

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Южный федеральный университет»

**А. Э. Мясникова**

# **ЭЛЕКТРОН-ФОНОННЫЕ СИСТЕМЫ СО СПОНТАННЫМ НАРУШЕНИЕМ ТРАНСЛЯЦИОННОЙ СИММЕТРИИ**

Ростов-на-Дону  
Издательство Южного федерального университета  
2010

УДК 538.958

ББК 22.37

М 99

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Южного федерального университета*

**Рецензенты:**

зав. кафедрой теоретической и вычислительной физики ЮФУ,  
доктор физико-математических наук, профессор *Бугаев Л. А.*;  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры нанотехнологий ЮФУ *Рошаль С. Б.*;  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физики ДГТУ *Никифоров И. Я.*;  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры «Физика» РГУПС *Лагутин Б. М.*

*Монография подготовлена и издана в рамках национального проекта  
«Образование» по «Программе развития федерального государственного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
“Южный федеральный университет” на 2007–2010 гг.»*

**Мясникова А. Э.**

М 99

Электрон-фононные системы со спонтанным нарушением трансляционной симметрии: монография / А. Э. Мясникова. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – 240 с.

ISBN 978-5-9275-0741-2

Монография посвящена сильно взаимодействующим электрон-фононным системам, в которых возникает большое количество принципиально новых эффектов. Особое внимание уделено таким явлениям, как спонтанное нарушение трансляционной симметрии системы и формирование фононного конденсата при образовании полярона сильной связи, распад фононного конденсата при фотодиссоциации такого полярона и его проявление в спектрах оптической проводимости и фотоэмиссионной спектроскопии. Проанализировано влияние пространственной дисперсии решеточной поляризуемости на движение полярона по кристаллу. Актуальность исследования сильно взаимодействующих электрон-фононных систем обусловлена необходимостью понимания экспериментально наблюдаемых свойств допированных сильнополярных диэлектриков, таких как купраты, демонстрирующие высокотемпературную сверхпроводимость.

Для студентов, аспирантов и научных сотрудников, занимающихся исследованиями в области физики твердого тела, теоретической физики и нанотехнологий.

ISBN 978-5-9275-0741-2

УДК 538.958

ББК 22.37

© Мясникова А. Э., 2010

© Южный федеральный университет, 2010

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение ..... 7

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОЛЯРОНОВ ..... 11

- 1.1. Электрон-фононное взаимодействие. Полярон большого радиуса (ПБР). Энергия связи ПБР при классическом рассмотрении поля поляризации ..... 11
- 1.2. Гамильтониан Фрелиха ..... 20
- 1.3. Полярон слабой и промежуточной связи ..... 23
- 1.4. Сильное электрон-фононное взаимодействие ..... 26
- 1.5. Метод интегрирования по траекториям Фейнмана в теории поляронов ..... 28
- 1.6. Полярон малого радиуса ..... 30
- 1.7. Учет пространственной дисперсии (ПД) поляризуемости кристаллической решетки в теории поляронов ..... 32
- 1.8. Зависимость равновесной скорости полярона от приложенного поля ..... 36
- 1.9. Оптические свойства систем с ПБР ..... 40

ГЛАВА 2. КВАНТОВО-КОГЕРЕНТНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ПОКОЯЩЕМСЯ ПБР И СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ ТРАНСЛЯЦИОННОЙ СИММЕТРИИ В СИСТЕМЕ СИЛЬНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ НОСИТЕЛЯ ЗАРЯДА И ФОНОННОГО ПОЛЯ ..... 45

- 2.1. Нерешенные вопросы теории ПБР и эффективность использования в ней аппарата квантово-когерентных состояний ..... 45
- 2.2. Некоторые свойства когерентных состояний ..... 50
- 2.3. Определение параметров деформации фононного вакуума в ПБР вариационным методом ..... 53
- 2.4. Соотношение когерентной и флуктуирующей частей фононного поля в ПБР при сильном электрон-фононном взаимодействии ..... 60

2.5. Возможность спонтанного нарушения трансляционной симметрии замкнутой системы взаимодействующих полей в однородном пространстве .....	63
2.6. Спонтанное нарушение трансляционной симметрии и движение ПБР .....	66
2.7. Фононный конденсат в ПБР .....	70
2.8. Величина энергии связи носителя в ПБР в случае взаимодействия с несколькими фононными ветвями .....	72
2.9. Выводы .....	78

**ГЛАВА 3. РАСПАД ФОНОННОГО КОНДЕНСАТА ПРИ ФОТОДИССОЦИАЦИИ ПБР И ЕГО ПРОЯВЛЕНИЕ В ОПТИЧЕСКИХ И ФОТОЭМИССИОННЫХ СПЕКТРАХ СЛАБОДОПИРОВАННЫХ КУПРАТОВ .....**

3.1. Фотодиссоциация ПБР .....	80
3.2. Превращение фононной шубы ПБР после его внезапной «ионизации» .....	85
3.3. Полоса в спектре оптической проводимости, обусловленная фотодиссоциацией покоящихся ПБР .....	90
3.4. Полоса в спектрах ARPES, обусловленная фотодиссоциацией ПБР при нулевой температуре .....	99
3.5. Сравнение фотоэмиссионных и оптических спектров, обусловленных фотодиссоциацией ПБР, с экспериментом и с результатами теории с классическим рассмотрением поля поляризации в ПБР .....	101
3.6. Влияние температуры и концентрации носителей на полосы в спектрах оптической проводимости и ARPES, обусловленные фотодиссоциацией ПБР .....	118
3.7. Выводы .....	122

**ГЛАВА 4. ЭФФЕКТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
ДИСПЕРСИИ РЕШЕТОЧНОЙ  
ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ (ПД РП) В ТЕОРИИ ПБР ..... 124**

4.1. Необходимость учета пространственной дисперсии (ПД) фононной поляризуемости в теории ПБР ..... 124

4.2. Модель среды с двухкомпонентной поляризуемостью кристаллической решетки при учете ее пространственной дисперсии ..... 127

4.3. Уравнения движения фононного поля с учетом ПД РП и их функция Грина ..... 132

4.4. Зонная структура спектра носителей заряда, обусловленная их автолокализацией ..... 134

4.5. Энергетическая эффективная масса ПБР ..... 138

4.6. Продольная инертная масса ПБР ..... 146

4.7. Тензор инертной массы ПБР ..... 151

4.8. Аппроксимация зависимости энергетической эффективной массы и компонент тензора инертной массы ПБР от его скорости и максимальной групповой скорости фононов .... 155

4.9. Когерентное квазичеренковское излучение волны поляризации движущимся ПБР ..... 158

4.10. Свойства когерентного фононного излучения, порождаемого движущимся ПБР, и возможности его экспериментального наблюдения ..... 163

4.11. Эффекты резонанса с колебаниями среды при движении в ней ПБР: фермиевский параметрезон (ФП) ..... 166

4.12. Резонансное спаривание ОП: бозевский параметрезон (БП) ..... 172

4.13. Выводы ..... 182

**ГЛАВА 5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА  
В СИСТЕМАХ, ГДЕ ВОЗМОЖНО ФОРМИРОВАНИЕ ПБР,  
И ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТАКИХ СИСТЕМ .... 185**

5.1.	Особенности функции распределения носителей заряда в системах, где возможно формирование ПБР .....	185
5.2.	Функция распределения носителей заряда в системе с однокомпонентной поляризуемостью .....	188
5.3.	Температурное поведение химического потенциала и концентрации носителей заряда в различных состояниях в системе с однокомпонентной поляризуемостью .....	191
5.4.	Функция распределения носителей заряда в системе с многокомпонентной поляризуемостью .....	196
5.5.	Статистика систем, содержащих поляроны и биполяроны .....	200
5.6.	Выводы, следующие из анализа функции распределения носителей .....	202
5.7.	Поляронное «окно» в зоне проводимости .....	203
5.8.	Автолокализация носителей и поляронные «окна» в валентной зоне .....	208
5.9.	Температурная зависимость удельного сопротивления систем, в которых возможно формирование ПБР .....	213
5.10.	Торможение поляронов когерентным излучением фононов и колоссальное увеличение сопротивления .....	219
5.11	Выводы .....	221
<b>Заключение: основные результаты и выводы .....</b>		<b>223</b>
<b>Литература .....</b>		<b>226</b>
<b>Список используемых сокращений .....</b>		<b>238</b>