Российская Академия Наук

ИПФ РАН

УНИВЕРСИТЕТ ЛОБАЧЕВСКОГО

ВСЕРОССИЙСКАЯ IV АКУСТИЧЕСКАЯ 2026

РАО

МЦФПИН

АКИН

IV ВСЕРОССИЙСКАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,

совмещенная с XXXVIII сессией Российского научно-технического акустического общества

СБОРНИК ТРУДОВ

УДК 534

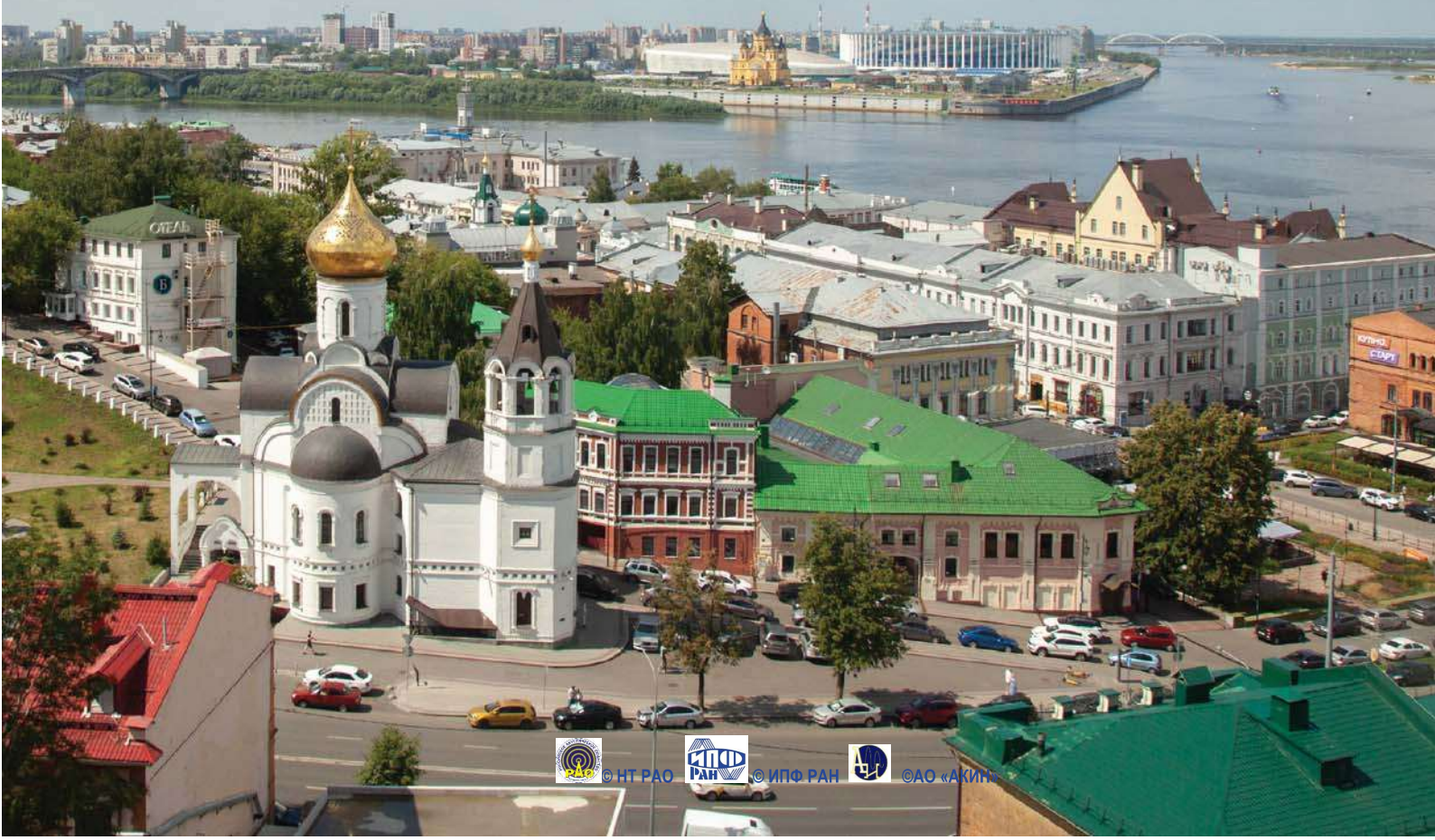
ISBN 978-56055594-4-3

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39428

Нижний Новгород

22 – 26 июня 2026 года

ООО "Издательство "ГЕОС"



© НТ РАО © ИПФ РАН ©АО «АКИН»

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Организаторы
- Программный комитет
- Спонсоры
- Предисловие

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

1.СЕКЦИЯ АОГ – АКУСТИКА ОКЕАНА И ГИДРОАКУСТИКА

2.СЕКЦИЯ ФА – ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

3.СЕКЦИЯ АЭ – АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

4.СЕКЦИЯ РДВ – РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

5.СЕКЦИЯ АИС – АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

6.СЕКЦИЯ АЭР – АЭРОАКУСТИКА

7.СЕКЦИЯ АММ – АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

8.МИНИ-СИМПОЗИУМ 2 МЕДИЦИНСКИЙ УЛЬТРАЗВУК: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ

9.СЕКЦИЯ ГА – ГЕОАКУСТИКА

10.СЕКЦИЯ АСА – АРХИТЕКТУРНАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

11.СЕКЦИЯ МА – МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА

12.СЕКЦИЯ АО –АКУСТООПТИКА

13.МИНИ-СИМПОЗИУМ 1 ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В АКУСТИКЕ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

14.СЕКЦИЯ МДА –МЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА

15.СЕКЦИЯ УТ – УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

16.СЕКЦИЯ АР – АКУСТИКА РЕЧИ, АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНГВИСТИКИ

17.СЕКЦИЯ ШВ – ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

18.СЕКЦИЯ БИО– БИОАКУСТИКА

19.СЕКЦИЯ НА – НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

20.СЕКЦИЯ АА – АТМОСФЕРНАЯ АКУСТИКА

КРУГЛЫЙ СТОЛ - ПРИКЛАДНАЯ АКУСТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Организаторы

Научный совет по акустике Российской академии наук

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук»

Общероссийская общественная организация «Российское научно-техническое акустическое общество»

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

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Фонд «Международный центр – фонд перспективных исследований в Нижнем Новгороде»

Спонсоры

Финансовую поддержку конференции оказали:

Группа компаний «Акустик Групп»

АО «Концерн «Океанприбор»

ООО «Научно-технический центр «Мониторинг»

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ

Есипов Игорь Борисович – профессор, председатель Научного совета по акустике РАН (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, АКИН
Максимов Герман Адольфович – президент Российского научно-технического акустического общества, начальник отделения АКИН
Мареев Евгений Анатольевич – академик РАН, заместитель директора по научной работе ИПФ РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Гурбатов Сергей Николаевич (ННГУ, Нижний Новгород) – сопредседатель
Руденко Олег Владимирович(МГУ, Москва) – сопредседатель
Бобровницкий Юрий Иванович (ИМАШ РАН, Москва)
Вировлянский Анатолий Львович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Гусев Владимир Андреевич (МГУ, Москва)
Диденкулов Игорь Николаевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Дмитриев Константин Вячеславович (МГУ, Москва)
Егерев Сергей Викторович (ИНИОН РАН, Москва)
Егорова Марина Александровна (ИЭФБ РАН, Санкт-Петербург)
Ерофеев Владимир Иванович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Канев Николай Георгиевич (АКИН, Москва)
Копьев Виктор Феликсович (ЦАГИ, Москва)
Коротин Павел Иванович (ИПФ РАН)
Кузнецова Ирен Евгеньевна (ИРЭ РАН, Москва)
Куличков Сергей Николаевич (ИФА РАН, Москва)
Ляксо Елена Евгеньевна (СПбГУ, Санкт-Петербург)
Макаров Денис Владимирович (ТОИ ДВО РАН, Владивосток)
Малеханов Александр Игоревич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Миронов Михаил Арсеньевич (АКИН, Москва)
Монич Дмитрий Викторович (ННГАСУ, Нижний Новгород)
Петников Валерий Георгиевич (ИОФ РАН, Москва)
Поликарпова Наталья Вячеславовна (МГУ, Москва)
Сапожников Олег Анатольевич (МГУ, Москва)
Селезнев Игорь Александрович (Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург)
Собисевич Алексей Леонидович (ИФЗ 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)
Шанин Андрей Владимирович (МГУ, Москва)
Шуруп Андрей Сергеевич (МГУ, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Коротин Павел Иванович (ИПФ РАН) – сопредседатель
Малеханов Александр Игоревич (ИПФ РАН) – сопредседатель
Андрианова Татьяна Анатольевна (ИПФ РАН)
Баженова Екатерина Дмитриевна (АКИН, НТ РАО
Демин Игорь Юрьевич (ННГУ)
Диденкулов Игорь Николаеви (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Евтушенко Андрей Александрович (ИПФ РАН, МЦФПИН)
Казарова Анна Юрьевна (ИПФ РАН)
Калашников Леонид Борисович (ИПФ РАН)
Кротова Светлана Владимировна (ИПФ РАН)
Лабутина Мария Сергеевна (НИУ ВШЭ)
Салин Михаил Борисович (ИПФ РАН)
Смирнов Алексей Владимирович (ИПФ РАН)
Спивак Алексей Евгеньевич (ННГУ)
Усачева Ирина Андреевна (ИПФ РАН)
Чернов Владимир Викторович (ИПФ РАН)
Юдина Елена Васильевна (АКИН, НТ РАО)

Предисловие

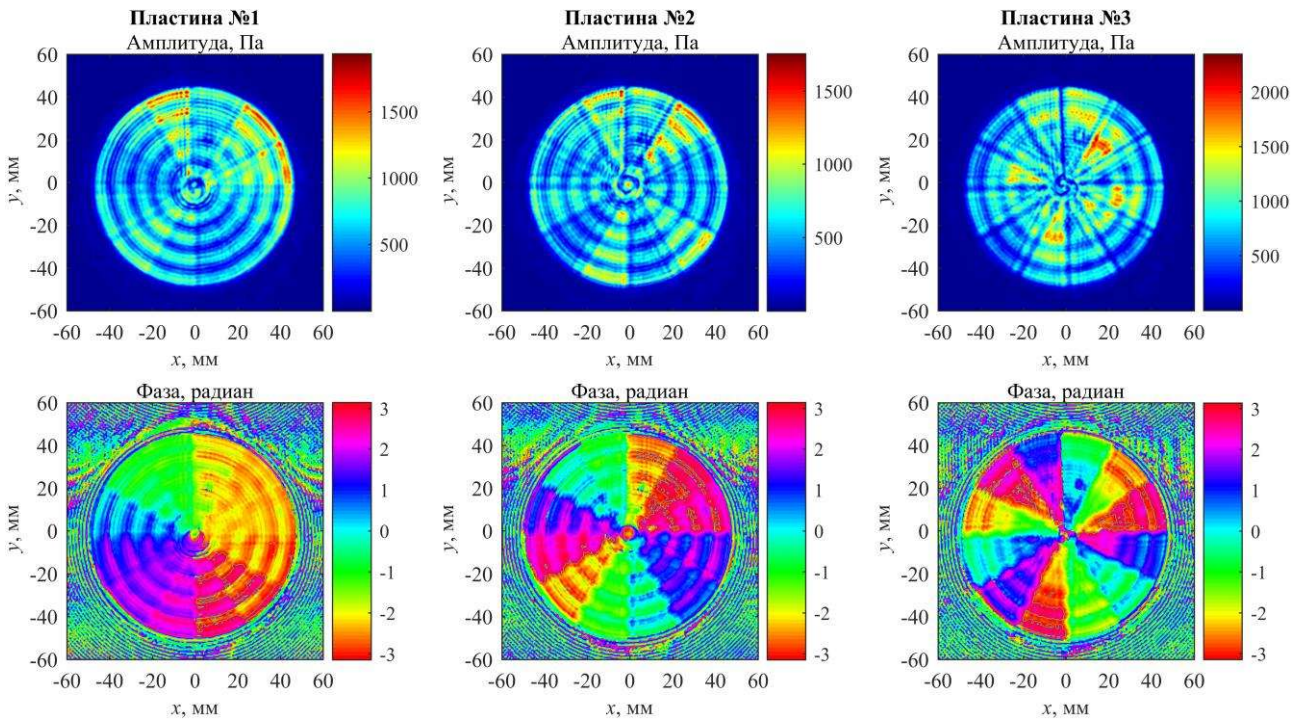
В июне 2026 года в Нижнем Новгороде состоялась IV Всероссийская акустическая конференция, совмещенная с XXXVIII сессией Российского научно-технического акустического общества (НТ РАО). Конференцию принимал в своих стенах Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук», один из ведущих научных центров страны в области акустики и смежных областей.

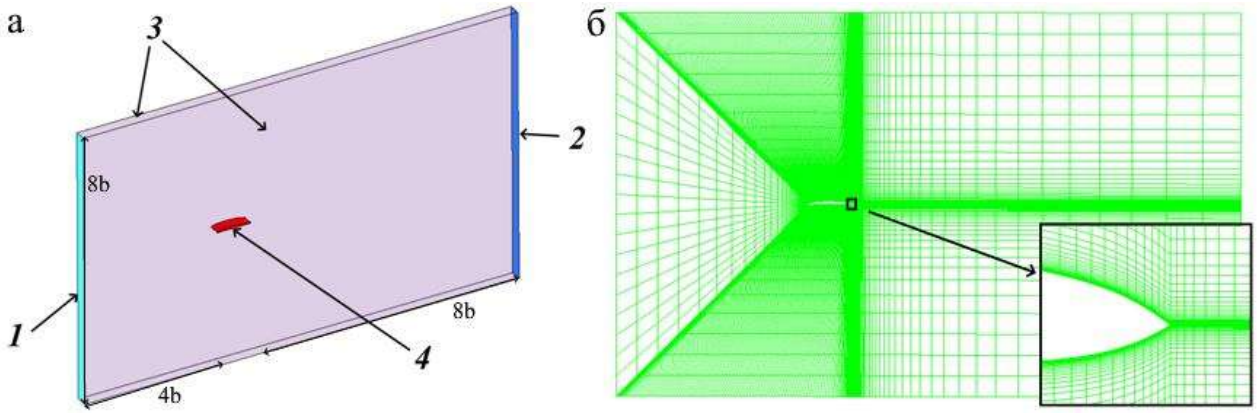
По общему признанию участников, конференция прошла с большим успехом. На конференции были представлены около 350 докладов из многих научных центров и вузов страны (более 60), которые составили программу пленарных сессий и 16 тематических секций (традиционных для ежегодных политематических сессий НТ РАО), а также двух мини-симпозиумов, посвященных обсуждению междисциплинарных направлений исследований в области обратных задач акустики и медицинского ультразвука. Дополнительно к этому, в рамках конференции состоялось обсуждение ряда актуальных вопросов прикладной гидроакустики в формате «круглого стола». Подобное тематическое расширение научной программы акустических конференций представляется полезным опытом и может быть использовано в дальнейшем с учетом текущей актуализации отдельных направлений, особенно тех из них, которые затрагивают «интересы» сразу нескольких тематических секций.

Сборник трудов включает в себя материалы по представленным на конференции докладам. Большинство авторов направили в адрес Оргкомитета полные тексты своих докладов, что позволит читателю получить достаточно ясное представление о ведущихся в стране исследованиях по всем из обсуждавшихся направлений. Представленные в докладах результаты относятся как к фундаментальным, так и к прикладным исследованиям и техническим разработкам, которые связаны с развитием акустических технологий для самых различных применений. Значительная часть докладов (около 70) представлена на конференции молодыми учеными и аспирантами, что указывает на перспективы их дальнейшего профессионального роста и развития представленных ими исследований и разработок.

Таким образом, прошедшая конференция стала наиболее масштабным и авторитетным собранием отечественных специалистов в области акустики за последние годы. Широкое разнообразие тематики и высокий научный уровень представленных докладов свидетельствуют о том, что российская акустика развивается весьма успешно и сохраняет передовые позиции по многим актуальным направлениям исследований и разработок.

СЕКЦИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ФОКУСИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК ДЛЯ ЭХО-ИМПУЛЬСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ФОКУСИРОВКИ
Цысарь С.А., Сапожников О.А. 238

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ДВУМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ 128-ЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В ВОЗДУХЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ “xDDx”
Росницкий П.Б., Лапина А.В., Цысарь С.А., Сапожников О.А. 240

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО МОМЕНТА СИЛ ПРИ ПАДЕНИИ ЗАКРУЧЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА НА ПОГЛОТИТЕЛЬ
Котельникова Л.М., Цысарь С.А., Сапожников О.А. 242

4. ФОРМИРОВАНИЕ КОРОТКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУВОЛНОВОГО СОГЛАСУЮЩЕГО СЛОЯ
Макарьев Д.И., Резниченко А.Н., Швецова Н.А.....249

5. НАБЛЮДЕНИЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ГЕЛИКОИДНОГО ТИПА ПРИ ОБРАЩЕНИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА АКУСТИЧЕСКОГО ВИХРЯ
Крутянский Л.М., Клопотов Р.В. 254

6. ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ТЕОРЕМЫ ДЛЯ РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА
Климов Д.А., Уткин Ю.С., Ермаков С.С., Кузьмин М.В., Игошин В.Д., Петров М.И.....261

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ МОД НА МУЛЬТИПОЛЬНЫЙ ОТКЛИК ЛАБИРИНТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТААТОМА
Тиманкова Ю.А., Смагин М.В., Кузьмин М.В., Ли Юн, Петров М.И.....262

8. РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В СРЕДЕ С ОБОБЩЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ. ТОЧНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ
Максимов А.Г., Максимов Г.А. 264

9. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОМОЧНОГО ШУМА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Суворов А.С., Балакирева Н.В., Смирнов С.А., Севрюков О.Ф. 270

10. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КРОМОЧНОГО ШУМА
Суворов А.С., Зайцева С.Г., Стуленков А.В., Вьюшкина И.А. 276

11. АНИЗОТРОПИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРОБОРАТА ГОЛЬМИЯ
Турчин П.П., Турчин В.И., Бурков С.И., Гудим И.А., Пляскин М.Е., Чулкова М.Ю.....282

12. ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ С КУБИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ
Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Киселев О.Н. 283

13. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПОРИСТОСТИ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ
Курашкин К.В.....289

14. ОСОБЕННОСТЬ ЯДЕРНОЙ СПИН-ФОНОННОЙ СВЯЗИ В ВЫСОКООМНЫХ КРИСТАЛЛАХ GaAs
Рочев А.М., Микушев В.М., Чарная Е.В., Нефедов Д.Ю. 297

15. ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПЛЕНОК ПВДФ И ПВДФ-ТРФЭ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
Сороколетова Н.А., Беляев С.Н., Касьянов Д.А., Дерябин М.С., Белов Д.В.....303

16. ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА, ОТРАЖЁННОГО ОТ ПРЕСНОВОДНОГО И СОЛЁНОГО ЛЬДА В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
Титченко Ю.А., Ковалдов Д.А., Караев В.Ю., Мешков Е.М., Лихоманов В.А., Чернов А.В.....309

17. ТРАНСФОРМАЦИЯ ТИПА МОДЫ УПРУГОЙ ВОЛНЫ В СТРУКТУРАХ AL/ ASN/DIAMOND
Бурков С.И., Пляскин М.Е., Турчин П.П., Турчин В.И. 315

18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КРИСТАЛЛИТОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВОССТАНОВЛЕННЫМ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ АПЕРТУРЫ
Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С.....316

19. СЕЛЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ БЕГУЩИХ УПРУГИХ ВОЛН СИСТЕМОЙ ПОЛОСОВЫХ ПЬЕЗОАКТУАТОРОВ
Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Халтурина Д.Д. 322

20. ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭХОСИГНАЛА ПРИ ДЕФОКУСИРОВАНИИ СФЕРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА
Левин В.М., Петронюк Ю.С.....328

21. ВЗАИМОСВЯЗЬ РАССЕЯНИЯ, ПОГЛОЩЕНИЯ, СКОРОСТИ ЗВУКА И ПАРАМЕТРА НЕЛИНЕЙНОСТИ ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ
Буланов В.А., Соседко Е.В.....334

22. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА В ЖИДКОСТИ
Кожарин Н.Ю., Павлов Г.И., Галеева Л.Х.....340

23. СЛЕПАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ ЭХОСИГНАЛОВ, ИЗМЕРЕННЫХ АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ, ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ
Базулин Е.Г. 346

24. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕТРАБОРАТА СВИНЦА
Турчин П.П., Турчин В.И., Бурков С.И., Зайцев А.И., Пляскин М.Е., Чулкова М.Ю. 352

25. АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ГАЛЛИЙ-СЕРЕБРО В ПОРАХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ОПАЛОВ
Абдуламонов Х.А., Пирозерский А.Л., Чарная Е.В.....353

26. ПОРОГИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ЛАЗЕРНОЙ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТИ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ С РАЗЛИЧНОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ
Буланов В.А., Чудновский В.М. 359

27. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Бикмухаметов Ф.Р. 365

28. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ СЕКТОРНОГО ФОКУСИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
Швецов И.А., Луговая М.А., Швецова Н.А., Колпачева Н.А., Рыбянец А.Н. 366

УДК: 534.29; 537.635; 548.4 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39483

Особенность ядерной спин-фононной связи в высокоомных кристаллах GaAs

А.М. Рочев [a], В.М. Микушев, Е.В. Чарная, Д.Ю. Нефедов

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

E-mail: [a] a.rochev@spbu.ru

Аннотация: Важнейшим вопросом магнитной квантовой акустики является природа ядерного спин-фононного взаимодействия в различных материалах. Эффективность взаимодействия тепловых фононов с ядерными спинами определяет скорость спин-решёточной релаксации ядер, которая регистрируется методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Применение на спектрометре ЯМР Bruker Avance 400 оригинальной методики подавления вклада парамагнитных центров в ядерную релаксацию позволило установить характер взаимодействия электронных центров с соседними ядерными спинами галлия и мышьяка в номинально чистом и легированных высокоомных кристаллах арсенида галлия. Температурные зависимости скоростей различных вкладов в спин-решеточную релаксацию в диапазоне от 50 до 300 К показали, что наличие примесей хрома или меди в кристаллах не меняет доминирующей роли квадрупольного взаимодействия электронных центров с ближайшими ядерными спинами обоих изотопов галлия. Для ядерных спинов ^{75}As во всех образцах заметен вклад магнитной суперсверхтонкой связи. Это согласуется с независимыми данными о большей эффективности магнитного суперсверхтонкого взаимодействия электронных центров с ^{75}As. Легирование медью и хромом практически не сказывается на скорости и характере ядерной спин-решеточной релаксации мышьяка.

Ключевые слова: ядерное спин-фононное взаимодействие, магнитное насыщение линии ЯМР, высокоомные кристаллы GaAs.

Feature of nuclear spin-phonon coupling in GaAs semi-insulator crystals

A.M. Rochev[a], V.M. Mikushev, E.V. Charnaya, D.Yu. Nefedov

St. Petersburg State University, Physics faculty, Russia, 198504, St. Petersburg, Petrodvoretz, Ulyanovskaya 1

E-mail: [a]a.rochev@spbu.ru

Abstract: A key question in magnetic quantum acoustics is the nature of nuclear spin-phonon interactions in various materials. The efficiency of interaction of thermal phonons with nuclear

spins determines the rate of nuclear spin-lattice relaxation, which is recorded by nuclear magnetic resonance (NMR). Application of the unique technique for suppressing the contribution of paramagnetic centers using a Bruker Avance 400 NMR spectrometer allowed us to determine the nature of the interaction of electron centers with the neighbor nuclear gallium and arsenic spins in nominally pure and doped gallium arsenide semi-insulator crystals. Temperature dependences of the rates of various contributions to spin-lattice relaxation within the range from 50 to 300 K showed that the presence of chromium or copper impurities in the crystals does not alter the dominant role of the quadrupole interaction of electron centers with the nearest nuclear spins of both gallium isotopes. For the ^{75}As nuclear spins, a contribution from magnetic superhyperfine coupling is noticeable. This is consistent with independent data demonstrating the greater efficiency of the magnetic superhyperfine interaction of electron centers with ^{75}As. Doping with copper and chromium has virtually no effect on the rate and nature of arsenic nuclear spin-lattice relaxation.

Keywords: nuclear spin-phonon interaction, magnetic saturation of the NMR line, semi-insulator GaAs crystals

PACS: 43.35.Xd, 76.60.−k.

Введение

Материалы на основе высокоомных кристаллов арсенида галлия как чистых, так и легированных, нашли широкое применение в современных технических устройствах, например, кристаллы, легированные хромом, используются для полупроводниковых детекторов рентгеновских систем визуализации [1]. Разработка новых объективных методов контроля и исследования ловушечных электронных центров в таких материалах необходима для оптимизации их свойств. Собственные дефекты в высокоомных кристаллах GaAs, такие как электронные центры EL2, и примесные ионы влияют на эффективность связи фононов и ядерных спинов, что сказывается на скорости ядерной спин-решеточной релаксации. Для твердотельных диэлектриков суммарная скорость восстановления термодинамического равновесия ядерных спинов с системой тепловых фононов имеет вид:

$$\left(T_1^{\Sigma}\right)^{-1} = \left(T_1^{lat}\right)^{-1} + \left(T_1^{ec}\right)^{-1}. \quad (1)$$

Время спин-решеточной релаксации T_1^{lat} за счет «решёточного» вклада для ядер, обладающих электрическим квадрупольным моментом, определяется взаимодействием квадрупольных моментов ядер с динамическими градиентами электрических полей, возникающих при модуляции межатомных расстояний тепловыми фононами [2]. Время релаксации с участием электронных центров T_1^{ec} обусловлено быстрой релаксацией ядерных спинов, расположенных вблизи электронных центров, благодаря суперсверхтонкой связи [2]

с электронным центром и выравниванием ядерной намагниченности по объему кристалла с участием спиновой диффузии.

Экспериментальная методика разделения вкладов в спин-решеточную релаксацию квадрупольных ядер была предложена в работах [3, 4]. Недавно эта методика была распространена на современные коммерческие спектрометры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [5] и дополнительно усовершенствована с использованием более точных аппроксимаций кривых восстановления намагниченности [6, 7]. В настоящей работе проведено разделения вкладов в релаксацию для изотопов галлия и мышьяка в высокоомных номинально чистых и легированных кристаллах GaAs в диапазоне температур 50÷300 К.

1. Образцы и методика эксперимента

Образцы представляют собой монокристаллы GaAs с удельным сопротивлением при комнатной температуре 10^8 Ом см: нелегированный, имеющий концентрацию неконтролируемых примесей не более 10^{15} см^3; и легированные хромом и медью с концентрациями 10^{17} см^3.

Время восстановления сигналов ЯМР к равновесным значениям после инверсии измерялось на спектрометре Bruker Avance III 400 в условиях стационарного магнитного насыщения ядерной спин-системы по методике, описанной в [6]. Уровень стационарного насыщения характеризуется фактором $Z^{st}=A^{st}/A_0$, где A^{st} и A_0 - интегральные равновесные интенсивности линий ЯМР при насыщении и без него. Время восстановления ядерной намагниченности в этом случае равно [8, 9]:

$$\tau = Z^{st} T_1 . \qquad (2)$$

Зависимость относительной интегральной интенсивности ЯМР-сигнала $Z(t)=A(t)/A_0$ от времени задержки t между импульсами π и $\pi/2$ измерялась при факторах насыщения Z^{st} в диапазоне от 0.2 до 1.0. Для отрицательных $Z(t)$ наблюдалась экспоненциальная зависимость:

$$Z(t) = Z^{st}\left[1 - b\exp\left(-t/\tau_1\right)\right], \qquad (3)$$

независимо от величины Z^{st}. Здесь b – численный коэффициент (b<2), зависящий от степени инверсии ядерной намагниченности после π-импульса. Соотношение (3) и линейная зависимость τ_1 от Z^{st} (2) сохраняются для положительных $Z(t)$ при факторах насыщения, не превышающих пороговый Z_{th}^{st}. При более сильном насыщении ($Z^{st} < Z_{th}^{st}$) восстановление ядерной намагниченности при положительных значениях $Z(t)$ не является экспоненциальным и хорошо описываются соотношением:

$$Z(t) = Z^{st}\left\{1 - \rho\exp\left[-\left(t-t_0\right)/\tau_1\right] - (1-\rho)\exp\left[-\left(t-t_0\right)/\tau_2\right]\right\}, \qquad (4)$$

где ρ – доля ядерных спинов в образце, которые релаксируют со временем τ_1, t_0 – время

задержки, соответствующее $Z(t)$=0. Появление второй экспоненты демонстрирует ослабление спин-фононного взаимодействия для части (1-ρ) ядерных спинов.

2. Результаты и их обсуждение

Полученные времена τ_1 и τ_2 позволяют рассчитать времена спин-решеточной релаксации T_1^{Σ} и T_1^{lat} соответственно, а затем оценить время релаксации T_1^{ec} из выражения (1). На рис. 1, *а* для примера показаны результаты измерений τ_1 и τ_2 для ^{75}As при 200 К в нелегированном кристалле GaAs. На рис. 1, *б* показаны соответствующие значения доли ядерных спинов (1-ρ), для которых подавлен вклад электронных центров в релаксацию.

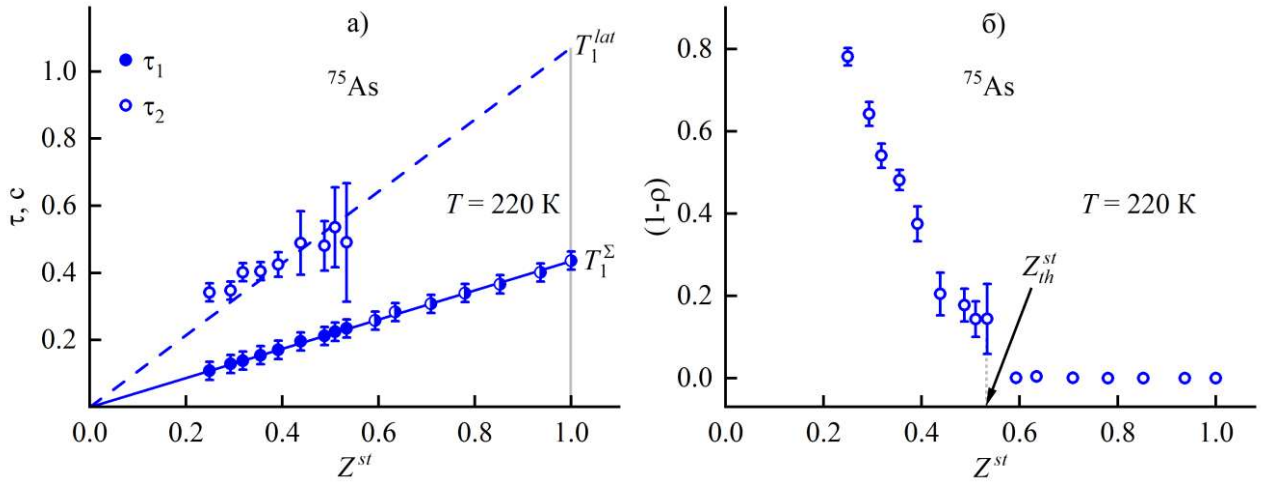


Рис. 1. (а) - Времена восстановления сигналов ЯМР изотопа ^{75}As для различных значений фактора Z^{st} при 220 К; (б) - Доля ядерных спинов (1-ρ), для которых подавлен вклад в спин-решеточную релаксацию с участием электронных центров.

На рис. 2 линиями показаны температурные зависимости скоростей спин-решеточной релаксации $\left(T_1^{\Sigma}\right)^{-1}$, $\left(T_1^{lat}\right)^{-1}$ и $\left(T_1^{ec}\right)^{-1}$ изотопов галлия в нелегированном GaAs, полученные в [8]. Символы демонстрируют результаты измерений в кристаллах, легированным хромом и медью. Из рис. 2 следует, что легирование GaAs не влияет на скорости релаксации для обоих изотопов галлия в рассматриваемом температурном диапазоне. Подчеркнем, что в пределах экспериментальной ошибки отношения между соответствующими скоростями релаксации для ^{69}Ga и ^{71}Ga пропорциональны отношению квадратов их квадрупольных моментов.

На рис. 3 представлены зависимости от температуры скоростей релаксации ^{75}As в нелегированном кристалле и кристалле, легированном медью.

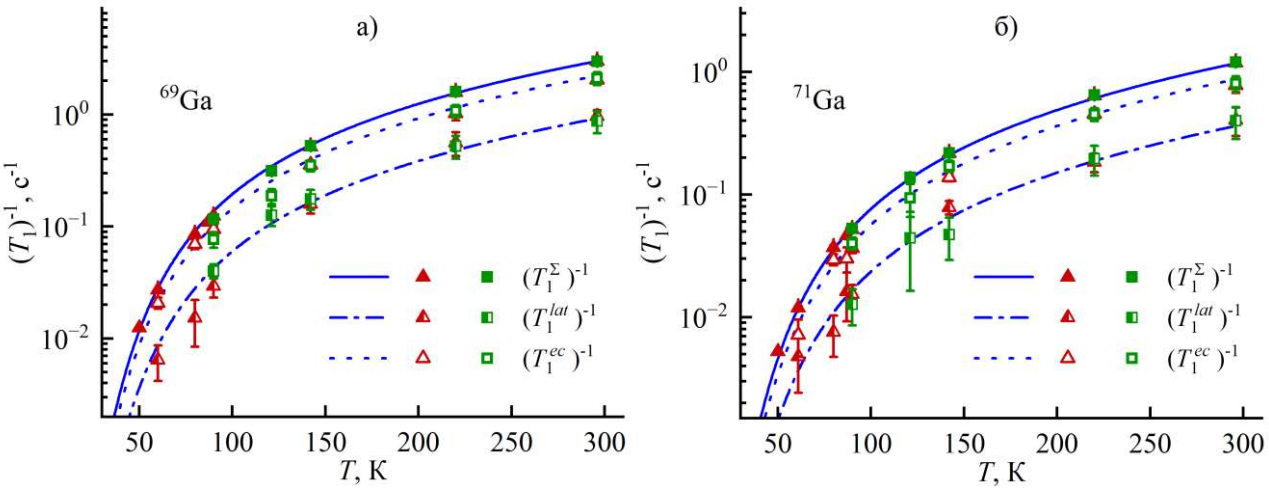


Рис. 2. Скорости спин-решеточной релаксации для (а) - ^{69}Ga и (б) - ^{71}Ga в высокоомных кристаллах GaAs, легированных хромом (квадраты) и медью (треугольники).

Из рис. 3 видно, что «решёточный» вклад T_1^{lat} в релаксацию ^{75}As согласуется с теоретическими предсказаниями для релаксации квадрупольных ядер в диэлектриках [2]. В то же время изменения с температурой T_1^{Σ} и T_1^{ec} не описываются этой моделью ниже 100 К. Такие результаты могут быть объяснены более сильной магнитной связью электронных центров с соседними ядрами мышьяка по сравнению с ядрами галлия. В высокоомных кристаллах GaAs основной вклад в релаксацию, вероятно, вносят центры EL2, включающие структурные дефекты As_{Ga} , которые могут связываться с акцепторной примесью.

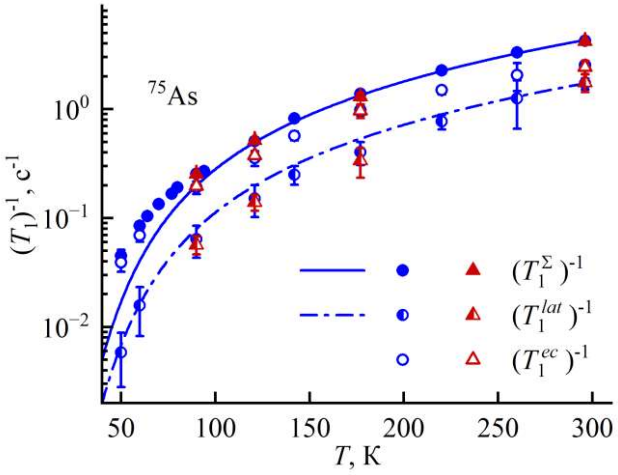


Рис. 3. Изменения с температурой скоростей релаксации ^{75}As в нелегированном (кружки) и легированном медью (треугольники) кристаллах GaAs. Кривые – теоретические зависимости для квадрупольной релаксации [2].

4. Заключение

Наблюдение восстановления ядерной намагниченности после инверсии в условиях стационарного магнитного насыщения спин-системы ядер позволило разделить вклады в спин-решеточную релаксацию галлия и мышьяка в высокоомном GaAs. Показано, что легирование медью и хромом в пределах погрешности не сказывается на скорости

релаксации в диапазоне от 50 до 300 К. Температурные зависимости «решеточного» вклада согласуются с моделью квадрупольной релаксации для всех исследованных ядер. Обнаружено, что скорости суммарной релаксации и релаксации через электронные центры ядер ^{75}As отклоняются от теоретических предсказаний для квадрупольной релаксации.

Измерения проводились на оборудовании Ресурсного центра Научного парка СПбГУ “Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и наноэлектроники” при частичном финансировании в рамках инициативного проекта СПбГУ INI_2026 (Pure ID: 147095248).

Список литературы

1. *Трофимов М.С., Яковлев Н.Н.* Адмиттансные характеристики сенсоров на основе арсенида галлия, компенсированного хромом // ФТТ. 2026. **68**, № 1. С. 3.

2. *Абрагам А., Гольдман М.* Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок: в 2-х томах. Мир. М., 1984.

3. *Charnaya E.V., Mikushev V.M., Shabanova E.S.* Direct measurements of impurity and lattice components of the nuclear spin-lattice relaxation in Al_2O_3 crystals // J. Phys.: Condens. Matter. 1994. **6**, N 37. P. 7581.

4. *Charnaya E.V., Mavlonazarov I., Mikushev V.M.* Separating of Lattice and Impurity Contributions in Nuclear-Spin-Lattice Relaxation Under Steady Saturation // J. Magn. Reson. A. 1995. **112**, N 1. P. 96.

5. *Mikushev V.M., Charnaya E.V., Lee M.K., Chang L.-J.* Suppression of the defect contribution to nuclear spin-lattice relaxation by long rf magnetic pulses for the particular case of ^{23}NaCl // Results Phys. 2019. **12**. P. 1202.

6. *Микушев В.М., Рочев А.М., Чарная Е.В.* Ослабление спин-фононной связи квадрупольных ядер в кристаллах NaF в условиях магнитного насыщения // Акуст. журн. 2023. **69**. № 6. С. 695.

7. *Рочев А.М., Микушев В.М., Чарная Е.В., Серов А.Ю.* Особенности разделения механизмов спин-фононного взаимодействия для ^{23}Na в кристалле NaF в зависимости от температуры и количества парамагнитных центров // Акуст. журн. 2024. **70**. № 5. С. 672.

8. *Rochev A.M., Mikushev V.M., Charnaya E.V.* Quadrupole Spin–Lattice Relaxation of ^{69}Ga and ^{71}Ga in a GaAs Semi-insulator Crystal // Appl. Magn. Reson. 2025. **56**. N 8. P. 1045.

9. *Charnaya E.V., Mikushev V.M., Ulyashev A.M., Yas'kov D.A.* Suppression of impurity relaxation in a γ-irradiated NaCl crystal.// Physica B. 2000. **292**, N 1-2. P. 109.

Научное издание

Сборник трудов

IV Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXXVIII сессией Российского научно-технического акустического общества

Подписано к печати 29.05.2026
Формат 62x94 1/8, уч.-изд.203.1 п.л. Тираж 360 экз.
ООО «Издательство «ГЕОС»

125315 Москва, 1-й Амбулатоный пр. 7/3-114
Тел.: +7 (495) 959 3516, +7 (926)222 3091
e-mail: geos-book@yandex.ru
сайт: www.geos-book.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в НТ РАО
Составитель – Е.Д. Баженова, отв. редактор – Е.В. Юдина
126292 Москва. ул. Шверника, д.4
Тел.: +7 (499) 126-0100, e-mail: ras@akin.ru

Труды изданы без дополнительного редактирования по оригиналам докладов, представленных авторами. Оргкомитет не несет ответственности за стиль и форму изложения представленных материалов