

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кулеева Ивана Игоревича «Фокусировка фононов, электронный и фононный транспорт в упруго анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа И.И. Кулеева посвящена теоретическому исследованию электронного и фононного транспорта в упруго анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе, при учете эффекта фокусировки фононов.

В работе исследуется широкий спектр современных проблем физики твердого тела. Перечислю некоторые из них: это исследования

распространения упругих волн и фокусировки фононов в кубических кристаллах как металлических, так и диэлектрических,

температурных зависимостей теплопроводности диэлектрических кристаллов с различным типом анизотропии упругой энергии,

фононного транспорта в наноструктурах на основе диэлектрических и полупроводниковых кристаллов,

влияния фокусировки фононов на кнудсеновское течение фононного газа в монокристаллических нанопроводах из материалов спинтроники,

влияния фокусировки фононов и сдвиговых волн на термоэдс увлечения в монокристаллических наноструктурах калия при низких температурах,

влияния анизотропии упругой энергии и сдвиговых волн на электрон-фононную релаксацию и электросопротивление благородных металлов.

Выяснение возможностей практической реализации выдвигает широкий круг задач по исследованию анизотропии упругих свойств и фокусировки фононов в монокристаллах металлов, диэлектриков и наноструктур на их основе.

Таким образом, тема диссертационного исследования является актуальной, связана с исследованием новых эффектов, определяемых анизотропией диэлектриков, металлов и наноструктур, и может иметь серьезное практическое применение в элементах и устройствах хранения и передачи информации, нано- и микроэлектроники и спинтроники.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора, списка цитированной литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, обозначены полученные в диссертации новые результаты, раскрыты научная и практическая значимость работы, описана структура диссертации.

В первой главе проводится анализ динамических характеристик упругих волн в кубических кристаллах и показано, что в соответствии со знаком параметра анизотропии $k-1$ они могут быть разделены на два типа: кристаллы с положительной $k-1 > 0$ (тип I) и отрицательной $k-1 < 0$ (тип II) анизотропией упругих модулей второго порядка. Для кристаллов одного типа направления фокусировки и дефокусировки колебательных мод совпадают, тогда в кристаллах различного типа они противоположны: направления фокусировки в кристаллах первого типа становятся направлениями дефокусировки в кристаллах второго типа. Также исследуется влияние фокусировки на угловое распределение плотности фононных состояний, рассчитаны коэффициенты усиления потока фононов и проведено их сравнение для металлических и диэлектрических кристаллов.

Вторая глава посвящена развитию метода расчета теплопроводности упруго анизотропных диэлектрических образцов конечной длины с учетом фокусировки фононов. Показано, что анизотропия теплопроводности образцов кремния с квадратным сечением обусловлена, главным образом, вкладом медленной t_2 -моды. Фононы t_2 -моды фокусируются в направлениях типа $[001]$ и обеспечивают максимум теплопроводности в этом направлении, а минимум теплопроводности реализуется в направлении $[111]$, которое соответствует направлению дефокусировки медленной t_2 -моды.

Также дана физическая интерпретация эффектов МакКарди в теплопроводности диэлектрических кристаллов с различным типом анизотропии упругой энергии.

В третьей главе исследованы особенности фононного транспорта в полупроводниковых и диэлектрических наноструктурах с различным типом упругой анизотропии, а также в материалах, используемых для создания спинтронных наноструктур. Определены средние значения плотности фононных состояний (ПФС) для областей фокусировки и дефокусировки медленных и быстрых квазипоперечных мод. Показано, что для всех нанопроводов угловые зависимости длины пробега быстрых и медленных поперечных мод в плоскостях $\{100\}$ и $\{110\}$ коррелируют с угловыми зависимостями ПФС этих мод. Максимальные значения длин пробега реализуются в областях фокусировки, которые соответствуют максимумам ПФС для этих мод.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния анизотропии упругой энергии на электрон-фононную релаксацию и роль сдвиговых волн в термоэдс увлечения и электросопротивлении кристаллов калия. Показано, что вклады медленных квазипоперечных фононов

в термоэдс увлечения и электросопротивление кристаллов калия, которые ранее не учитывали, при температурах, гораздо меньших температуры Дебая, на порядок величины превышают вклады продольных фононов. Однако при температурах больше температуры Дебая вклад продольных фононов в электросопротивление в 4 раза больше, чем суммарный вклад релаксации электронов на быстрой и медленной поперечных модах. Также приводится физическое объяснение доминирующей роли медленной квазипоперечной моды в термоэдс увлечения и электросопротивлении кристаллов калия при низких температурах.

В пятой главе изучено влияние фокусировки фононов на термоэдс увлечения в монокристаллических наноструктурах калия при низких температурах. Показано, что сдвиговые волны вносят значительный вклад в термоэдс увлечения наноструктур. По порядку величины он совпадает с вкладом L-фононов, а в некоторых направлениях превосходит его. Сдвиговые волны оказывают значительное влияние на соотношение вкладов t_2 -моды и L-фононов, а также на анизотропию термоэдс увлечения.

Шестая глава посвящена исследованию влияния анизотропии упругой энергии на электрон-фононную релаксацию и электросопротивление благородных металлов в рамках теории Блоха-Грюнайзена. Рассчитаны спектр, векторы поляризации фононов и определена плотность фононных состояний. Построены изоэнергетические поверхности для фононов и проанализировано влияние фокусировки фононов на электрон-фононную релаксацию в благородных металлах. Показано, что при низких температурах квазипоперечные фононы вносят доминирующий вклад в электросопротивление благородных металлов. Их вклад в электрон-фононную релаксацию кристаллов Au, Ag и Cu составляет более 97 % полного электросопротивления. При повышении температуры вклад квазипоперечных мод уменьшается, но остается доминирующим механизмом электросопротивления для кристаллов Au и Cu, а для серебра он сравним вкладом продольных фононов. Оценки показывают, для кристаллов Au, Ag и Cu, при $T = 1000$ К вклад квазипоперечных мод уменьшается до 73, 46 и 68 %. Также в главе дано физическое объяснение доминирующей роли квазипоперечных мод в электросопротивлении благородных металлов при низких температурах.

В Заключении приведены результаты и основные положения сформулированные и представленные в диссертационном исследовании.

Остановимся на основных результатах исследования, представляющих, по мнению оппонента, наибольший интерес:

1. Рассчитаны коэффициенты усиления потока фононов и проведено их сравнение для металлических и диэлектрических кристаллов. Проанализированы зависимости типов кри-

визны изоэнергетических поверхностей акустических мод в щелочных и благородных металлах от величины и знака параметров анизотропии.

2. Разработан метод расчета теплопроводности упруго анизотропных диэлектрических образцов конечной длины с учетом фокусировки фононов.

3. Исследовано влияние фокусировки фононов на анизотропию теплопроводности гетероструктур GaAs/AlGaAs при низких температурах. Определены параметры зеркальности отражения фононов от границ гетероструктур, характеризующие тепловой поток в режиме кнудсеновского течения фононного газа. Показано, что теплопроводность гетероструктур с ориентацией плоскостей $\{100\}$ имеет малую анизотропию и значительно большие значения, чем для гетероструктур с ориентацией $\{110\}$.

4. Показано, что вклады медленных квазипоперечных фононов в термоэдс увлечения и электросопротивление кристаллов калия, которые ранее не учитывали, при температурах, гораздо меньших температуры Дебая, на порядок величины превышают вклады продольных фононов. Однако при высоких температурах вклад продольных фононов в электросопротивление в 4 раза больше, чем суммарный вклад релаксации электронов на быстрой и медленной поперечных модах.

5. Анизотропия термоэдс увлечения в наноструктурах калия при низких температурах обусловлена конкуренцией вкладов медленных квазипоперечных фононов, которые обеспечивают максимальные значения термоэдс в направлении $[100]$, и продольных фононов, которые обеспечивают минимальные значения термоэдс в направлении $[111]$.

6. При высоких температурах, когда электросопротивление имеет линейную зависимость, определены константы E_{0i} , характеризующие взаимодействие электронов со сдвиговыми компонентами колебательных мод благородных металлов. Показано, что для определения константы E_{0i} для благородных металлов, необходимо учитывать различный тип взаимодействия электронов с продольными и поперечными компонентами колебательных мод: взаимодействие электронов с продольными компонентами обусловлено деформациями сжатия и растяжения и описывается потенциальным полем, тогда как рассеяние электронов на сдвиговых волнах – вихревым полем.

При прочтении диссертации возникли следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации рассматривается фокусировка только для кубических кристаллов, возникает вопрос, будет ли существовать фокусировка фононов для других кристаллических сингоний и как сильно будет отличаться от кубической структуры.

2. При расчетах теплоемкости кристаллов в работе учитываются только акустические фононы, но в кристаллах существуют и оптические фононы, которые также вносят определенную роль в теплоемкость. Проводились ли автором оценки, как повлияет учет оптических фононов на проведенные расчеты при высоких температурах?
3. В четвертой главе диссертации рассматривается фокусировка фононов и электронный транспорт в монокристаллах калия, калий является щелочным металлом, все щелочные металлы имеют ОЦК решетку. Как будут отличаться результаты исследований для щелочных металлов по сравнению с калием?

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не относятся к основным результатам диссертационной работы и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Подводя итог можно отметить, что достоверность полученных результатов подтверждается использованием стандартных методик, согласованностью с общепринятыми представлениями об исследуемых процессах и результатами других авторов, а также апробацией на научных конференциях. Отметим, что в работе использовались методы феноменологической теории упругости для расчета динамических характеристик и фокусировки фононов и метод кинетических уравнений для исследования электронного и фононного транспорта в неравновесных электрон-фононных системах. Данные методы позволяют адекватно описывать рассматриваемые в диссертации системы. Диссертация представляет собой законченное исследование, вносящее весомый вклад в развитие теории конденсированного состояния, в частности теории электронного и фононного транспорта в упруго анизотропных кристаллах и наноструктурах на их основе при учете эффекта фокусировки фононов. Она содержит новые результаты, имеющие существенное научное значение и стимулирующие дальнейшие экспериментальные исследования. Выводы и заключения автора достаточно обоснованы. Результаты работы имеют не только самостоятельное научное, но и практическое значение.

Результаты рассматриваемой работы можно рекомендовать к использованию в организациях, занимающихся исследованием и применением магнитных материалов, в частности, ЧелГУ, УрФУ, ИОФ РАН, ИФП РАН, МГУ, ИФМ УрО РАН и др.

Представленные материалы отражены в публикациях, прошли апробацию на многочисленных конференциях, симпозиумах и семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации. В диссертационной работе развито новое направление исследований влияния анизотропии упругой энергии на фокусировку фононов, электронный и фононный транспорт в кристаллах и наноструктурах.

Диссертационная работа Кулеева Ивана Игоревича удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842 (с последующими изменениями), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Кулеев Иван Игоревич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры радиофизики и электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор

Бычков Игорь Валерьевич

Дата

03.09.2025

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет»

454001, УрФО, Челябинская обл., г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д. 129

Телефон: +7 (351) 799-71-81

Адрес электронной почты: bychkov@csu.ru

Подпись *Бычков И.В.*
удостоверяю: *Андреев И.В.*
ведущий специалист

с отзывом ознакомлен 22.09.2025
/Кулеев И.И./

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Бычков Игорь Валерьевич

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, профессор, специальность (по докторской) 01.04.07. физика конденсированного состояния

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет»

Должность: Профессор кафедры радиофизики и электроники

Почтовый адрес: 454001, УрФО, Челябинская обл., г.Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д.129

Тел.: +7 (351) 799-71-81

E-mail: : bychkov@csu.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

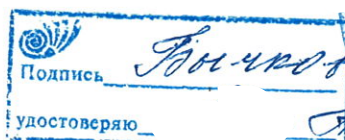
1. Шавров В.Г., Бучельников В.Д., Бычков И.В. Связанные волны в магнетиках, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 480 с, 2019.
2. Бычков И.В., Кузьмин Д.А., Бучельников В.Д., Шавров В.Г. Влияние взаимодействия подсистем на динамические свойства магнетиков. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 176 с.
3. Bychkov I. V. Magnon–phonon–photon interactions in cubic ferromagnets in the vicinity of orientational phase transition: Retrospective and phenomenological study/ I. V. Bychkov; D. A. Kuzmin; V. A. Tolkachev; V. D. Buchelnikov; V. G. Shavrov// J. Appl. Phys. 137, 063905 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0251131>
4. Usik M.O. Spectral dependence of the magnetic modulation of surface plasmon-polaritons in hyperbolic metasurfaces /Usik, Maksim O.; Kuzmin, Dmitry A.; Bychkov, Igor V.; Shavrov, Vladimir G. // Optics Express. -2024. . -Vol. 32. - P. 43598-43606. <https://doi.org/10.1364/OE.539542>
5. Kuzmin D.A. Influence of geometrical parameters of magnetic nanoparticles in a linear chain on the conditions for generation, structure, and properties of discrete breathers / D.A. Kuzmin, I.V. Bychkov, E.G. Ekomasov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2025. – Vol. 629. – P. 173250. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173250>
6. Belim S.V. Monte Carlo Computer Simulations of Spin-Transfer Torque / S.V. Belim, I.V. Bychkov //Materials.- 2023. –Vol.16, 6728. <https://doi.org/10.3390/ma16206728>

7. Usik M.O. Surface Plasmon-Polaritons in the VO₂-Dielectric-Metasurface Structure Based on Graphene in an External Magnetic Field / M.O. Usik, D.A. Kuzmin, I.V. Bychkov, A.S. Bugaev, V.G. Shavrov // Doklady Physics. – 2023. –Vol.68. –P. 246-252. <https://doi.org/10.1134/S1028335823080074>
8. Kuzmin D.A. Enhanced magnetic modulation of surface plasmon polaritons on hyperbolic metasurfaces / D.A. Kuzmin, M.O. Usik, I.V. Bychkov, A.S. Bugaev, V.G. Shavrov, V.V. Temnov // Optics Letters. – 2023. –Vol.48. – P. 3479-3482. <https://doi.org/10.1364/OL.493787>
9. Belim S.V. A Study of Magnetic Properties in a 2D Ferromagnetic Nanolattice through Computer Simulation / S.V. Belim, I.V. Bychkov // Nanomaterials. – 2022. –Vol. 12. P.3705. <https://doi.org/10.3390/nano12203705>
10. Vernik U Resonant phonon-magnon interactions in freestanding metal-ferromagnet multilayer structures/ U. Vernik, A.M. Lomonosov, V.S. Vlasov, L.N. Kotov, D.A. Kuzmin, I.V. Bychkov// Phys. Rev. B - 2022. –Vol.106. –P. 144420. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.144420>
11. Kimel A. The 2022 magneto-optics roadmap/ A. Kimel, A. Zvezdin, S. Sharma, S. Shallcross, N. De Sousa, A. García-Martín. // Journal of Physics D: Applied Physics.- 2022. –Vol. 55. –P. 463003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8da0>
12. Belim S.V. Simulation of Epitaxial Film-Substrate Interaction Potential / S.V. Belim, I.V. Tikhomirov, I.V. Bychkov // Coatings. – 2022. –Vol.12. –P.853. <https://doi.org/10.3390/coatings12060853>
13. Belim S.V. Tuning of 2D magnets Curie temperature via substrate / S.V. Belim, I.V. Bychkov, I.V. Maltsev, D.A. Kuzmin, V.G. Shavrov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. –2022. –Vol. 541. –P. 168553. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168553>
14. Kuzmin D.A. Hyperbolic plasmonics with anisotropic gain-loss metasurfaces /D.A. Kuzmin, I.V. Bychkov, V.G. Shavrov, V.V. Temnov //Optics Letters. –2021. –Vol. 46. –P. 420-423. <https://doi.org/10.1364/OL.413511>
15. Besse V. Generation of exchange magnons in thin ferromagnetic films by ultrashort acoustic pulses/ V. Besse, A.V. Golov, V.S. Vlasov, A. Alekhin, D. Kuzmin, I.V. Bychkov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. –2020. –Vol. 502. –P.166320. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166320>

не являюсь членом экспертного совета ВАК.

Подпись, дата

23.09.2025



Ведущий специалист