИЯ ГЕОАКУСТИКА GEOLOGY ACOUSTICS SECTION.....	1123
СЕКЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ULTRASOUND TECHNOLOGY SECTION	1177

Содержание секции Физическая акустика

Экспериментальное и численное исследование акустической радиационной силы, действующей на цилиндрической рассеиватель в воде в поле фокусированного ультразвукового пучка Котельникова Л.М., Цысарь С.А., Сапожников О.А.....	832
Роль сдвиговых волн при фокусировке ультразвукового пучка через расположенный в жидкости твердотельный слой Асфандияров Ш.А., Сапожников О.А.....	839
Акустическая диагностика газовых пузырьков и эффективные параметры жидкости с пузырьками Буланов В.А.	846
Экспериментальное исследование влияния звуковых колебаний на характеристики полидисперсных пузырьков в воде Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Галеева Л.Х.....	853
Современные методы анализа содержания растворенного кислорода в воде Кожарин Н.Ю., Павлов Г.И.	859
Экспериментальные исследования акустических параметров полиуретана Миронов М.А., Пятаков П.А., Савицкий О.А., Шуляпов С.А.	865
Предварительное моделирование распространения звука в жидкой среде с примесями Дамдинов Б. Б., Пригожих В. А.	872
Распределение энергии поверхностного источника в упругом анизотропном полупространстве: асимптотика, диаграммы направленности, линии тока Глушков Е.В, Глушкова Н.В.....	878
Исследование собственных форм и частот при динамическом изгибе стержня с переменными параметрами методом пеано Захаров Д. Д., Никитин И.С., Никитин А.Д.	885
Акустическое исследование реологических свойств полиметилсилоксановых жидкостей Машанов А.Н., Дембелова Т.С., Бадмаев Б.Б.....	892
Акустическая индикация фазового перехода в ионных жидкостях с имидазольными и пиридиновыми основаниями Беленьков Р.Н., Мелентьев В.В., Сычев А.В.	899
Исследование дебаевской диэлектрической релаксации в адсорбированной воде акустоэлектрическим методом Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж., Базарова С.Б., Артемьева К.В.....	905

Бесконтактное определение параметров и механизмов проводимости низкоразмерных полупроводниковых структур акустическими методами Смирнов И.Ю., Дричко И.Л.....	912
Обратные акустические волны в структурах, содержащих пьезоэлектрические пленки и пластины, характеризующиеся сильной анизотропией Дацук Е.Р., Кузнецова И.Е., Смирнов А.В.	919
Расчетно-экспериментальные исследования взаимодействия пульсирующих газовых потоков с дискретными механическими частицами Зайнутдинова Д.А., Горбунова О.А., Теляшов Д.А.....	920
Температурные зависимости скоростей акустических волн в монокристаллах $u_{a3}(v_{o3})^4$ Турчин П.П., Турчин В.И., Бурков С.И., Чулкова М.Ю., Одинцов М.Б.	927
Исследование характеристик чувствительности цилиндрического пьезопреобразователя с учётом акустического оформления Максимов Г.А., Савицкий О.А.....	928
Влияние ультразвука на лазерный пробой и оптическую эмиссию в жидкости Буланов А.В.....	933
Эффективность спин-фононной связи в условиях насыщения сигнала ямр Рочев А.М., Микушев В.М., Чарная Е.В., Нефёдов Д.Ю.....	940

Эффективность спин-фононной связи в условиях насыщения сигнала ЯМР

А.М. Рочев ^a, В.М. Микушев, Е.В. Чарная, Д.Ю. Нефёдов

Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет,
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1

E-mail: ^a st098173@student.spbu.ru

Важнейшим вопросом квантовой акустики является природа ядерного спин-фононного взаимодействия в различных материалах. Эффективность взаимодействия тепловых фононов с ядерными спинами определяет скорость спин-решёточной релаксации ядер. Представлены результаты по снижению эффективности спин-фононной связи за счет подавления вклада парамагнитных центров в релаксацию квадрупольных ядер, для которого использовалось стационарное магнитное поле на ларморовской частоте. Существенное замедление релаксации спинов зафиксировано в области положительной средней спиновой температуры, при этом восстановление ядерной намагниченности со временем описывается суммой двух экспонент. Полученные результаты могут быть использованы для исследования в кристаллах парамагнитных центров малых концентраций с применением стандартных спектрометров ЯМР.

Ключевые слова: ядерное спин-фононное взаимодействие, акустическое и магнитное насыщение линии ЯМР, спин-решеточная релаксация.

PACS: 43.35.Xd, 76.60.-k.

DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38954

Введение

Важнейшим вопросом квантовой акустики является природа ядерного спин-фононного взаимодействия в различных материалах. Эффективность взаимодействия ядерных спинов с тепловыми колебаниями кристаллической решётки характеризуется временем продольной спин-решёточной релаксации. Для ядер, обладающих электрическим квадрупольным моментом, спин-фононная связь в диэлектриках, в основном, осуществляется за счет модуляции градиентов внутрикристаллических полей при изменениях межатомных расстояний [1]. Однако если по соседству с ядром находится парамагнитный центр, например, атом примеси с нескомпенсированным электронным магнитным моментом, то возникает дополнительный «примесный»

механизм спин-фононной связи. В реальных кристаллах даже в случае малых относительных концентраций парамагнитных примесей вплоть до порядка 10^{-7} примесный механизм остается эффективным за счет участия в ядерной релаксации спиновой диффузии [2]. Таким образом, для общей скорости спин-решеточной релаксации квадрупольных ядер можно записать:

$$(T_1^\Sigma)^{-1} = (T_1^{lat})^{-1} + (T_1^{imp})^{-1}, \quad (1)$$

где решеточный вклад $(T_1^{lat})^{-1}$ определяется спин-фононной связью в кристаллах с идеальной решеткой, а примесный вклад $(T_1^{imp})^{-1}$ обусловлен участием в релаксации парамагнитных центров.

В работе [3] сообщалось о возможности подавления примесного механизма спин-фононной связи квадрупольных ядер при использовании методики акустического насыщения сигнала ядерного магнитного резонанса (АН ЯМР). Снижение эффективности примесного вклада в релаксацию обусловлено тем, что парамагнитные центры могут также усиливать взаимодействие соседних ядер с возбуждаемыми в образце резонансными акустическими полями [4]. Это приводит к локальному насыщению ядерной спин-системы и выключению парамагнитных центров из процесса релаксации. Таким образом, наблюдение влияния АН ЯМР на скорость ядерной релаксации дает возможность изучать дефекты кристаллической структуры малых концентраций. В работах [5-7] показано, что к аналогичному эффекту подавления примесной релаксации приводит магнитное насыщение сигнала ЯМР на ларморовской частоте, которое может быть реализовано на промышленных импульсных спектрометрах ЯМР. В настоящем сообщении обсуждаются результаты исследования спин-фононной связи в условиях магнитного насыщения в кристалле NaF.

1. Образцы и методика эксперимента

В качестве образца использовался номинально чистый монокристалл фторида натрия NaF, вырезанный вдоль оси симметрии четвертого порядка. Предварительная характеристика образца проводилась на дифрактометре Bruker «D2 Phaser», на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICPE-9000 (Shimadzu) и на магнитометре MPMS SQUID VSM (Quantum Design). Было установлено, что в образце имеются примесные атомы в следующих концентрациях: Ca (310 ± 40) мг/кг; Mg ($10,5 \pm 1,4$) мг/кг; Fe ($7,93 \pm 1,02$) мг/кг; Sr ($3,1 \pm 0,4$) мг/кг. Для

добавления парамагнитных центров в образце в ходе экспериментов применялось его гамма-облучение от источника ^{60}Co в течении 10 часов с экспозиционной дозой $1.6 \cdot 10^7$ рад до заметного изменения окраски образца. Возникшие в результате облучения образца F_1 и F_2 -центры контролировались с помощью спектров фотолюминесценции при оптической накачке с длиной волны 355 нм с использованием двойного монохроматора МДР-204-2 при температуре 5 К в гелиевом криостате замкнутого цикла «Janis Research Company».

Измерения времен ядерной спин-решеточной релаксации в условии стационарного магнитного насыщения сигнала ЯМР проводились на импульсном спектрометре Bruker Avance III 400, оптимизированном для работы с твердыми образцами, по методике, описанной в работе [7]. Для измерения T_1^Z использовалась стандартная двухимпульсная последовательность для наблюдения восстановления ядерной намагниченности после инвертирующего 180° импульса. Стационарное насыщение ядерной спиновой системы одновременно производилось дополнительным резонансным длинным импульсом. Этот импульс включался перед 180° импульсом за время большее, чем $10T_1^Z$ для наблюдаемых ядерных спинов, и продолжался вплоть до наблюдения сигнала свободной прецессии. Дополнительный импульс отключался на время основных 180° и 90° импульсов. Степень насыщения сигнала ЯМР регулировалась изменением мощности дополнительного импульса. За количественную характеристику стационарного насыщения принимался фактор насыщения, $Z^{st} = M^{st}/M_0$, где M^{st} и M_0 – равновесные значения ядерной намагниченности, пропорциональные интегральной интенсивности сигналов ЯМР, измеряемые в условии полного восстановления ядерной намагниченности после инверсии в присутствии и в отсутствие дополнительного воздействия.

2. Результаты и обсуждение

Наблюдения восстановления средней по объёму образца $\langle M_I \rangle$ ядерной намагниченности ^{23}Na в образце NaF в условиях магнитного насыщения при различных температурах показали, что ход восстановления ядерной намагниченности в области отрицательных значений $\langle M_I \rangle$ для любых значений фактора стационарного насыщения описывается выражением:

$$\langle M_I \rangle(t)/M_0 = Z^{st} \left[1 - b \exp(-t/T_1^Z Z^{st}) \right], \quad (2)$$

где времена восстановления $\tau_1 = T_1^\Sigma Z^{st}$ соответствуют значению T_1^Σ , зависящему только от температуры. Спиновая диффузия обеспечивает влияние парамагнитных центров на релаксацию ядер во всем объеме кристалла только при выполнении условия [2,5]

$$|M_{loc} - M^{st}| < |\langle M_I \rangle - M^{st}|, \quad (3)$$

где M - локальная ядерная намагниченность вблизи парамагнитного центра. В области отрицательных значений $\langle M_I \rangle$ выражение (3) всегда выполняется вплоть до локальных насыщений $M_{loc} \approx 0$ и подавление примесного механизма спин-фононной связи не реализуется.

Для положительных значений $\langle M_I \rangle$ восстановление ядерной намагниченности после инверсии описывается тем же соотношением (3) вплоть до достижения некоторого порогового значения фактора стационарного насыщения Z^{st} . При более сильном насыщении восстановление ядерной намагниченности хорошо описывается суммой двух экспонент с временами τ_1 и $\tau_2 > \tau_1$:

$$\langle M_I \rangle(t)/M_0 = Z^{st} \{1 - \rho \exp[-(t-t_0)/\tau_1] - (1-\rho) \exp[-(t-t_0)/\tau_2]\}, \quad (4)$$

где время t_0 соответствует нулевой интенсивности сигнала, а $0 \leq \rho \leq 1$ получаемый из данных измерений весовой коэффициент. Величину этого коэффициента можно трактовать как долю ядерных спинов, для которых эффективность механизмов спин-фононной связи не изменилась под действием магнитного насыщения сигнала ЯМР. Второе слагаемое в (4) с большим временем восстановления ядерной намагниченности демонстрирует снижение эффективности спин-фононного взаимодействия для остальной части ядерных спинов и соответствующее замедление скорости спин-решеточной релаксации ^{23}Na в условиях магнитного насыщения. В качестве примера на рис. 1 показаны значения времен восстановления ядерной намагниченности и весового коэффициента ρ , рассчитанные по соотношениям (2) и (4) для различных величин фактора стационарного магнитного насыщения при температуре 296 К.

Гамма-облучение образца, приводящее к появлению в объеме кристалла дополнительных парамагнитных центров окраски, существенным образом сказывается на наблюдаемых эффектах. На рис. 1 приведены зависимости времен восстановления ядерной намагниченности ^{23}Na и ρ от фактора стационарного насыщения при комнатной температуре в образце до и после гамма-облучения. Если предположить, что

до облучения времена T_1' и T_1^{lat} близки, то есть примесная релаксация за счет парамагнитных центров полностью подавляется в условиях магнитного насыщения для части ядер, то из (1) получаем оценку для $T_1^{imp} = (17.9 \pm 0.5)$ с.

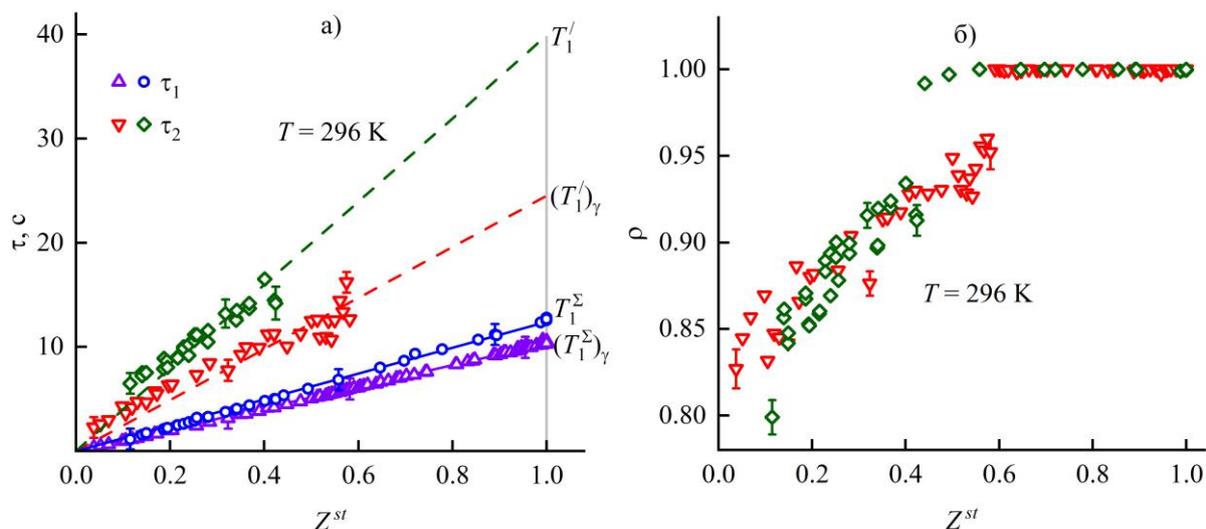


Рис. 1. (а) Времена восстановления ядерной намагниченности ^{23}Na τ_1 и τ_2 в зависимости от фактора стационарного магнитного насыщения Z^{st} . Кружки и ромбы соответствуют данным до радиационного облучения, треугольники и перевернутые треугольники – данным после облучения. (б) Весовые коэффициенты при различном насыщении. Ромбы и перевернутые треугольники показывают результаты расчета до и после облучения соответственно. Погрешности указаны только для некоторых показательных данных.

Как видно из рис. 1, а, появление в результате гамма-облучения центров окраски увеличивает эффективность спин-фононной связи за счет усиления примесного вклада в релаксацию. Так общее время спин-решеточной релаксации квадрупольных ядер ^{23}Na до облучения кристалла составляло $T_1^\Sigma = (12.40 \pm 0.12)$ с, а после облучения $(T_1^\Sigma)_\gamma = (10.33 \pm 0.04)$ с. Согласно (1) можно записать скорость спин-решеточной релаксации после облучения в виде

$$(T_1^\Sigma)_\gamma^{-1} = (T_1^\Sigma)^{-1} + (T_1^F)^{-1} = (T_1^{lat})^{-1} + (T_1^{imp})^{-1} + (T_1^F)^{-1}, \quad (5)$$

где T_1^F - время релаксации с участием центров окраски. Из сравнения времен T_1^Σ и $(T_1^\Sigma)_\gamma$ получаем, что время T_1^F приблизительно равно 61 с. По данным, приведенным на рис. 1, а, можно рассчитать согласно (5) времена релаксации $T_1' = (39.9 \pm 1.7)$ с и $(T_1')_\gamma = (24.5 \pm 1.2)$ с, имеющие смысл времен релаксации до и после гамма-облучения

для части ядер, для которых была отключена примесная релаксация. Различие между скоростями релаксации $(T_1')^{-1}$ и $(T_1')_{\gamma}^{-1}$ равно 0.0167 с^{-1} , что очень близко к $(T_1^F)^{-1}$. Полученный результат демонстрирует отсутствие эффекта подавления релаксации, обусловленной центрами окраски. Это означает выполнение неравенства (3) для ядер около центров окраски при любых значениях Z^{st} .

Заключение

На примере монокристалла NaF экспериментально продемонстрирована возможность влияния на эффективность спин-фононной связи ядер ^{23}Na , имеющих квадрупольный момент, стационарного магнитного насыщения ядерной спин-системы, создаваемого методами ЯМР. Изменение скорости релаксации происходит за счет подавления примесной релаксации, идущей с участием парамагнитных центров и спиновой диффузии. Показано, что магнитное насыщение не подавляет вклад в релаксацию центров окраски, образующихся в кристалле под действием гамма-облучения.

Измерения проводились на оборудовании Ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники».

Список литературы

1. *Абрагам А., Гольдман М.* Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок: в 2-х томах. Мир. М. 1984.
2. *Гольдман М.* Спиновая температура и ЯМР в твердых телах. Мир. М., 1972.
3. *Ефиценко П.Ю., Мавлоназаров И.О., Микушев В.М., Чарная Е.В.* // ФТТ. 1992. **34**, № 6. С. 1753.
4. *Кулешов А.А., Микушев В.М., Столышко А.Л., Чарная Е.В.* // Акуст. журн. 1989. **35**, № 3. С. 473.
5. *Charnaya E.V., Mikushev V.M., Shabanova E.S.* // JPCM. 1994. **6**, № 37. С. 7581.
6. *Mikushev V.M., Charnaya E.V., Lee M.K., Chang L.-J.* // Results Phys. 2019. **12**. С. 1202.
7. *Микушев В.М., Рочев А.М., Чарная Е.В.* // Акуст. журн. 2023. **69**, № 6. С. 695.

Сведения об авторах

публикации «Эффективность спин-фононной связи в условиях насыщения сигнала ЯМР»,
секция «Физическая акустика»

1. Рочев Андрей Михайлович – ученой степени нет, ученого звания нет, должность аспирант; тел.: +7 904 224-42-37, e-mail: st098173@student.spbu.ru.
2. Микушев Владимир Михайлович – кандидат физ.-мат. наук, ученое звание доцент, должность доцент; тел.: +7 921 915-34-25, e-mail: v.mikushev@spbu.ru.
3. Чарная Елена Владимировна – доктор физ.-мат. наук, ученое звание профессор, должность профессор; тел.: +7 911-792-87-38, e-mail: e.charnaya@spbu.ru.
4. Нефёдов Денис Юрьевич - ученой степени нет, ученого звания нет, должность – специалист Ресурсного центра Научного парка СПбГУ; +7 904 617-09-83, e-mail: iverson89@yandex.ru.

**НАЗАД К СОДЕРЖАНИЮ
СЕКЦИИ**