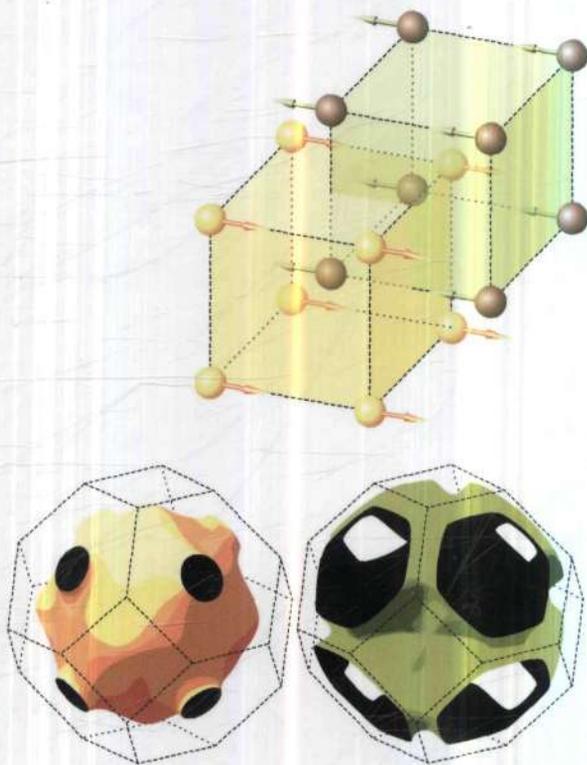


1528904

И. Г. Кулеев
И. И. Кулеев
С. М. Бахарев
В. В. Устинов

Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах



Екатеринбург

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ
«Физика конденсированных сред»

академик РАН В.В. Устинов (главный редактор)

академик РАН Н.В. Мушников

академик РАН М.В. Садовский

академик РАН В.М. Счастливцев

чл.-корр. РАН А.Б. Борисов

чл.-корр. РАН Б.Н. Гощицкий

чл.-корр. РАН А.Б. Ринкевич

чл.-корр. РАН В.Е. Щербинин

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ

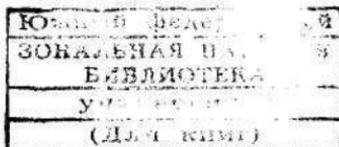
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СЕРИЯ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

11

И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев, С. М. Бахарев, В. В. Устинов

**ФОКУСИРОВКА ФОНОНОВ И
ФОНОННЫЙ ТРАНСПОРТ В
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОСТРУКТУРАХ**

ЕКАТЕРИНБУРГ
2018



УДК 537.9
ББК 22.37

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

Кулеев И.Г., Кулеев И.И., Бахарев С.М., Устинов В.В.

Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах / И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, С.М. Бахарев, В.В. Устинов – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2018, 256 с. (Научно-образовательная серия «Физика конденсированных сред»; 11).
ISBN 978-5-8295-0562-2

Монография посвящена исследованию физических процессов, определяющих фононный транспорт в объемных и наноразмерных монокристаллических образцах материалов кубической симметрии. В основу монографии положен цикл работ, выполненных авторами за последние шесть лет. Основное внимание уделено исследованию фокусировки фононов и её влияния на распространение фононов в кубических кристаллах, граничное рассеяние и решеточную теплопроводность объёмных материалов и наноструктур. Дано аналитическое решение задачи о кнудсеновском течении фононного газа в образцах конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями. Исследован фононный транспорт в наноструктурах с различным типом анизотропии упругой энергии при низких температурах, когда доминирующим механизмом релаксации является диффузное рассеяние фононов на границах. Рассмотрено влияние фокусировки фононов на зависимости длин свободного пробега фононов от геометрических параметров наноструктур для различных направлений теплового потока и ориентаций плоскостей пленок относительно осей кристалла. Определены ориентации плоскостей пленок и направления потока тепла, обеспечивающие максимальный или минимальный теплоотвод от элементов полупроводниковых микросхем. Рассчитаны температурные зависимости теплопроводности кремниевых нанопроводов и тонких пленок в рамках трехмодовой модели Каллавея.

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

УДК 537.9
ББК 22.37

Ответственный редактор

доктор физико - математических наук **А.П. Танкеев**

Рецензент

доктор физико - математических наук **И.И. Ляпилин**

ISBN 978-5-8295-0562-2

© Институт физики металлов УрО РАН, 2018 г.
© Кулеев И.Г., Кулеев И.И., Бахарев С.М.,
Устинов В. В., 2018 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Распространение упругих волн и фокусировка фононов в кубических кристаллах.....	14
1.1. Динамические характеристики фононов в кубических кристаллах в модели анизотропного континуума.	16
1.2. Аппроксимация спектра тепловых фононов в кубических кристаллах.....	35
1.3. Расчет теплоемкости кристаллов Si и Ge с использованием аппроксимационного спектра фононов.	44
1.4. Групповая скорость и особенности распространения фононов в кубических кристаллах с различным типом анизотропии упругой энергии.....	47
1.5. Влияние фокусировки на плотность фононных состояний в кубических кристаллах.	52
1.6. Коэффициент усиления потока фононов.	71
1.6.1. Аналитический расчет коэффициента усиления потока фононов.	73
1.6.2. Анализ угловых зависимостей коэффициента усиления..	79
1.7. Заключение.	91
Глава 2. Времена релаксации фононов при диффузном рассеянии на границах монокристаллических образцов конечной длины.	93
2.1. Релаксация фононов на границах образцов бесконечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями	94
2.2. Времена релаксация фононов при диффузном рассеянии на границах образцов конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями.	102
2.3. Анизотропия длин свободного пробега фононов в образцах кремния с круглым и квадратным сечениями при низких температурах.	109

- 2.4. Влияние фокусировки на фононный транспорт в кристаллах кремния с прямоугольным сечением при низких температурах..... 116
- 2.5. Заключение 121

Глава 3. Анизотропия и температурные зависимости теплопроводности объемных кремниевых образцов. 122

- 3.1. Нормальные процессы фонон-фононного рассеяния и решеточная теплопроводность кубических кристаллов..... 124
- 3.2. Механизмы релаксации и теплопроводность кристаллов кремния..... 127
- 3.3. Анализ температурных зависимостей теплопроводности для образцов кремния с квадратным и прямоугольным сечениями.... 134
- 3.4. Изменение анизотропии теплопроводности в кристаллах кремния с температурой..... 142
- 3.5. Физическая интерпретация эффектов МакКарди в теплопроводности кубических кристаллов..... 146
- 3.6. Заключение 153

Глава 4. Теплопроводность монокристаллических наноструктур с различным типом анизотропии упругой энергии при низких температурах. 155

- 4.1. Длины свободного пробега фононов в монокристаллических наноструктурах 157
- 4.2. Влияние геометрических параметров на анизотропию длин свободного пробега фононов в пленках и нанопроводах. 161
- 4.2.1. Длины Казимира в упруго анизотропных наноструктурах. 162
- 4.2.2. Зависимости длин свободного пробега фононов от геометрических параметров в наноструктурах с различным типом анизотропии упругой энергии..... 165
- 4.2.3. Зависимости анизотропии теплопроводности от длин монокристаллических пленок. 170
- 4.3. Влияние фокусировки на плотность состояний и длины свободного пробега фононов в нанопроводах с различным типом анизотропии упругой энергии. 174

4.4. Изменение анизотропии теплопроводности при переходе от нанопроводов к квадратным пленкам с различной ориентацией плоскостей.....	181
4.5. Заключение.....	186
Глава 5. Распространение фононов и фононный транспорт в пленках с различным типом анизотропии упругой энергии.....	188
5.1. Анизотропия теплопроводности квадратных пленок с различной ориентацией плоскостей.....	188
5.2. Особенности теплопроводности в длинных пленках с различным типом анизотропии упругой энергии.....	195
5.3. Влияние фокусировки на распространение фононных мод в квадратных пленках с ориентациями плоскостей $\{100\}$ и $\{111\}$	198
5.4. Заключение.....	207
Глава 6. Анизотропия и температурные зависимости теплопроводности кремниевых пленок и нанопроводов.....	210
6.1. Фононный транспорт в кремниевых нанопроводах.....	211
6.1.1. Температурные зависимости теплопроводности кремниевых нанопроводов.....	211
6.1.2. Анизотропия теплопроводности кремниевых нанопроводов.....	218
6.2. Фононный транспорт в кремниевых пленках.....	221
6.2.1. Температурные зависимости теплопроводности кремниевых пленок.....	221
6.2.2. Анизотропия теплопроводности кремниевых пленок.....	234
6.3. Заключение.....	238
7. Перспективы дальнейших исследований.....	239
Список литературы.....	243



Кулеев
Игорь Гайнитдинович

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики металлов 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 термогальваномагнитных 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 объёмных кристаллах и наноструктурах с различным типом анизотропии упругой энергии.



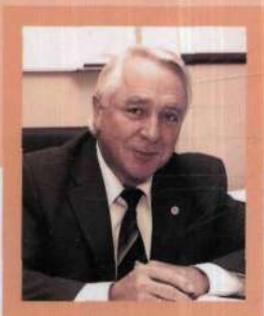
Кулеев
Иван Игоревич

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики металлов 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 объёмных и наноразмерных образцов. Автор более 30 научных работ.



Бахарев
Сергей Михайлович

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики металлов УрО РАН. Научные интересы связаны с теоретическим исследованием релаксации фононов в кубических кристаллах с различным изотопическим составом; исследованием фокусировки фононов и фононного транспорта в объёмных кристаллах и наноструктурах с различным типом анизотропии упругой энергии.



Устинов
Владимир Васильевич

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters.

Академик РАН, главный научный сотрудник, заведующий отделом наноспинтроники Института физики металлов УрО РАН. Основное направление научной деятельности – поверхностные и размерные эффекты в кинетике и спиновой динамике электронов проводимости в магнитных наноструктурах. Руководитель ведущей научной школы России по наноспинтронике. Автор более 250 научных работ. Удостоен Премии РАН имени А.Ф. Иоффе за цикл работ «Спиновые явления в полупроводниковых, металлических и магнитных наноструктурах».