

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе 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

Исследование процессов электронного и фононного транспорта в твердых телах является традиционной тематикой физики конденсированного состояния: кинетические эффекты, определяющие основные фундаментальные характеристики твердых тел, лежат в основе работы большинства твердотельных устройств и микроэлектронных структур. В диссертационной работе И.И. Кулеева построена теория фононного и электронного переноса в анизотропных кристаллах и в наноразмерных структурах в условиях так называемой фокусировки фононов, т.е. распространения фононных потоков в выделенных кристаллографических направлениях из-за анизотропии, и рассеяния фононов на поверхностях, что особенно существенно в структурах малых размеров. В силу сказанного выше, **актуальность** тематики диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов. Во введении дана общая характеристика работы: обоснована ее актуальность, изложены цели и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы динамические характеристики упругих волн в анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии, определены области фокусировки и дефокусировки фононов, рассчитаны плотности фононных состояний. Проведенный анализ показал, что все кристаллы можно разделить на две группы по типу анизотропии. В кристаллах с безразмерным параметром анизотропии $k > 1$ ($k = (c_{12} + c_{44}) / (c_{11} - c_{44})$, c_{ij} - модули упругости) направления фокусировки и дефокусировки колебательных мод совпадают, тогда как в кристаллах с $k < 1$ они противоположны. Найдено угловое распределение плотности фононных состояний и определены области углов, соответствующие фокусировке и дефокусировке фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии. Рассчитаны угловые зависимости спектров и векторов поляризации фононов.

Во второй главе предложен метод расчета теплопроводности упруго анизотропных монокристаллических образцов конечной длины с различной формой поперечного сечения, учитывающий фокусировку фононов. Определены температурные зависимости теплопроводности монокристаллических образцов и наноструктур в условиях фокусировки фононов и показано, что они хорошо согласуются с экспериментальными данными по теплопроводности кристаллов Si и

CaF_2 в интервале температур 3 - 25 К. Установлено, 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 от ориентации широкой грани образца или плоскости пленки. Определены кристаллографические направления, в которых теплопроводность достигает максимума в кристаллах различной анизотропии и выяснено, с какими колебательными модами это связано в кристаллах обоих типов ($k > 1$ или $k < 1$).

В главе 3 рассмотрены особенности фононного транспорта в наноструктурах на основе металлов Fe, Cu, диэлектрика MgO и полупроводников InSb и GaAs с различным типом упругой анизотропии. Максимумы теплопроводности в спинтронных материалах обеспечиваются медленной квазипоперечной модой и достигаются в направлениях типа [100]. Установлено, что между параметрами упругой анизотропии k и анизотропией решеточной теплопроводности наноструктур однозначная корреляция отсутствует. В исследованных кристаллах максимум параметра k достигается для Fe, а минимум - для MgO, однако максимальная анизотропия теплопроводности из рассмотренных наноструктур имеет место для кристаллов MgO. Анализ температурных зависимостей теплопроводности гетероструктур GaAs/AlGaAs показал, что в интервале от 0.2 до 0.8 К в гетероструктурах GaAs доминирует диффузное рассеяние и коэффициент теплопроводности зависит от температуры как T^3 . Показано, что для согласования результатов расчета с экспериментальными данными необходимо учесть вклад зеркального рассеяния на границах.

Наиболее интересные, на мой взгляд, результаты приведены в главах 4-6. В главе 4 исследовано влияние фокусировки фононов на электронный транспорт в монокристаллах щелочных металлов. На примере калия рассчитано транспортное время релаксации электронов и, соответственно, проводимость упруго анизотропного металла. Установлено, что обе величины обратно пропорциональны шестой степени среднего значения фазовой скорости фононов. Поскольку фазовые скорости квазипоперечных фононов в щелочных металлах при низких температурах в 2.5-3 раза меньше, чем для продольных, то их вклад в проводимость оказывается на два порядка больше. Причем основную роль играет релаксация электронов на сдвиговых волнах. Определение константы связи со сдвиговыми волнами основано на идее, высказанной Займаном, который показал, что в области температур выше дебаевской, где сопротивление не зависит от деталей спектра фононов, а пропорционально среднему квадрату амплитуды тепловых колебаний атома, квантование энергии колебаний решетки не играет роли, а сопротивление линейно зависит от температуры. Это позволяет определить константы связи со сдвиговыми волнами из высокотемпературных данных. Найденные константы связи позволяет определить вклад квазипоперечных мод в проводимость калия (92%). Установлено, что главную роль играет

релаксация электронов на сдвиговых волнах. Учет релаксации электронов на сдвиговых компонентах квазипоперечных фононов позволил количественно согласовать результаты расчета температурных зависимостей термоэдс калия с различной концентрацией дислокаций с экспериментальными данными в интервале температур 1-3 К. Установлено, что вклады медленных квазипоперечных фононов в термоэдс увлечения и сопротивление кристаллов калия, которые ранее не учитывали, при температурах, гораздо меньших температуры Дебая, на порядок величины превышают вклад продольных фононов.

В главе 5 исследовано влияние фокусировки фононов на термоэдс электрон-фононного увлечения в монокристаллических наноструктурах калия при низких температурах. Показано, что в наноструктурах калия с поперечными размерами меньше $5 \cdot 10^{-6}$ см реализуется режим диффузного рассеяния на границах, а термоэдс увлечения и решеточная теплопроводность нанопроводов и нанопленок анизотропны и зависят от температуры как T^4 и T^3 , соответственно. В образцах калия с поперечными размерами $> 10^{-2}$ см доминируют объёмные механизмы релаксации фононов – рассеяние на электронах и дислокациях. Термоэдс электрон-фононного увлечения и решеточная теплопроводность изотропны, не зависят от геометрических параметров образцов и пропорциональны T^3 и T^2 , соответственно. Анизотропия термоэдс увлечения в наноструктурах калия при низких температурах обусловлена конкуренцией вкладов медленных квазипоперечных фононов и продольных фононов. Установлено, что сдвиговые волны вносят значительный вклад в термоэдс увлечения наноструктур. По порядку величины он совпадает с вкладом продольных фононов.

В главе 6 рассчитан спектр, векторы поляризации фононов в благородных металлах и проанализировано влияние фокусировки фононов на электрон-фононную релаксацию и сопротивление. Результаты, полученные для Au, Ag, Cu, качественно аналогичны данным для щелочных металлов. Установлено, что квазипоперечные фононы вносят значительно больший вклад в электрон-фононную релаксацию, термоэдс увлечения и сопротивление благородных металлов, чем продольные фононы. Определена константа, характеризующая взаимодействие электронов со сдвиговыми волнами, и установлено, что релаксация электронов на сдвиговых волнах практически полностью определяет удельное сопротивление благородных металлов. Учет этого обстоятельства позволил количественно согласовать результаты расчета с экспериментальными температурными зависимостями сопротивления Au, Ag и Cu в интервале от 10 до 1000 К без использования подгоночных параметров.

Эти результаты, являются, как мне кажется, наиболее существенными из полученных автором. Разумеется, в работе получена масса и других сведений, интересных как для понимания происходящих процессов, так и с прикладной точки зрения, однако их перечисление, которое заняло бы достаточно много места, мне представляется нецелесообразным, так как это могло бы “затушевать” указанные выше основные, достаточно весомые результаты.

В выводах суммируются наиболее важные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

Автореферат диссертации правильно отражает ее основные положения.

Таким образом, в диссертационной работе И.И.Кулеева получен целый ряд **новых и очень интересных результатов**. Их **достоверность** подтверждается как использованием современных методов теории кинетических явлений, строгой обоснованностью приближений и допущений, совпадением асимптотик и предельных переходов с известными ранее результатами, так и согласием рассчитанных зависимостей кинетических коэффициентов с экспериментальными данными.

Некоторые замечания по работе.

1. Общее замечание к изложению материала: было бы полезным привести рисунки с "геометрией" рассматриваемых систем, где были бы показаны направления потока тепла, положения источника и детектора и пр.

2. В работе рассматриваются только акустические фононы. Для низких температур это безусловно правильно, однако в случае высоких T (как, например, ~ 1000 К для благородных металлов в гл. 6) влияние оптических фононов может быть существенным. Во всяком случае, следовало бы это оценить.

3. При обсуждении сопротивления щелочных и благородных металлов следовало бы более детально обсудить пределы применимости развитой теории и роль процессов электрон-фононного переброса.

4. В главе 3 вклад зеркального отражения в рассеяние на границах учтен только подгонкой расчета к экспериментальным результатам, т.е. вводимым коэффициентом. Поскольку зеркально рассеяние ослабляет фокусировку, желательно было бы провести конкретный расчет рассеяния при зеркальном отражении и хотя бы оценить его вклад в фокусировку фононов.

5. То же для рассеяния на дислокациях. Оно учтено такой же подгонкой по их концентрации. С другой стороны, дислокации бывают очень разной геометрии, от которой должны зависеть параметры рассеяния (не только от их концентрации). Желательно было бы провести расчеты или хотя бы оценить интенсивность и геометрию рассеяния на различных дислокациях - краевых, винтовых и пр.

6. При расчете фононного транспорта в наноструктурах рассматриваются, в частности, гетероструктуры GaAs/AlGaAs, в которых фононы распространяются в плоскости слоёв. При этом сама структура считается однородной, т.е. наличие гетерограницы никак не учитывается. Поскольку есть фононы с компонентой импульса поперек слоёв, желательно было бы рассмотреть возможное влияние гетерограницы на рассеяние, поскольку "геометрия" фокусировки фононов в двухслойной системе может быть иной.

Все эти замечания имеют, в основном, характер пожеланий к дальнейшему развитию работы и не снижают высокой оценки диссертации. Диссертационная работа И.И. Кулеева представляет собой законченную фундаментальную научную работу в актуальном направлении физики конденсированного состояния. Автор разработал новые теоретические методы, предложил адекватное объяснение ряда экспериментальных данных, а также предсказал некоторые новые эффекты. Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и известны по докладам на конференциях. Следует отметить, что диссертант принимал активное участие в написании трех монографий, которые лежат в основе диссертационной работы. Это говорит о серьёзной апробации диссертации.

Все сказанное позволяет утверждать, что диссертационная работа И.И. Кулеева удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (с последующими изменениями), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Иван Игоревич Кулеев, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

зав. лаб. электронных процессов в полупроводниковых материалах ИРЭ РАН,

доктор. физ.-мат. наук

(М.С. Каган)

Специальность: 01-04-10 Физика полупроводников

Ученое звание: старший научный сотрудник

тел.: +7(495)6293361, e-mail: kagan@cplire.ru

Наименование организации: ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук

Адрес: 125009 Москва, ГСП-9, Моховая ул., 11, корп. 7

Сайт: www.cplire.ru; тел.: +7 (495) 629 3574; факс: +7 (495) 629 3678; e-mail: ire@cplire.ru

Отзыв М.С.Кагана удостоверяю

Ученый секретарь Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

кандидат физ.-мат. наук

(И.И. Чусов)

15 сентября 2025 г.

С отзывом ознакомлен ⁵ 27.09.2025
/Кулеев И.И./

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Каган Мирон Соломонович

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.10 – физика полупроводников.

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

Должность: главный научный сотрудник, зав. лаб. электронных процессов в полупроводниковых материалах

Почтовый адрес: 125009 Москва, Моховая ул., 11, стр. 7

Тел.: +7 495 6293361

E-mail: : kagan@cplire.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. М.С. Каган, С.К. Папроцкий, Н.А. Хвальковский и др. Особенности проводимости номинально нелегированного монокристаллического CVD алмаза. *Письма в ЖЭТФ*, 2025, **121**, 235 – 239
2. М.С.Каган, С.К.Папроцкий, Н.А.Хвальковский, Р.А.Хмельницкий, Дж. Колодзей. О возникновении S-образной вольтамперной характеристики при ионизации притягивающих примесей в полупроводниках электрическим полем. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2025, **17(1)**, 45-52
3. И.В. Алтухов, С.Е. Дижур, М.С. Каган, и др. Электронный транспорт в сверхрешетках InAs/AlSb с электрическими доменами // *Радиотехника и электроника*, 2022, Т. 67, № 7, стр. 683-685
4. I.V. Altukhov, S.E. Dizhur, M.S. Kagan, et al., Electronic Transport in InAs/AlSb Superlattices with Electric Domains. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, Vol. 67, No. 7, pp. 882.
5. I.V. Altukhov, S.E. Dizhur, M.S. Kagan, et al., Anomalous Photoresponse of Heavily Doped GaAs/AlAs Superlattices with Electric Domains. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, Vol. 66, No. 12, pp. 1385–1387.
6. I.V. Altukhov, M.S. Kagan, S.K. Paprotskiy, et al., Electric field ionization of boron acceptors in single-crystalline diamond. *Low Temp. Phys.* **47**, 75 (2021) (*Fiz. Nizk. Temp.* **47**, 83–87 (2021))
7. И.В. Алтухов, М.С. Каган, С.К. Папроцкий и др. Эффект Френкеля-Пула при ионизации акцепторной примеси бора в алмазе в сильном электрическом поле. *Радиотехника и электроника*, 2020, том 65, № 11, с. 1128–1130
8. С.К. Папроцкий, И.В. Алтухов, М.С. Каган, и др. Особенности туннельного тока в сверхрешетках с электрическими доменами. *Радиотехника и электроника*, 2019, том 64, № 10, с. 1025
9. I.V. Altukhov, S.E. Dizhur, M.S. Kagan, et al. Transport in Short-Period GaAs/AlAs Superlattices with Electric Domains// *ФТП*, 2018, **52**, вып. 3, pp 473–477
10. И.В. Алтухов, М.С. Каган, С.К. Папроцкий, и др. Влияние ТГц резонатора на проводимость короткопериодных сверхрешеток GaAs/AlAs. *Письма в ЖЭТФ*, 2016, Т. 103, вып. 2, с. 128–131

Ученый секретарь Института радиотехники
и электроники им. В.А.Котельникова РАН

кандидат физ.-мат. наук

/ И.И. Чусов