

ИФМ
УрО РАН

1544626

И. Г. Кулеев
И. И. Кулеев

**РОЛЬ КВАЗИПОПЕРЕЧНЫХ ФОНОНОВ
И УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ
В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ
И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИИ ЩЕЛОЧНЫХ
И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛАХ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ
ИМЕНИ М. Н. МИХЕЕВА

И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев

**РОЛЬ КВАЗИПОПЕРЕЧНЫХ ФОНОНОВ
И УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ
В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ
И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИИ
ЩЕЛОЧНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛАХ**

Монография

**ЕКАТЕРИНБУРГ
2023**

УДК 537.31 537.32
ББК 22.37
К 90



Рекомендовано к изданию ученым советом
Института физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

1544626

Кулеев Игорь Гайнитдинович, Кулеев Иван Игоревич
Роль квазипоперечных фононов и упругой анизотропии в термоэлектрических эффектах и электросопротивлении щелочных и благородных металлах. / И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2023, 204 с.
ISBN 978-5-8295-0882-1

Монография посвящена исследованию физических процессов, определяющих электронный транспорт в объемных и наноразмерных монокристаллических образцах кубической симметрии. В основу монографии положен цикл работ, выполненных авторами за последние пять лет. Основное внимание уделено исследованию влияния анизотропии упругой энергии и фокусировки фононов на электрон-фононную релаксацию и явления электронного переноса в щелочных и благородных металлах и наноструктурах на их основе. Проанализирована роль квазипродольных и квазипоперечных фононов, в электросопротивлении и термоэдс увлечения щелочных и благородных металлов. Определены константы связи электронов со сдвиговыми волнами в кристаллах калия и благородных металлах. Исследованы их вклады в электросопротивление и термоэдс увлечения в объёмных материалах и наноструктурах. Показано, что сдвиговые волны вносят существенный вклад в термоэдс увлечения и электросопротивление этих металлов. При температурах значительно ниже температуры Дебая, их вклад превышает 90% электросопротивления кристаллов Au, Ag и Cu, а в кристаллах калия он более, чем в 4 раза превышает вклад продольных фононов. Проанализировано влияние фокусировки на распространение фононов и термоэдс электрон-фононного увлечения в монокристаллических пленках, нанопластинах и нанопроводах на основе кристаллов калия. Исследованы механизмы релаксации импульса электронов и фононов, приводящие к зависимостям кинетических эффектов в наноструктурах от температуры, геометрических параметров и направлений теплового потока. Для нанопроводов определены направления, а для монокристаллических пленок и пластин - ориентации плоскостей и направления потока тепла, обеспечивающие максимальные и минимальные значения термоэдс увлечения.

Монография адресована научным работникам в области физики конденсированного состояния, а также преподавателям, аспирантам и студентам физических и технических вузов.

УДК 537.31 537.32
ББК 22.37

Рецензенты

Доктор физико-математических наук: **В. В. Меньшенин**
Доктор физико-математических наук: **В. Ю. Ирхин**

ISBN 978-5-8295-0882-1

© ИФМ УрО РАН, 2023 г.
© И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев, 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Фокусировка фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии. | 13 |
| 1.1. Динамические характеристики фононов в металлических и диэлектрических кристаллах в модели анизотропного континуума. | 15 |
| 1.2. Групповая скорость и особенности распространения фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии | 31 |
| 1.3. Влияние фокусировки на плотность фононных состояний в щелочных металлах | 38 |
| 1.4. Коэффициент усиления потока фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии. | 45 |
| 1.4.2. Анализ угловых зависимостей коэффициента усиления. | 48 |
| 1.5. Заключение | 59 |
| Глава 2. Фокусировка фононов и электронный транспорт в монокристаллах калия. | 61 |
| 2.1. Электрон-фононная релаксация в упруго анизотропных металлах. | 64 |
| 2.2. Влияние фокусировки фононов на решеточную теплопроводность и термоэдс увлечения в кристаллах калия. | 68 |
| 2.3. Роль сдвиговых волн в термоэдс увлечения и решеточной теплопроводности объёмных кристаллов калия. | 74 |
| 2.4. Влияние упругой анизотропии на электросопротивление объёмных кристаллов калия. | 79 |
| 2.4.1. Влияние анизотропии упругой энергии на электрон-фононную релаксацию и электросопротивления кристаллов калия. | 80 |
| 2.5. Влияние фокусировки на взаимное увлечение электронов и фононов и электросопротивление кристаллов калия. | 88 |
| 2.5.1. Влияние фокусировки фононов на релаксацию и обмен импульса между электронным и тремя фононными потоками. | 89 |
| 2.5.2. Фокусировка фононов и электросопротивление кристаллов калия. | 94 |
| 2.5. Заключение | 101 |

Глава 3. Влияние фокусировки фононов и сдвиговых волн на термоэдс увлечения в монокристаллических наноструктурах калия. 104

3.1.2. Влияние фокусировки фононов на анизотропию термоэдс увлечения в нанопроводах на основе кристаллов калия. 106

3.1.2 Анизотропии термоэдс увлечения нанопроводов в условиях конкуренции граничного и объёмных механизмов релаксации фононов. 111

3.2 Новый эффект в термоэдс увлечения в монокристаллических нанопластинах калия при низких температурах 115

3.2.1. Анизотропия термоэдс увлечения нанопластин калия при низких температурах 115

3.2.2 Анизотропия термоэдс увлечения нанопластин в условиях конкуренции граничного и объёмных механизмов релаксации. 119

3.2.3 Новый эффект в термоэдс увлечения нанопластин калия. 122

3.3. Фокусировка фононов и анизотропия термоэдс увлечения в нанопленках калия при низких температурах. 125

3.3.1 Фокусировка фононов и термоэдс увлечения в квадратных пленках калия с различной ориентацией плоскостей. 126

3.3.2 Анизотропия термоэдс увлечения квадратных пленок в условиях конкуренции граничного и объёмных механизмов релаксации. 133

3.3.3 Анизотропия термоэдс увлечения в длинных пленках калия. 135

3.4. Заключение 142

Глава 4. Роль сдвиговых волн в электрон-фононной релаксации и электросопротивлении благородных металлов 143

4.1. Динамические характеристики и фокусировка фононов в благородных металлах. 146

4.2. Электрон-фононная релаксация в благородных металлах 151

4.3. Поверхность Ферми в благородных металлах. 155

4.4. Влияние анизотропии упругой энергии на электросопротивление благородных металлов. 157

4.5. Обсуждение результатов 159

4.6. Заключение 166

5. Перспективы дальнейших исследований. 167

Приложение 1 скорости релаксации фононов при диффузном рассеянии на границах монокристаллических образцов конечной длины. 171

П.1.1. Релаксация фононов на границах образцов бесконечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями 171

П.1.2. Скорости релаксация фононов при диффузном рассеянии на границах образцов конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями. 178

П.1.3. Анизотропия длин свободного пробега фононов в образцах кремния с круглым и квадратным сечениями при низких температурах. 184

Список литературы. 192

**Кулеев
Игорь Гайнитдинович**

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории кинетических явлений ИФМ УрО РАН. Автор более 100 научных работ. Область научных интересов: теория кинетических эффектов в металлах, полупроводниках и в системах со смешанной валентностью; изучение роли взаимного увлечения электронов и фононов, а также нормальных процессов рассеяния квазичастиц в термогальвано магнитных явлениях в металлах и полупроводниках; исследование поглощения ультразвука и релаксации фононов в кубических кристаллах с различным изотопическим составом; исследование фокусировки фононов и фононного транспорта в объемных кристаллах и наноструктурах с различным типом анизотропии упругой энергии.

**Кулеев
Иван Игоревич**

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории кинетических явлений ИФМ УрО РАН. Область научных интересов: исследование роли нормальных процессов рассеяния квазичастиц (электронов и фононов) в формировании кинетических свойств металлов и полупроводников; изучение физических процессов, определяющих фононный транспорт и поглощение ультразвука в диэлектрических кристаллах с различной степенью изотопического беспорядка; изучение фокусировки и рассеяния фононов на границах объемных и наноразмерных образцов. Автор более 40 научных работ.