

На правах рукописи

Мареева Ольга Владимировна

**ДИСПЕРСИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ  
ФОНОННОГО ТРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена в Нижегородском государственном педагогическом университете (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Г. Ф. Ефремов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Г. А. Вугальтер,  
член-корреспондент РАН  
В. В. Кочаровский.

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН

Защита состоится 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан 2006 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

А. И. Машин

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Проблема взаимодействия электронов с фоннным полем решетки продолжает оставаться одной из наиболее актуальных в физике конденсированного состояния [1\*] – [3\*]. Интерес к данной проблеме связан с ролью электрон-фоннного взаимодействия в описании таких фундаментальных физических явлений, как процессы переноса в упорядоченных и неупорядоченных средах, флуктуации, сверхпроводимость, динамика дислокаций. Являясь основным механизмом диссипативных и флуктуационных процессов в твердом теле, электрон-фоннное взаимодействие определяет характеристики электронов-квазичастиц, ведет к диссипации их импульса и энергии, изменению закона дисперсии электронов, флуктуациям плотности тока и т.д. Сложность и разнообразие возникающих при этом задач диктует поиск новых моделей, удобных для использования в той или иной физической ситуации.

Цель данной работы состоит в исследовании эффектов фоннного трения электронов-квазичастиц в конденсированных средах с учетом воздействия на электрон флуктуаций фоннного поля и запаздывания электрон-фоннного взаимодействия на основе микроскопической флуктуационно-диссипационной теории. Предложена и изучена модель, основанная на концепции пробной квазичастицы и позволяющая вычислять частотные зависимости времени релаксации импульса электрона (вследствие его взаимодействия с фононами) в ковалентных и ионных полупроводниковых кристаллах в достаточно широком диапазоне температур, скоростей и амплитуд внешнего постоянного и переменного электрического поля. Мы ограничились подробным анализом средних характеристик пробной квазичастицы, хотя полученное стохастическое уравнение в рамках предложенной модели позволяет рассчитывать статистические характеристики шумов в полупроводниках, в том числе негауссовы флуктуации скорости и эффекты высших корреляций, связанные с запаздыванием электрон-фоннного взаимодействия.

Используемый нами подход, основанный на концепции пробной частицы, позволяет определить времена релаксации квазичастицы и кинетические коэффициенты, ограничившись весьма простым математическим аппаратом. В рамках традиционного подхода в теории электрон-фоннного рассеяния указанная концепция наиболее последовательно использовалась в монографии Гантмахера и Левинсона [4\*]. Там же детально проанализирована роль экранирования в задачах рассеяния и проведено разделение возмущения кристаллического потенциала на макрополе и микрополе. Поэтому в методическом отношении наша мо-

дель опирается на работу [4\*], но вместо теории возмущений первого порядка для матричных элементов рассеяния мы используем усредненное уравнение Ланжевена для пробной квазичастицы, что позволяет учесть запаздывание взаимодействия и найти частотные зависимости коэффициента релаксации импульса. Что касается слагаемого, описывающего взаимодействие квазичастицы с решеткой в гамильтониане, он выбран в кулоновском виде с экранированием и, с учетом возможного отличия диэлектрической проницаемости остова решетки от единицы, переходит в предельных случаях в гамильтониан Фрелиха (используемый, в частности, при изучении транспорта поляронов [5\*]) или в обычный гамильтониан взаимодействия электрона с длинноволновыми фононами в ковалентных кристаллах, к которому приводит модель деформационного потенциала.

При выводе стохастического уравнения движения пробной квазичастицы используется статистическая теория нелинейных открытых квантовых систем [6\*], [7\*]. Данная теория, являясь обобщением линейной теории броуновского движения квантовых систем, развитой Ю.Швингером и Р.Сеницким [8\*], [9\*], дополняет известные методы квантовой кинетики [4\*], [10\*] и квантовой теории поля [11\*], [12\*] возможностями одновременного совместного исследования кинетики и флуктуаций как в квазиравновесных, так и в неравновесных состояниях динамической подсистемы, в том числе и применительно к конденсированным средам [13\*] – [15\*]. В нашей задаче, как уже подчеркивалось, данный подход позволяет учитывать запаздывание электрон-фононного взаимодействия и, таким образом, не ограничиваться рамками марковского приближения, условием применимости которого является малость времени корреляции флуктуаций термостата (времени элементарного акта рассеяния) по сравнению со временем изменения импульса квазичастицы. В связи с миниатюризацией электронных приборов и развитием физики мезоскопических систем анализ немарковских кинетических и флуктуационных эффектов приобретает особую актуальность. В частности, значительное внимание теоретиков и экспериментаторов привлекает исследование электронного транспорта и флуктуаций в субмикронных полупроводниковых структурах.

Анализ проблемы взаимодействия электронов с фононным полем решетки требует в общем случае полевого подхода. В рассматриваемых в диссертационной работе задачах рассеяния электрона на колебаниях кристаллической решетки целесообразно воспользоваться более простым одноэлектронным подходом, а именно, концепцией пробной частицы. Если ввести в равновесный кристалл неравновесную пробную

квазичастицу с заданным импульсом, то можно вычислить, с какой скоростью различные ее характеристики (энергия или направленный импульс) приближаются к равновесным. Темп приближения к равновесию описывается временем релаксации  $\tau$ , которое позволяет оценить кинетические коэффициенты. В этом приближении можно определить такие характеристики квазичастицы-электрона, обусловленные его взаимодействием с фононным полем решетки, как время жизни (затухание), закон дисперсии, в частности, эффективную массу. При этом характеристики электрона в отсутствие взаимодействия с фононами (например, закон дисперсии) считаются известными. Одночастичное приближение справедливо для невырожденного электронного газа в однородных полупроводниках и в различных мезоскопических структурах, когда в процессах проводимости принимает участие малое число носителей тока.

В диссертации предложена модель, позволяющая находить релаксационные характеристики и поправки к закону дисперсии пробной частицы в конденсированной среде. Выполнен микроскопический вывод стохастических уравнений для квазичастицы, находящейся в контакте с диссипативным окружением в присутствии внешней детерминированной силы, с учетом запаздывания взаимодействия и флуктуаций фононного поля. Полученные уравнения использованы для исследования фононной силы трения, действующей на пробную квазичастицу в конденсированных средах.

Другим видом квазичастиц в конденсированных средах, характеристики которых в значительной степени определяются фононным торможением, являются дислокации. Сложность и разнообразие эффектов, связанных с взаимодействием дислокаций-квазичастиц и фононного поля кристаллической решетки, делают актуальным применение флуктуационно-диссипационной теории к исследованию этих эффектов [16\*]. Развитие последовательной микроскопической флуктуационно-диссипационной теории применительно к взаимодействию дислокаций с фононами кристаллической решетки является отдельной крупной проблемой, далеко выходящей за рамки настоящей работы. Перед нами стояла здесь задача проанализировать некоторые механизмы и эффекты фононного торможения дислокаций в кристаллах, а также наметить возможные пути подхода к развитию указанной теории. В частности, в заключительном разделе диссертации - Приложении - исследуется динамика непрерывно распределенных дислокаций, формирующих полосу скольжения в кристалле в приближении квазивязкого скольжения, обусловленного фононным трением, а также эффекты динамики дислокацион-

ных скоплений в условиях нелинейного фононного торможения.

Актуальность выбранной темы диссертационной работы, таким образом, определяется как современным развитием экспериментальных возможностей, когда становится реальным наблюдение флуктуационных и кинетических эффектов, обусловленных конечностью времени корреляции флуктуаций термостата, так и развитием теоретических моделей (последовательный учет статистики, немарковских эффектов, упрощение, где это возможно, математического аппарата).

**Цель настоящей работы** состояла в теоретическом исследовании характеристик электрона-квазичастицы, обусловленных влиянием фононного трения, с учетом флуктуаций фононного поля и запаздывания взаимодействия, в конденсированных средах при наличии однородных слабых электрических полей, и в изучении динамики непрерывно распределенных дислокаций с учетом фононного трения. Основное внимание уделено решению следующих задач:

- построение микроскопической модели кинетики пробной частицы в фононном термостате, позволяющей единым образом учесть релаксационные и флуктуационные процессы, в том числе запаздывание электрон-фононного взаимодействия и влияние флуктуаций фононного поля;
- теоретическое исследование частотной и температурной зависимостей коэффициента релаксации импульса квазичастицы, определяющего фононное трение в случае слабого периодического внешнего электрического поля;
- исследование динамики непрерывно распределенных дислокаций в кристаллах с учетом фононного трения.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Построена микроскопическая модель кинетики пробной частицы, взаимодействующей с фононным полем, позволяющая единым образом учесть запаздывание электрон-фононного взаимодействия и влияние флуктуаций фононного поля.
2. Впервые проведено последовательное разделение двух составляющих фононной силы трения, действующей на пробную частицу, которые обусловлены соответственно реакцией фононного поля на внешнее возмущение (движущийся электрон) и влиянием на электрон флуктуаций фононного поля.
3. Исследована частотная зависимость коэффициента релаксации импульса электрона в случаях малой (по сравнению со скоростью

звука) и большой скоростей электрона при высоких и низких температурах термостата.

4. Найдена температурная зависимость коэффициента релаксации электрона-квазичастицы с учетом воздействия на электрон флуктуаций фононного поля. Показано, что в случае предельно низких температур электрон-фононное взаимодействие имеет чисто квантовый характер и релаксация импульса определяется флуктуациями фононного поля.
5. Выявлены особенности частотной зависимости формы линии поглощения излучения электроном, находящимся в квантовой точке и взаимодействующим с фононным полем кристаллической решетки в высокочастотном электрическом поле.
6. Исследована динамика непрерывно распределенных дислокаций, формирующих в кристалле полосу скольжения, контролируемого фононным трением. Найдены квазистационарные решения типа бегущей волны и нестационарные неоднородные распределения дислокационного заряда. В условиях нелинейной зависимости силы фононного торможения от скорости дислокаций построена автоволновая модель формирования полосы скольжения, интерпретируемой как волна переключения плотности дислокаций.

**Теоретическая и практическая значимость результатов** диссертации определяется следующими обстоятельствами. Разработка и применение микроскопического метода совместного исследования кинетических и флуктуационных процессов в конденсированных средах на примере движения электрона в поле кристаллической решетки позволяет выявить различные немарковские эффекты (например, частотная зависимость коэффициента релаксации электрона-квазичастицы). Теоретический анализ этих эффектов, проведенный в диссертации, может оказаться полезным при объяснении результатов экспериментальных исследований, связанных с влиянием электрон-фононного взаимодействия на характеристики электронов-квазичастиц. Одновременный учет вклада в электронные процессы флуктуаций фононного поля и запаздывания электрон-фононного взаимодействия особенно важен при исследовании электронного транспорта в наноструктурах. Этим определяется прикладное значение работы для современной электроники, в частности, для наноэлектроники. Полученная в диссертации фононная функция Грина, учитывающая нелинейный характер взаимодействия

электронов по фононным переменным, может быть полезна при объяснении физических явлений, связанных с многофононными процессами.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту.**

1. Последовательная статистическая теория движения электрона, взаимодействующего с фононным термостатом, позволяет:
  - построить микроскопическую модель кинетики пробной квазичастицы в фононном поле кристаллической решетки, единым образом учитывающую запаздывание электрон-фононного взаимодействия и влияние флуктуаций фононного поля на движение квазичастицы в невырожденных полупроводниках;
  - последовательно выделить два механизма фононной силы трения, обусловленные соответственно реакцией фононного поля на внешнее воздействие (электрон) и влиянием на электрон флуктуаций фононного поля, и получить выражение для обобщенной силы трения, которое, в отличие от феноменологического выражения, соответствующего марковскому приближению, содержит частотную зависимость, связанную с учетом запаздывания взаимодействия;
  - установить частотную зависимость времени релаксации импульса квазичастицы в случае ее малой (по сравнению со скоростью звука) скорости при высоких и низких температурах кристаллической решетки в переменном электрическом поле;
  - определить коэффициент фононной силы трения, действующей на пробную квазичастицу в квантовой точке.
2. Дисперсия коэффициента релаксации импульса медленно движущейся (по сравнению со скоростью звука) квазичастицы в области низких температур эффективно расширяет частотную зависимость проводимости в область высоких частот. В случае низкой температуры на низких частотах коэффициент релаксации импульса медленной квазичастицы пропорционален четвертой степени частоты, а на высоких частотах в зависимости от параметров кристалла может выходить на постоянное значение или достигать максимума, а затем падать как квадрат частоты.
3. Дисперсия коэффициента релаксации импульса быстрой квазичастицы в области высоких температур приводит к существенному увеличению проводимости в области высоких частот по сравнению с ее значением, определяемым временем релаксации на нулевой частоте. Коэффициент релаксации при высокой температуре



на нулевой частоте имеет конечное значение (пропорциональное скорости частицы), а затем с ростом частоты растет по параболическому закону, достигает максимума и падает как полуторная степень частоты.

4. Форма линии поглощения (излучения) электрона, находящегося в квантовой точке с параболическим профилем потенциала, оказывается несимметричной относительно собственной частоты колебаний электрона. Ширина линии монотонно увеличивается с ростом частоты электронного перехода и выходит на постоянное значение в области частот, на которых экранирование ядер решетки не существенно.
5. Анализ динамики непрерывно распределенных дислокаций, движение которых контролируется фононным трением, позволяет определить и описать возможные режимы движения дислокаций, формирующих в кристалле полосу скольжения, включая квазистационарные решения типа бегущей волны, нестационарные неоднородные распределения дислокационного заряда, автоволновые режимы динамики полосы скольжения, интерпретируемой как волна переключения плотности дислокаций.

**Апробация работы.** Диссертация выполнена в Нижегородском государственном педагогическом университете в период с 1993 по 2006 г. Основные положения и результаты работы докладывались на научно-преподавательских конференциях и семинарах кафедр теоретической физики НГПУ и ННГУ, на четвертой Нижегородской сессии молодых ученых (1999). Отдельные задачи и результаты, рассмотренные в диссертации, вошли в разработанный автором элективный курс "Моделирование физических явлений в конденсированных средах" для магистрантов-физиков НГПУ [10].

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 10 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата. Основные результаты опубликованы в 8 статьях в отечественных журналах, из них 3 статьи – в центральных журналах [1] – [3] и 5 статей – в рецензируемых сборниках [4] – [8].

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения, Приложения и списка литературы из 142 наименований. Объём диссертации составляет 166 страниц, включая 21 рисунок.

## Краткое содержание работы

Во **Введении** рассматривается актуальность темы, кратко излагается содержание работы, формулируются ее цели и основные результаты, представленные к защите. Обсуждаются методы решения поставленных задач, описывается новизна и практическая значимость полученных результатов. **Первая глава** имеет методический характер и посвящена краткому изложению исходных положений, с помощью которых описываются флуктуационно-диссипационные процессы в открытых квантовых системах и на которых основано дальнейшее исследование. В **разделе 1.1** приведены некоторые результаты нестационарной теории возмущений, опирающейся на формализм  $S$  - матрицы. Определено используемое в дальнейшем понятие линейного и нелинейного откликов (функции Грина), возникающих в системе при наложении внешних сил (полей), и проанализированы их свойства. Введено понятие обобщенной восприимчивости. В **разделе 1.2** представлено описание статистических свойств макроскопических систем с использованием временных и спектральных характеристик флуктуаций как в классической, так и в квантовой областях. Основу теории составляют флуктуационно-диссипационные соотношения и флуктуационно-диссипационная теорема. В **разделе 1.3** введено понятие гауссовых переменных и приведены их основные свойства.

Во **второй главе** получено стохастическое уравнение движения пробной квазичастицы с учетом запаздывания электрон-фононного взаимодействия [5], которое используется для решения задачи о релаксации импульса пробной квазичастицы в квантованном фононном поле кристаллической решетки. Анализ основан на микроскопической флуктуационно-диссипационной теории в одноэлектронном приближении. Основным механизмом рассеяния электронов считалось их взаимодействие с акустическими фононами. **Раздел 2.1** представляет собой краткое содержание главы 2. В **разделе 2.2** приведен вывод классических стохастических уравнений для нелинейных систем, взаимодействующих с гауссовым термостатом, с использованием основных положений микроскопической флуктуационно-диссипационной теории [4]. Классические уравнения переходят в известные квантовые [6\*] на основе принципа соответствия. В **разделе 2.3** в общем виде поставлена задача о движении пробной квазичастицы, взаимодействующей с диссипативным окружением во внешнем электрическом поле. Считалось, что свойства квазичастиц-электронов при фиксированном положении ядер известны, а электрон может находиться в любом неравновесном состоянии. В этом случае наиболее важный механизм диссипации и флуктуаций

при электронном переносе обусловлен взаимодействием электронов с колебаниями решетки – фононным термостатом.

Для решения поставленной задачи использовалось одноэлектронное приближение, при этом считалось, что невозмущенные фононные переменные подчиняются гауссовой статистике с корреляционной функцией  $M(\mathbf{k}, t-t_1)$  и фононной функцией Грина  $G(\mathbf{k}, t-t_1)$ . В приближении эффективной массы получено квантовое стохастическое уравнение с учетом запаздывания электрон-фононного взаимодействия, подобное уравнению Ланжевена, которое описывает как кинетику, так и флуктуации электрона [5]:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{r}_j(t) &= \sum_{\mathbf{k}} \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 (ik_j) (G(\mathbf{k}, t-t_1) \times \\
 &\times \frac{1}{2} [\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)), \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1))]_+ + M(\mathbf{k}, t-t_1) \times \\
 &\times \frac{i}{\hbar} [\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)), \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1))]_- \eta(t-t_1)) + eE_j(t) + \xi_j(t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и эффективная масса электрона,  $\eta(t-t_1)$  – функция Хевисайда,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $E_j(t)$  – внешнее однородное электрическое поле,  $\xi_j(t)$  – строго определенный флуктуационный источник, являющийся случайной величиной с равным нулю средним значением. С учетом принципа соответствия данное уравнение переходит в квазиклассическое стохастическое уравнение, описывающее транспорт классического электрона в квантовом поле кристаллической решетки. В **разделе 2.4** предложена модель гамильтониана взаимодействия квазичастицы с решеткой в кулоновском виде с экранированием, что позволило рассматривать приближения большого и малого радиуса экранирования и, кроме того, эффективно включить в теорию коллективное влияние электронов на их взаимодействие с фононным полем решетки в одноэлектронном приближении. С учетом возможного отличия диэлектрической проницаемости остова решетки  $\varepsilon$  от единицы, он переходит в предельных случаях в гамильтониан Фрелиха для ионных кристаллов или в гамильтониан взаимодействия электрона с длинноволновыми фононами в ковалентных кристаллах, который дает теория деформационного потенциала. С использованием выбранного гамильтониана найдено выражение для функции Грина и коррелятора невозмущенных фононных переменных [6]. В случае линейного взаимодействия по фононным переменным, что справедливо при малом ангармонизме невозмущенных

колебаний ядер решетки, функция Грина равна

$$G(\mathbf{k}, t - t_1) = \lambda^2 \frac{k^2}{(k^2 + \varkappa^2)^2 \omega_s(k)} \sin(\omega_s(k)(t - t_1)) \eta(t - t_1),$$

где

$$\lambda^2 = \left( \frac{ze^2}{a\pi\varepsilon} \right)^2 \frac{k_d^4}{M} \frac{1}{N}$$

– константа электрон-фононного взаимодействия. Здесь  $\varkappa$  – величина, обратная радиусу экранирования,  $\omega_s(k)$  – закон дисперсии  $s$ -ой фононной ветви,  $a$  – период решетки,  $ze$  – заряд ядра решетки,  $M$  – суммарная масса ядер в элементарной ячейке,  $N$  – число элементарных ячеек,  $k_d = \pi/a$ . Найдена спектральная плотность флуктуаций фононного поля, которая в соответствии с флуктуационно-диссипационной теоремой Каллена-Велтона определяется мнимой частью функции Грина

$$S(\mathbf{k}, \omega) = \hbar \text{cth} \left( \frac{\hbar\omega}{2T} \right) \lambda^2 \frac{k^2}{(k^2 + \varkappa^2)^2} \pi \delta(\omega_s^2(k) - \omega^2),$$

где  $T$  – температура решетки. В **разделе 2.5** получено выражение для среднего значения обобщенной фононной силы трения, действующей на пробную частицу в изотропном кристалле во внешнем слабом электрическом поле:

$$\begin{aligned} L(t - t_1) &= \frac{1}{3m} \sum_{\mathbf{k}} k^2 (G(\mathbf{k}, t - t_1)) \frac{1}{2} \langle [\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)), \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1))]_+ \rangle + \\ &+ M(\mathbf{k}, t - t_1) \frac{i}{\hbar} \langle [\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)), \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1))]_- \rangle \eta(t - t_1). \end{aligned} \quad (2)$$

Введен обобщенный коэффициент фононной силы трения  $\gamma(\omega)$ :

$$i\omega\gamma(\omega) = L(\omega) - L(0), \quad (3)$$

принципиальное отличие которого от феноменологического заключается в его частотной зависимости. Полученный обобщенный коэффициент фононной силы трения определенным образом учитывает запаздывание электрон-фононного взаимодействия, причем его действительная часть определяет время релаксации импульса электрона, а мнимая часть – поправку к массе квазичастицы, в общем случае зависящую от частоты.

Выражение (2) позволяет исследовать временную и частотную зависимости среднего значения фононной силы трения для различных параметров задачи. Получено выражение для среднего значения фононной

силы трения для случая, когда скорость электрона  $V$  мало меняется на временах, определяющих запаздывание взаимодействия:

$$L(\tau) = \sum_{\mathbf{k},s} \frac{1}{m} \frac{\lambda^2 k^4 \cos^2 \theta}{(k^2 + \varkappa^2)^2 \omega_s(k)} \left\{ \sin \omega_s(k) \tau \cos \frac{\hbar k^2}{2m} \tau + \right. \quad (4)$$

$$\left. + \cos \omega_s(k) \tau \sin \frac{\hbar k^2}{2m} \tau \operatorname{cth} \frac{\hbar \omega_s}{2T} \right\} \eta(\tau) \exp(ikV\tau \cos \theta).$$

Здесь  $\theta$  - угол между направлением движения электрона и импульсом фонона. Получен коэффициент релаксации импульса быстрой квазичастицы (скорость которой больше скорости звука в конденсированной среде  $c$ ) в случае высоких температур решетки без учета запаздывания электрон-фононного взаимодействия. Сопоставление полученного результата с коэффициентом релаксации в методе деформационного потенциала в случае сильного экранирования дает выражение для константы деформационного потенциала через микроскопические параметры задачи

$$\sigma = \frac{4\pi}{\varkappa^2 a^2} \frac{ze^2}{\varepsilon a}.$$

В квазиклассическом приближении для предложенной в разделе 2.4 модели электрон-фононного взаимодействия получено выражение коэффициента фоновой силы трения, действующей на медленный электрон ( $V \ll c$ ) в переменном электрическом поле [6]. Данное выражение позволяет выделить две составляющих фоновой силы трения и исследовать особенности частотной и температурной зависимостей обобщенной фоновой силы трения. Основные результаты главы 2 сформулированы в **разделе 2.6**.

Вопросы, рассмотренные в **третьей главе**, связаны с исследованием частотной и температурной зависимостей коэффициента релаксации импульса пробной частицы, взаимодействующей с фоновым полем. После краткого введения (**раздел 3.1**) в **разделе 3.2** получено выражение для коэффициента релаксации импульса медленной (по сравнению со скоростью звука) квазичастицы в переменном электрическом поле, позволяющее исследовать его частотную зависимость при высоких и низких температурах термостата. При низких температурах

$$\operatorname{Re} \gamma(\omega) = \frac{\pi \lambda_1^2}{6\omega c} \int_0^{k_d} dk \frac{k^5}{(k^2 + \varkappa^2)^2} \delta \left( \frac{\hbar k^2}{2m} + ck - \omega \right) = \quad (5)$$

$$= \frac{\pi \lambda_1^2}{6\omega c} \frac{k_1^5}{(k_1^2 + \varkappa^2)^2} \left( c^2 + \frac{2\hbar\omega}{m} \right)^{-1/2},$$

где

$$k_1 = \frac{mc}{\hbar} \left( \sqrt{1 + \frac{2\hbar\omega}{mc^2}} - 1 \right).$$

На низких частотах (когда  $\omega \ll \omega^*, \omega_0$ , где  $\omega^* = \frac{mc^2}{2\hbar}$ ,  $\omega_0 = \varkappa c$ ) коэффициент релаксации пропорционален четвертой степени частоты. На частотах порядка или больше минимальной из частот  $\omega^*, \omega_0$  дисперсионная зависимость существенно меняется. В случае  $\omega_0 > \omega^*$  при  $\omega > \omega^*$  коэффициент релаксации линейно растет с частотой, достигает максимума  $\gamma_{max} = \pi\lambda_1^2 m^2 / 12\hbar^2 c \varkappa^2$  при  $\omega_{max} \simeq \hbar\varkappa^2 / 2m$  и затем падает как  $\omega^{-2}$ . В обратном случае  $\omega_0 < \omega^*$  ( $2\hbar\varkappa < mc$ ) коэффициент релаксации при  $\omega > \omega_0$  выходит на постоянное значение  $\pi\lambda_1^2 / 6c^3 \gg \gamma_{max}$ , а при  $\omega > \omega^*$  также падает как  $\omega^{-2}$ . Обсуждается влияние дисперсии коэффициента релаксации импульса электрона на проводимость полупроводника в рамках теории Друде. Показано, что дисперсия коэффициента релаксации импульса медленного электрона в области низких температур эффективно расширяет зависимость реальной части проводимости  $\sigma_r(\omega)$  в область высоких частот.

Выявлены особенности расчета коэффициента релаксации медленной квазичастицы в переменном электрическом поле в квазиклассическом приближении [1]. Показано, что фоновая сила трения, обусловленная только реакцией фононного поля на электрон, слабо зависит от температуры решетки через радиус экранирования потенциала ядер решетки и имеет сильно выраженную зависимость от частоты. Исследована температурная зависимость коэффициента релаксации импульса электрона-квазичастицы с учетом воздействия на электрон флуктуаций фононного поля.

В **разделе 3.3** изучена частотная зависимость коэффициента релаксации импульса быстрой (по сравнению со скоростью звука) квазичастицы при высоких и низких температурах термостата. Коэффициент релаксации при высокой температуре на нулевой частоте имеет конечное значение (пропорциональное скорости частицы), а затем с ростом частоты растет по параболическому закону. При  $\omega \simeq mV^2 / 2\hbar$  (но  $\omega < \hbar\varkappa^2 / 2m$ ) рост замедляется ( $Re\gamma \simeq \omega^{1/2}$ ). Наконец, при  $\omega_{max} \simeq \hbar\varkappa^2 / 2m$  коэффициент релаксации достигает максимума и затем падает как  $\omega^{-3/2}$ . Показано, что дисперсия коэффициента релаксации импульса быстрого электрона в области высоких температур приводит к увеличению проводимости по сравнению с  $\sigma_{r0}(\omega)$ , определяемым временем релаксации на нулевой частоте, в области высоких частот.

В **разделе 3.4** исследованы особенности дрейфа квазичастицы во

внешнем постоянном электрическом поле, определяемые ее взаимодействием с акустическими и оптическими фононами. Показано, что в случае рассеяния на акустических фононах дрейфовая скорость квазичастицы в сильном внешнем поле растет пропорционально корню квадратному из напряженности поля. Такая зависимость является весьма типичной для полупроводников в сильных электрических полях. В полярных кристаллах наибольший интерес представляет расчет другой составляющей постоянной силы трения, обусловленной рассеянием на оптических фононах. В случае рассеяния квазичастицы на оптических фононах частоты  $\Omega$  сила растет пропорционально дрейфовой скорости при  $V_{dr} < V^*$ , где  $V^* = (2\hbar\Omega/m)^{1/2}$ . При  $V_{dr} > V^*$ , когда частица может излучать и поглощать оптические фононы, рост силы становится существенно более быстрым, но уже при  $V_{dr} \gtrsim 3V^*$  этот рост насыщается.

В **разделе 3.5** проведено исследование высокочастотных свойств фоновонного трения и диссипации энергии электрона, находящегося в квантовой точке с параболическим профилем потенциала и взаимодействующего с фоновонным полем [7]. При анализе особенностей фоновонного трения учитывалась только реакция фоновонного поля, определяющая запаздывание взаимодействия, что справедливо на относительно высоких частотах. Показано, что диссипация энергии электрона, находящегося в связанном состоянии и взаимодействующего с фоновонным полем, зависит от соотношения собственной частоты электрона  $\omega_1$  и частоты  $\omega_0$ , связанной с экранированием ядер решетки. Коэффициент затухания определяет смещение резонансной частоты колебаний электрона в квантовой точке относительно собственной частоты колебаний электрона  $\omega_1$ . С увеличением частоты собственных колебаний электрона  $\omega_1$  ширина линии поглощения увеличивается и становится максимальной при  $\omega_1 \gg \omega_0$ . Основные результаты главы 3 сформулированы в **разделе 3.6**.

В **Приложении** рассмотрен ряд эффектов фоновонной силы торможения, определяющей поведение другого вида квазичастиц – дислокаций в кристаллах. Исследована динамика непрерывно распределенных дислокаций, формирующих полосу скольжения в кристалле в приближении квазивязкого скольжения, обусловленного фоновонным трением. Показано, что в условиях, когда силой взаимодействия дислокаций можно пренебречь, а процессы их рождения и аннигиляции играют определяющую роль в динамике скопления, распределение плотности дислокаций может быть описано в рамках нелинейного уравнения Бюргерса. Найдены квазистационарные решения типа бегущей волны и нестационарные неоднородные распределения дислокационного заря-

да [2]. Построена автоволновая модель формирования полосы переключения скорости пластической деформации, основанная на нелинейной зависимости силы фононного торможения от скорости дислокаций [3].

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

#### **Основные результаты и выводы**

1. Построена микроскопическая модель кинетики пробной квазичастицы в фононном поле кристаллической решетки, позволяющая единым образом учесть запаздывание электрон-фононного взаимодействия и влияние флуктуаций фононного поля на движение квазичастицы в невырожденных полупроводниках.
2. Проведено последовательное разделение двух составляющих фононной силы трения, действующей на пробную частицу, которые обусловлены реакцией фононного поля на внешнее возмущение (движущийся электрон) и влиянием на электрон флуктуаций фононного поля. Получено выражение для обобщенной силы трения, которое, в отличие от феноменологического выражения, соответствующего марковскому приближению, содержит частотную зависимость, обусловленную запаздыванием взаимодействия.
3. Установлена частотная зависимость времени релаксации импульса квазичастицы в случае ее малой (по сравнению со скоростью звука) скорости при высоких и низких температурах кристаллической решетки в переменном электрическом поле. В наиболее важном случае низкой температуры на низких частотах коэффициент релаксации пропорционален четвертой степени частоты, а на высоких частотах в зависимости от параметров кристалла может выходить на постоянное значение или достигать максимума, а затем падать как квадрат частоты. В рамках теории Друде показано, что дисперсия коэффициента релаксации импульса медленной квазичастицы в области низких температур эффективно расширяет частотную зависимость проводимости в область высоких частот.
4. Найдена частотная зависимость коэффициента релаксации импульса квазичастицы в случае ее высокой (по сравнению со скоростью звука) скорости при высоких и низких температурах кристаллической решетки. Коэффициент релаксации при высокой температуре на нулевой частоте имеет конечное значение (пропорциональное скорости частицы), а затем с ростом частоты растет по параболическому закону, достигает максимума и падает как полуквадрат частоты. Показано, что дисперсия коэффициента



релаксации импульса быстрой квазичастицы в области высоких температур приводит к существенному увеличению проводимости в области высоких частот по сравнению с ее значением, определяемым временем релаксации на нулевой частоте.

5. Найдены аналитические выражения для силы торможения и скорости дрейфа квазичастицы во внешнем постоянном электрическом поле, определяемые ее взаимодействием с акустическими и оптическими фононами.
6. Найден асимптотический профиль линии поглощения излучения электроном, находящимся в квантовой точке и взаимодействующим с фононным полем кристаллической решетки в высокочастотном электрическом поле, и показано, что ширина линии монотонно увеличивается с ростом частоты электронного перехода и выходит на постоянное значение в области частот, на которых экранирование не существенно.
7. Определены возможные режимы движения непрерывно распределенных дислокаций, формирующих в кристалле полосу скольжения, контролируемого фононным трением, в том числе: квазистационарные решения типа бегущей волны, нестационарные неоднородные распределения дислокационного заряда, автоволновые режимы динамики полосы скольжения, интерпретируемой как волна переключения плотности дислокаций.

#### Список работ по теме диссертации

- [1] Ефремов Г.Ф., Мареева О.В., Воробьев Д.А. Статистическая теория фононной силы трения, действующей на электрон проводимости // Изв. ВУЗов - Радиофизика. 2005. Т. 48. N3. С. 249-268.
- [2] Мареева О.В., Сарафанов Г.Ф., Нагорных С.Н. Кинетические механизмы образования дислокационных скоплений // Физика металлов и металловедение. 1993. Т. 75. Вып. 4. С. 137-141.
- [3] Сарафанов Г.Ф., Мареева О.В., Нагорных С.Н. Полоса Чернова-Людерса как волна переключения // Физика металлов и металловедение. 1995. Т. 80. Вып. 2. С. 13-19.
- [4] Ефремов Г.Ф., Мареева О.В. Модель броуновского движения классического электрона в фононном термостате // Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 1999. Вып. 1(20). С. 114-122.
- [5] Ефремов Г.Ф., Мареева О.В., Воробьев Д.А. Броуновское движение электрона проводимости в фононном поле кристаллической решетки // Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2001. Вып. 1(23). С. 127-135.

- [6] Ефремов Г.Ф., Мареева О.В., Воробьев Д.А., Шарков В.В. Статистическая теория радиационной силы трения электрона в фотонном и фононном полях // Актуальные проблемы статистической радиофизики (Малаховский сборник). Т. 2. Н. Новгород, 2003. С. 5-41.
- [7] Ефремов Г.Ф., Мареева О.В., Воробьев Д.А. К теории фононной силы трения // Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2004. Вып. 1(27). С. 103-118.
- [8] Сарафанов Г.Ф., Мареева О.В. Полевые модели динамики дислокаций в кристаллах // Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2004. Вып. 1(27). С. 95-102.
- [9] Ефремов Г.Ф., Мареева О.В. Броуновское движение классического электрона, взаимодействующего с фононным термостатом в высокочастотном электрическом поле. Четвертая нижегородская школа молодых ученых. Сборник тезисов докладов. Секция физики. Н. Новгород, 1999. С. 115.
- [10] Мареева О.В. Программа элективного курса "Моделирование физических явлений в конденсированных средах" // Материалы по теории и методике обучения физике. Вып. 4. Н. Новгород: Изд-во НГПУ. 2004. С. 3-7.

#### Список цитированной литературы

- [1\*] Rammer J. Quantum transport theory. Reading, Massachusetts: Perseus Books. 1998. P.377-410.
- [2\*] Максимов Е.Г., Саврасов Д.Ю., Саврасов С.Ю. Электрон-фононное взаимодействие и физические свойства металлов // УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 353-376.
- [3\*] Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005.
- [4\*] Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. М.: Наука. 1984.
- [5\*] Janssen N., Zwerger W. Nonlinear transport of polarons // Phys. Rev. B. 1995. V.52. N13. P.9406-9417.
- [6\*] Ефремов Г.Ф., Смирнов А.Ю. К микроскопической теории флуктуаций квантовых систем, взаимодействующих с гауссовым термостатом // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. С. 1071-1086.
- [7\*] Ефремов Г.Ф. Стохастические уравнения для открытых квантовых систем. Горький: Изд-во ГГУ. 1982. 120 с.
- [8\*] Швингер Ю. Броуновское движение квантового осциллятора. Сб. статей. М.: ИЛ. 1962. С. 96-167.
- [9\*] Senitzky R. Phys. Rev. 1960. V. 119. P. 670-679; Ibid: 1961. V. 124. P. 642-650.

- [10\*] Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Наука. 1987.
- [11\*] Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: Физматгиз. 1962.
- [12\*] Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. М.: Мир. 1967.
- [13\*] Ford G.F., Lewis J.T., O'Connell R.F. Quantum Langevin equation // Phys.Rev.A. 1988. V.37. N11. P.4419-4428.
- [14\*] Eckern U., Schon G., Ambegaokar V. Quantum dynamics of a superconducting tunnel junction // Phys. Rev. B. 1984. V.30. N11. P.6419-6431.
- [15\*] Efremov G.F., Mourokh L.G., Smirnov A.Yu. Noise-induced relaxation of quantum oscillator interacting with a thermal bath // Phys. Lett. A. 1993. V.175. P.89-92.
- [16\*] Судзуки Т., Есинага Ч., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир. 1989.

МАРЕЕВА Ольга Владимировна

**ЭФФЕКТЫ  
ФОНОННОГО ТРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

Автореферат

Подписано к печати 09.10.2006 г.  
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная №1.  
Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз. Заказ №81(2006).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46