

Отзыв

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

Диссертация И.И. Кулеева посвящена одной из важных проблем физики конденсированного состояния - исследованию электронного и фононного транспорта в упруго анизотропных металлических и диэлектрических кристаллах и наноструктурах на их основе. Актуальность этих исследований не вызывает сомнения, поскольку понимание физических процессов, определяющих электрический и тепловой транспорт в металлах и диэлектриках, является важным как с фундаментальной, так и практической точки зрения. Автору удалось получить ряд новых интересных результатов, обусловленных влиянием анизотропии упругих свойств кристаллов на электронный и фононный транспорт, как в объёмных образцах, так и наноструктурах. Наиболее существенными из них являются следующие:

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. Для кристаллов одного типа направления фокусировки и дефокусировки колебательных мод совпадают, тогда как в кристаллах другого типа они противоположны: направления фокусировки в кристаллах первого типа становятся направлениями дефокусировки в кристаллах второго типа. Показано, что в упруго анизотропных кристаллах максимальные значения ПФС достигаются в областях фокусировки, а минимальные - в областях дефокусировки фононов. Поэтому направления максимумов ПФС в кристаллах первого типа становятся направлениями минимумов в кристаллах второго типа.

2. Разработан метод расчета теплопроводности упруго анизотропных 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 от ориентации широкой грани образца или плоскости пленки. Дана физическая интерпретация эффектов МакКарди в теплопроводности диэлектрических кристаллов с различным типом анизотропии упругой энергии. Показано, что первый эффект МакКарди в образцах с квадратным сечением обусловлен фокусировкой медленной t_2 -моды в кристаллах обоих типов. Причем в кристаллах первого типа её фокусировка и максимум теплопроводности достигается в направлениях $[001]$, тогда как в кристаллах второго типа фокусировка медленной t_2 -моды и максимум теплопроводности достигается в направлениях $[111]$, соответствующем минимуму теплопроводности в кристаллах первого типа. Показано, что второй эффект МакКарди в теплопроводности образцов с прямоугольным сечением обусловлен фокусировкой быстрой t_1 -моды в кристаллах обоих типов и доминирующей ролью рассеяния фононов на широких гранях образца. Результаты расчета температурных зависимостей теплопроводности образцов Si и CaF₂ хорошо согласуются с экспериментальными данными.

3. Исследование влияния фокусировки фононов на термоэдс увлечения в наноструктурах калия при низких температурах показало, что для наноструктур с поперечными размерами $D < 5 \cdot 10^{-6}$ см реализуется режим кнудсеновского течения

фононного газа. В этом случае медленная t_2 -мода вносит преобладающий вклад в термоэдс увлечения нанопроводов и нанопленок. Показано, что конкуренция вкладов t_2 -моды и L -фононов приводит к анизотропии термоэдс увлечения наноструктур. Эти эффекты следуют зависимостям: $\alpha_{\text{drag}}(T) \approx B_2 T^4$ и $\kappa(T) \approx C T^3$. В образцах с поперечными размерами $D > 10^{-2}$ см доминируют объёмные механизмы релаксации фононов – рассеяние на электронах и дислокациях. Показано, что эти эффекты изотропны и следуют асимптотикам: $\alpha_{\text{drag}}(T) \approx A T^3$ и $\kappa(T) \approx B T^2$.

4. Ранее в теории явлений электронного переноса в металлах для фононов использовали модель изотропной среды, в которой учитывали релаксацию электронов только на продольных фононах. Исследовано влияние упругой анизотропии и фокусировки фононов на электронный транспорт в монокристаллах калия и благородных металлов (БМ) показало, 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. Их вклад в термоэдс увлечения и электросопротивление калия при низких температурах $T \ll \theta_D$ составил 92%, тогда как для электросопротивления БМ Au, Ag, Cu он составляет 99.5, 97, 98%, соответственно. Показано, что релаксация электронов на сдвиговых волнах, которая ранее не учитывалась, вносит доминирующий вклад в удельное электросопротивление БМ в диапазоне температур от 10 до 1000 К. Результаты расчета температурных зависимостей электросопротивления БМ хорошо согласуются с данными эксперимента в температурном интервале от 10 до 1000 К без использования подгоночных параметров.

Основные результаты работы изложены в 24 статьях в журналах, включенных ВАК в Перечень ведущих рецензируемых журналов, и трех монографиях, а также доложены на представительных конференциях и широко известны специалистам. Полученные И.И. Кулевым результаты свидетельствуют о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение.

Судя по содержанию автореферата и публикациям, диссертационная работа И.И.Кулеева удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» установленным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в ред. От 11.09.2021), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. -физика конденсированного состояния.

Доктор физико-математических наук, профессор
Заведующий кафедрой общей физики
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»

Подпись

Капурино И.И. Заверяю

М.П. Капченко

8 сентября 2025 года.

Ведущий
документовед

Адрес служебный: Адрес служебный: 620100, г.Екатеринбург, ул.Сибирский тракт 37,
«Уральский Государственный лесотехнический университет», кафедра общей физики,
тел. 8 (343) 221-22-13, e-mail: kashchenkomp@m.usfeu.ru

С отрывком ознакомлен 10.09.2025
Кулеев И.И.