

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.133.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФМ УрО РАН)
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10.10.2025, № 8

О присуждении Кулееву Ивану Игоревичу ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Фокусировка фононов, электронный и фононный транспорт в упруго анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 23.06.2025, протокол заседания №5, диссертационным советом 24.1.133.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Кулеев Иван Игоревич, 1980 года рождения, в 2004 году окончил с отличием Уральский государственный университет им. А. М. Горького, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Ангармонические процессы рассеяния фононов и

кинетические эффекты в кристаллах германия и кремния с изотопическим беспорядком» защитил в 2005 году в диссертационном совете, созданном на базе Ордена Трудового Красного Знамени Института Физики металлов УрО РАН (КТ № 163545), работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Диссертация выполнена в лаборатории кинетических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. **Бычков Игорь Валерьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Челябинский государственный университет", г. Челябинск;
2. **Каган Мирон Соломонович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией электронных процессов в полупроводниковых материалах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, г. Москва;
3. **Кучинский Эдуард Зямович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

дали положительные отзывы на диссертацию И.И. Кулеева.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в своем положительном отзыве, подписанном Бабушкиным Алексеем Николаевичем, доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры физики конденсированного состояния и наноразмерных систем Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» указала, что «диссертация И.И. Кулеева «Фокусировка фононов, электронный и фононный транспорт в упруго анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискания ученой степени доктора физико-математических наук, установленным в «Положения о присуждении ученых степеней» постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (с последующими изменениями), а ее автор, Кулеев Иван Игоревич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 96 опубликованных работ (158 п.л.) включая три монографии, в том числе по теме диссертации опубликовано 36 работ, из них в рецензируемых российских и международных научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, опубликовано 24 статьи, монографий – 3, тезисов докладов в материалах российских и международных конференций – 9.

В результате проведенных исследований автором построена теория электронного и фононного транспорта в упруго анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе, учитывающая эффект фокусировки фононов.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Кулеев, И. Г. Упругие волны в кубических кристаллах с положительной и отрицательной анизотропией модулей упругости второго порядка / И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев. – Текст: непосредственный // ФТТ. – 2007. – Т. 49. – С. 422-429.
2. Фокусировка фононов и электрон-фононное увлечение в полупроводниковых кристаллах с вырожденной статистикой носителей тока / И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев, С. М. Бахарев, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // ЖЭТФ. – 2016. – Т. 150. – С. 567-585.
3. Влияние фокусировки фононов на кнудсеновское течение фононного газа в монокристаллических нанопроводах из материалов спинтроники / И. И. Кулеев, С. М. Бахарев, И. Г. Кулеев, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2017. – Т. 118. – С. 12-22.
4. Влияние фокусировки фононов на кнудсеновское течение фононного газа в монокристаллических нанопленках из материалов спинтроники / И. И. Кулеев, С. М. Бахарев, И. Г. Кулеев, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2017. – Т. 118. – С. 332-344.
5. Кулеев, И. И. Влияние фокусировки на распространение фононов и теплопроводность в монокристаллических пленках с различным типом анизотропии упругой энергии / И. И. Кулеев // ФТТ. – 2018. – Т. 60. – С. 868-874.
6. Кулеев, И. И. Влияние фокусировки фононов на теплопроводность гетероструктур GaAs/AlGaAs при низких температурах / И. И. Кулеев. – Текст: непосредственный // ФТТ. – 2019. – Т. 61. – С. 426-433.
7. Кулеев, И. И. Роль сдвиговых волн в электрон-фононном увлечении в кристаллах калия при низких температурах / И. И. Кулеев, И. Г. Кулеев. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2020. – Т. 121. – С. 1011-1018.
8. Kuleyev, I. G. The effect of phonon focusing on the electron-phonon relaxation and electron transport in potassium crystals / I. G. Kuleyev, I. I. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Chinese Journal of Physics. – 2020. – V. 68. – P. 886-895.

9. Kuleyev, I. I. Phonon focusing and anisotropy of drag thermopower in potassium nanofilms at low temperatures / I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Journal of Physics and Chemistry of Solids. — 2022. – V. 170. – P. 110948-110957.
10. Кулеев, И. Г. Влияние фокусировки на взаимное увлечение электронов и фононов и электросопротивление кристаллов калия / И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев. – Текст: непосредственный // ФТТ. – 2022. – Т. 64. – С. 899-908.
11. Kuleyev, I. G. The role of shear waves in electron-phonon relaxation and electrical resistivity of noble metals / I. G. Kuleyev, I. I. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Chinese Journal of Physics. – 2023. – V. 83. – P. 103-112.
12. Kuleyev, I. I. Dynamic Properties and Focusing of Phonons in Metallic and Dielectric Crystals of Cubic Symmetry. Review 1 / I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography (english only). – 2023. – V. 124. – P. 1-30.
13. Kuleyev, I. I. Phonon Focusing and Electron Transport in Potassium Single Crystals. Review 2 / I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography (english only). – 2023. – V. 124. – P. 31-58.
14. Kuleyev, I. I. Effect of Phonon Focusing and Shear Waves on Drag Thermopower in Potassium Single-Crystal Nanostructures at Low Temperatures. Review 3 / I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography (english only). – 2023. – V. 124. – P. 59-85.
15. Kuleyev, I. I. Effect of Anisotropy of Elastic Energy and Shear Waves on Electron-Phonon Relaxation and Electrical Resistivity of Noble Metals. Review 4 / I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev. – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography (english only). – 2023. – V. 124. – P. 86-105.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От доктора физико-математических наук, профессора Кашенко Михаила Петровича, профессора кафедры общей физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», г.Екатеринбург.

Без замечаний.

2. От доктора физико-математических наук Медведева Михаила Владимировича, главного научного сотрудника лабораторией теоретической физики ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН, г.Екатеринбург.

Замечание 1. Автореферат диссертации описывает ее результаты весьма подробно, однако недоумение вызывает частое использование какого-то узкого внутригруппового жаргона для описания физических величин и соответствующих физических результатов вместо общепринятых понятий. Например, на стр.21 автореферата, 11 строка с низу без каких-либо пояснений появляется новый термин L-фононы (заметим, что на предыдущих страницах автореферата L было длиной образца). Перечитывая текст, из содержания предложений, предшествующего и последующего вышеупомянутой строке, начинаешь догадываться что автор решил таким образом переименовать продольные фононы (L, по-видимому, от английского longitudinal). Попытка сохранить русский термин «продольные» фононы еще раз всплывает на стр. 31, но затем автор русскоязычной диссертации решительно кончает со всякими рецидивами патриотизма и до конца автореферата все результаты объясняет с помощью t_2 фононов (t, вероятно, от английского transversal) и L фононов, как бы не ведая, что в русском языке существуют понятия поперечных и продольных фононов.

3. От доктора физико-математических наук Прудникова Павла Владимировича, главного научного сотрудника отдела материаловедения и физико-химических методов исследования Центра новых химических технологий ИК СО РАН, г. Омск.

Замечание 1. В качестве некоторого замечания к автореферату можно указать, что в представленной диссертации представлено исследование очень широкого ряда объектов: монокристаллы, сверхрешетки, гетероструктуры, но мотивация для выбора указанных объектов недостаточно полно отражена в тексте автореферата диссертации.

4. От доктора физико-математических наук Аржникова Анатолия Константиновича, главного научного сотрудника, и.о. заведующего отделом теоретической физики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

Без замечаний.

5. От кандидата физико-математических наук Чернодубова Даниила Андреевича, старшего научного сотрудника Ресурсного центра электрофизических методов КК НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Без замечаний.

Все отзывы положительные, замечания имеют характер уточнений и пожеланий, не влияя на общую оценку работы.

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук И.В. Бычкова, доктора физико-математических наук М.С. Кагана и доктора физико-математических наук Э.З. Кучинского, а также ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации, относящимся к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Развито новое направление исследований влияния анизотропии упругой энергии на фокусировку фононов, электронный и фононный транспорт в металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе.

- Проанализирована фокусировка фононов и её влияние на распространение упругих волн в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии. Рассчитаны скорости релаксации фононов на границах образцов конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями. Дано физическое объяснение эффектов МакКарди в теплопроводности образцов кремния, а также диэлектрических кристаллов с различным типом анизотропии упругой энергии. Рассчитана и объяснена анизотропия теплопроводности нанопроводов и нанопленок на основе диэлектрических кристаллов, а также материалов спинтроники.

- Исследовано влияние упругой анизотропии и фокусировки фононов на электронный транспорт в монокристаллах калия и благородных металлах, что позволило проанализировать роль квазипоперечных фононов и сдвиговых волн. Показано, что при температурах, гораздо меньших температуры Дебая $T \ll \theta_D$, квазипоперечные фононы, которые ранее не учитывались, вносят доминирующий вклад в электрон-фононную релаксацию. Учет релаксации электронов на сдвиговых компонентах квазипоперечных фононов позволил количественно согласовать результаты расчета температурных зависимостей электросопротивления благородных металлов с данными эксперимента в температурном интервале от 10 до 1000 К без использования подгоночных параметров.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

1. Анализ динамических характеристик упругих волн в кубических кристаллах показал, что в соответствии со знаком безразмерного параметра анизотропии $k-1$ все кристаллы могут быть разделены на два типа: кристаллы с положительной $k-1 > 0$ (тип I) и отрицательной $k-1 < 0$ (тип II) анизотропией упругой энергии. Такое разделение значительно облегчает анализ влияния упругой анизотропии на плотность фононных состояний и фононный транспорт в диэлектрических кристаллах.

2. Разработан метод расчета теплопроводности упругоанизотропных монокристаллических образцов конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечением, учитывающий фокусировку фононов. Показано, что в образцах с круглым и квадратным сечением коэффициент теплопроводности зависит от одного ориентационного параметра – направления теплового потока относительно кристаллографических осей. В образцах с прямоугольным сечением или пленках он зависит уже от двух ориентационных параметров: от направления теплового потока и ориентации широкой грани образца или плоскости пленки.

3. Исследование влияния упругой анизотропии и фокусировки фононов на электронный транспорт имеет как научное, так и практическое значение. Ранее в теории явлений электронного переноса в металлах для фононов использовали модель изотропной среды, в которой учитывали релаксацию электронов только на продольных фононах. В диссертационной работе показано, что квазипоперечные фононы, имеющие значительно больший волновой вектор при фиксированной энергии фонона, вносят значительно больший вклад в электрон-фононную релаксацию, термоэдс увлечения и электросопротивление щелочных и благородных металлов, чем продольные фононы.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Разработанный метод расчета теплопроводности упругоанизотропных монокристаллических образцов конечной длины позволил рассчитать величины эффектов МакКарди в теплопроводности для большой совокупности монокристаллических образцов с различным типом упругой анизотропии. Для микроэлектроники значимость этих результатов заключается в том, что они позволили определить направления осей нанопроводов и ориентации плоскостей пленок для большого набора материалов, которые обеспечивают максимальный теплоотвод от

элементов микросхем, необходимый для стабильной работы микроэлектронных устройств.

2. Влияние упругой анизотропии и фокусировки фононов на электронный транспорт имеет большое практическое значение, поскольку учет релаксации электронов на сдвиговых волнах позволил количественно согласовать результаты расчета температурных зависимостей электросопротивления благородных металлов с данными эксперимента в температурном интервале от 10 до 1000 К без использования подгоночных параметров. В случае калия с различной концентрацией дислокаций удалось согласовать температурные зависимости термоэдс и теплопроводности с экспериментальными данными.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что в диссертационной работе применены широко апробированные методы исследования электронного и фононного транспорта – метод кинетических уравнений для неравновесных функций распределения квазичастиц. При расчете динамических характеристик фононов в кристаллах используются экспериментально определенные значения упругих модулей. Это исключает ошибки при расчете спектров и векторов поляризации фононов, входящих в матричный элемент электрон-фононной релаксации и законы сохранения импульса и энергии квазичастиц. Результаты исследования хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в том, что И.И. Кулеев самостоятельно выбрал тему исследования, поставил цели и задачи диссертационной работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором совместно с сотрудниками лаборатории кинетических явлений ИФМ УрО РАН (И.Г. Кулеевым, С.М. Бахаревым), а также с академиком РАН В.В. Устиновым. Автор лично выполнил расчеты динамических характеристик фононов в кубических кристаллах, скоростей релаксации фононов при диффузном рассеянии на границах для образцов конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечением. Автором

лично проведены систематические исследования анизотропии теплопроводности в гетероструктурах GaAs/AlGaAs. Аналитические расчеты теплопроводности и длин свободного пробега фононов, электропроводности, термоэдс в кубических кристаллах и наноструктурах на их основе проделаны каждым соавтором независимо. Автор лично разработал программы расчетов кинетических коэффициентов, характеризующих электронный и фононный транспорт в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии. Анализ фононного транспорта в наноструктурах на основе диэлектрических кристаллов из материалов для спинтроники выполнены по инициативе и при участии академика РАН В.В. Устинова. Автор активно участвовал в подготовке статей и тезисов, лично представлял доклады на научных конференциях.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение существенной для физики конденсированного состояния проблемы влияния анизотропии упругой энергии на фокусировку фононов, электронный и фононный транспорт в металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе. Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с последующими изменениями).

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 10.10.2025, проведенном в очном режиме, диссертационный совет принял решение присудить Кулееву Ивану Игоревичу учёную степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния рассматриваемой диссертации, 6 докторов наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, 6 докторов наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет, проголосовали: «за» – 18, «против» – нет, «недейств.» – нет.

Председатель заседания,
зам. председателя диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

А.П. Носов

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

Т.Б. Чарикова

10 октября 2025 г.