

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

на правах рукописи

УДК 537.632, 537.653

Пронин Алексей Алексеевич

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В СИСТЕМАХ С СИЛЬНЫМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ КВАЗИЧАСТИЦ

Специальность: 01.04.07 “Физика конденсированного состояния”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук

МОСКВА

2001 г.

Работа выполнена в Институте общей физики Российской Академии Наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,

профессор С.В. Демишев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,

профессор Б.А. Волков (ФИ РАН)

доктор физико-математических наук,

профессор В.А. Вентцель (ИФВД РАН)

Ведущая организация: МГУ им. Ломоносова

Защита состоится " ____ " _____ 2001 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета К 212.156.01 при Московском физико-техническом
институте по адресу: 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, корпус В-2.

Отзывы направлять по адресу: 141700, г. Долгопрудный Московской обл.,
Институтский пер., д. 9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2001 г.

Учёный секретарь специализированного

совета К 212.156.01 МФТИ

кандидат технических наук

Н.П. Чубинский

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Задачей спектроскопии в наиболее общем смысле является изучение частотного отклика исследуемого объекта, причём в идеале диапазон частот электромагнитного излучения должен быть максимально большим. В случае твердотельных объектов наиболее распространены исследования в оптическом (включая дальний ИК) диапазоне и в области "радиотехнических" частот $1 \div 10$ МГц. Исторически значительный промежуточный интервал, составляющий почти десять декад по частоте, заполнялся различными методами сантиметровой, миллиметровой и субмиллиметровой спектроскопии, которые, как правило, ограничены диапазоном частот $\nu \geq 10$ ГГц. При этом интервал частот от нескольких десятков мегагерц до нескольких гигагерц оказывается достаточно трудным для экспериментального исследования, поскольку, с одной стороны, длина волны излучения уже сравнима с размерами различных элементов измерительной схемы, что сильно затрудняет выделение полезного сигнала от образца - объекта исследования, а с другой - ещё недостаточно мала для эффективного использования волноводной техники и резонаторных методов. При проведении опытов в условиях низких температур возникает дополнительная сложная экспериментальная задача выделения полезного сигнала от образца на фоне многократно его превосходящего вклада от измерительной линии, необходимой для выполнения измерений в криостате и имеющей длину порядка метров.

С фундаментальной точки зрения рассматриваемый диапазон частот представляет интерес для исследования прыжкового токопереноса в неупорядоченных средах, где дисперсионные зависимости проводимости вида $\sigma(\omega) \sim \omega^s$ ($\omega = 2\pi\nu$) могут быть прослежены на интервале частот, охватывающем до 10 порядков [1]. Однако такие исследования, за единичными исключениями, до сих пор были ограничены диапазоном $\nu \leq 10$ МГц, а интервал $1 \div 10$ МГц $\leq \nu \leq 1$ ГГц оставался практически неисследованным. Так как длина прыжка на переменном токе $R_\omega \sim \ln(\nu_0/\omega)$ уменьшается с ростом частоты ω , то условие применимости парного (дипольного) приближения $R_{opt} > R_\omega$ [2] (где R_{opt} - длина прыжка на постоянном токе) должно улучшаться с увеличением частоты, и эксперименты в высокочастотной области должны позволить выполнить более точную проверку существующих теорий прыжковой проводимости.

Помимо исследований прыжковой проводимости, рассматриваемый диапазон частот представляет интерес для различных твердотельных объектов, характеризующихся сильным квазичастичным взаимодействием, доминирующим при низких температурах. При этом дисперсия динамического отклика может возникать как в результате "прямого попадания" характерной частоты системы в исследуемый интервал, так и на "хвосте" более высокочастотной особенности $\sigma(\omega)$. В любом случае, получение информации о поведении проводимости в диапазоне $1 \div 10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 1 \text{ ГГц}$ необходимо для адекватного восстановления спектра $\sigma(\omega)$ или $\epsilon(\omega)$ в широком интервале от $\omega=0$ (статические измерения на постоянном токе) до субмиллиметрового или ИК-диапазона, а также для проведения расчётов с помощью соотношений Крамерса-Кронига. Такая методология представляется весьма плодотворной для исследования систем с тяжёлыми фермионами, где большая эффективная масса носителей заряда приводит к заметному уменьшению характерных частот в системе.

Ещё один важный пример возникновения дисперсии в области относительно низких частот связан с фазовыми переходами и наличием мягких мод. Классическим примером таких систем являются сегнетоэлектрики [3, 4]. Возможными "кандидатами", интересными с точки зрения низкочастотной спектроскопии, оказываются и различные низкоразмерные неорганические спин-Пайерлсовские соединения, которые интенсивно исследуются начиная с начала 90-х годов [5]. Действительно, для возникновения спин-Пайерлсовской неустойчивости теория требует сильного смягчения фононных мод, что может обусловить появление низкочастотной дисперсии.

Из проведённого рассмотрения следует, что исследование низкочастотного ($1 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$) динамического отклика в системах с сильным взаимодействием квазичастиц представляет собой актуальную методическую и фундаментальную задачу, которая интересна для широкого класса экспериментальных объектов, интенсивно изучаемых в современной физике конденсированного состояния.

Цель работы

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании низкочастотного ($1 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$) динамического отклика в системах с сильными квазичастичными взаимодействиями. Для этого в рамках комплексного подхода с привлечением дополнительных измерений различных транспортных характеристик

на постоянном токе были исследованы следующие соединения: объёмный аморфный антимонид галлия (α -GaSb), соединения с сильным электрон-электронным взаимодействием SmB_6 и FeSi , низкоразмерные магнитные системы CuGeO_3 и NaV_2O_5 и линейный квазиодномерный углеродный полимер - карбин. Указанные материалы в настоящее время являются объектами интенсивных экспериментальных и теоретических исследований и позволяют изучать различные аспекты влияния разупорядочения и взаимодействия квазичастиц на динамический отклик.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих основных положениях:

- Разработана оригинальная методика измерения комплексной проводимости и диэлектрической проницаемости образцов в диапазоне частот 1 МГц÷1 ГГц, позволяющая проводить измерения в интервале температур 1.8÷300 К в магнитном поле до 7 Тл.
- Впервые изучены частотные и температурные зависимости проводимости на переменном токе $\sigma(\omega, T)$ объёмных образцов аморфного антимонида галлия. Показано, что прыжковую проводимость α -GaSb в области частот 1÷500 МГц нельзя описать в рамках парного (дипольного) приближения или в модели многократных прыжков, что может быть обусловлено влиянием длины когерентности фазы волновой функции локализованного состояния.
- Проведено комплексное исследование транспортных характеристик "Кондо-изоляторов" SmB_6 и FeSi при гелиевых и промежуточных температурах. Обнаружена низкочастотная дисперсия проводимости в SmB_6 на частотах 500 МГц÷1 ГГц, предположительно связанная с формированием когерентного основного состояния при $T \leq 5$ К. В случае FeSi предсказано возникновение сильной дисперсии в миллиметровой и субмиллиметровой области спектра.
- В низкоразмерном магнетике α' - NaV_2O_5 в окрестности фазового перехода при $T=33.2$ К обнаружена λ -аномалия комплексной диэлектрической проницаемости. Показано, что критическое поведение ϵ и других физических величин в этом соединении носит универсальный характер.
- Впервые исследована статическая и динамическая проводимость карбинов, синтезированных в условиях высокого давления. Установлено, что условия синтеза

под давлением позволяют менять эффективную размерность системы от одномерной до трёхмерной. Впервые получено экспериментальное подтверждение модели Ханта для одномерной прыжковой проводимости на переменном токе.

Практическая ценность работы

Результаты, полученные в диссертационной работе, способствуют дальнейшему развитию представлений о механизмах прыжкового транспорта на переменном токе в неупорядоченных средах. Созданная в рамках данной работы методика измерения комплексной проводимости и диэлектрической проницаемости образцов в диапазоне частот $1 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$, позволяющая проводить измерения в интервале температур $1.8 \div 300 \text{ К}$ в магнитном поле до 7 Тл , может быть использована при разработке новых измерительных приборов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7 Школе-семинаре молодых учёных (Туапсе, 1999), XXXI и XXXII Совещаниях по физике низких температур (Москва, 1998; Казань, 2000), XXII Международной конференции по физике низких температур (LT-22, Хельсинки, Финляндия, 1999), Международной зимней школе по физике полупроводников (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург–Зеленогорск, 2000), 8 Международной конференции по прыжковой проводимости и связанным явлениям (HRP8, Мурсия, Испания, 1999).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и заключения и содержит 147 страниц машинописного текста, включая 30 иллюстраций, 5 таблиц и список литературы из 130 наименований.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели исследования, а также кратко изложено распределение материала по главам.

Первая глава представляет собой литературный обзор, который начинается с краткого изложения основных существующих теоретических моделей сред, потенциально обладающих низкочастотной дисперсией.

С точки зрения теории наиболее простым является случай слабо взаимодействующих носителей [4, 6], в частности, классические модели свободных электронов Друде-Лоренца для проводящих материалов и гармонического осциллятора с затуханием для диэлектриков. Вследствие малой инерционности процессов с участием микрочастиц дисперсионные явления для этих механизмов обычно наблюдаются в оптическом диапазоне частот. Однако при наличии взаимодействия, например, в системах с большой эффективной массой носителей заряда или электронной/решёточной неустойчивостью, характерные частоты могут заметно уменьшиться.

Вследствие разнообразия физической природы релаксационных механизмов дисперсии связанные с ними характерные времена релаксации могут располагаться в широком диапазоне значений - от 10^3 до 10^{-12} с, причём релаксационное поведение $\sigma(\omega)$ и $\varepsilon(\omega)$ оказывается более сложным для интерпретации. Особый характер релаксационные эффекты приобретают в тех случаях, когда они связаны с наличием в системе разупорядочения, например, при описании динамической проводимости аморфных полупроводников, для которых в широком частотном диапазоне наблюдаются степенные зависимости проводимости вида

$$\text{Re}\sigma(\omega, T) \sim T^\alpha \omega^S. \quad (1)$$

Отметим, что асимптотическая формула (1) справедлива для различных моделей динамической прыжковой проводимости, например, электронного или поляронного туннелирования в парном (дипольном) приближении и модели многократных прыжков. В этой связи представляет интерес то обстоятельство, что если для проводимости на постоянном токе выполняется закон Мотта [1, 2]

$$\rho = \rho_0 \exp(T_0/T)^n, \quad (2)$$

а на переменном токе справедливо соотношение (1), то совместный количественный анализ транспортных характеристик на постоянном и переменном токе позволяет независимо определить параметры локализованных состояний и, таким образом, осуществить экспериментальную проверку различных моделей динамической прыжковой проводимости.

В завершение этой главы приводятся основные сведения об известных физических свойствах исследуемых соединений: объёмного аморфного антимонида

галлия (α -GaSb), соединений с сильным электрон-электронным взаимодействием SmB_6 и FeSi , низкоразмерных магнитных систем CuGeO_3 и NaV_2O_5 и линейного квазиодномерного углеродного полимера – карбина, а также обосновывается актуальность выбора указанных объектов исследования.

Во второй главе подробно описана оригинальная методика измерения комплексной проводимости и диэлектрической проницаемости образцов в диапазоне частот $1 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$, созданная на базе анализатора импеданса HP4191A и позволяющая проводить измерения в интервале температур $1.8 \div 300 \text{ К}$ в магнитном поле до 7 Тл . Основная методическая проблема связана с тем, что в этом частотном диапазоне длина волны излучения становится сравнимой с размерами различных элементов измерительной схемы, но ещё недостаточно мала для эффективного использования волноводной техники и резонаторных методов. Следовательно, оказывается необходимым выделять полезный сигнал от образца на фоне многократно его превосходящего вклада от измерительной линии, имеющей длину порядка метров и необходимой для выполнения измерений в криостате (см. рис. 1).

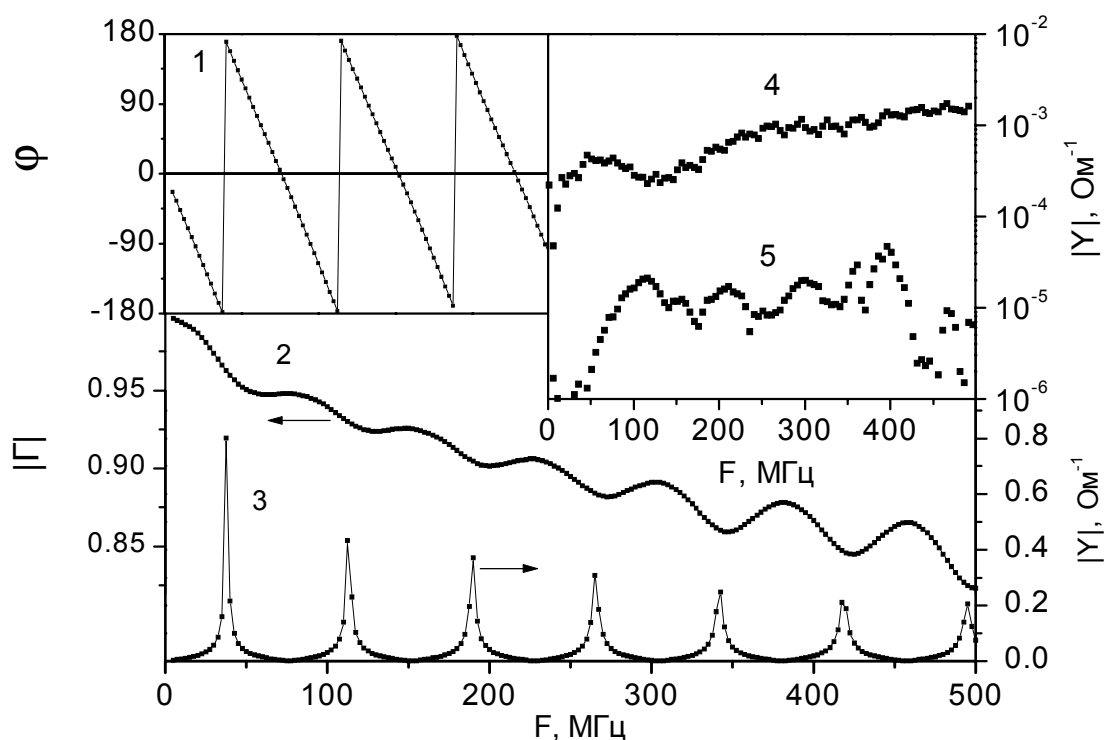


Рис. 1. Частотные зависимости параметров разомкнутой линии: фазы и модуля коэффициента отражения (кривые 1 и 2), а также модуля комплексной проводимости в отсутствие компенсации (кривая 3) и при наличии аппаратной и программной компенсации (кривые 4 и 5 соответственно).

Для учёта влияния измерительной линии были использованы различные алгоритмы аппаратной и программной компенсации, позволяющие корректировать измеряемые величины в процессе эксперимента при помощи известных значений импеданса набора стандартных калибровочных нагрузок. При этом максимально возможная аппаратная компенсация ("нуль" прибора) составляет $|Y| \approx 10^{-3}$ (кривая 4 на рис. 1), в то время как применение оригинальной методики программной компенсации позволило увеличить чувствительность более чем на порядок до $|Y| \approx 10^{-4}$ (кривая 5 на рис. 1).

Далее во второй главе кратко рассматриваются различные методы измерения транспортных характеристик на постоянном токе, а также оригинальная автоматизированная система регистрации данных и обработки результатов эксперимента. Завершает обзор методических вопросов анализ погрешностей измерений исследованных физических величин на постоянном и переменном токе.

В третьей главе излагаются результаты исследований прыжковой проводимости на переменном токе в аморфном антимониде галлия (a-GaSb).

В первой части главы методом «Моттовской спектроскопии» [7] (измерения гальваномагнитных эффектов на постоянном токе) определены параметры локализованных состояний у a-GaSb - плотность состояний $g(E_F) = 4.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ эВ}^{-1}$ и радиус локализации $a = 46 \text{ \AA}$, которые хорошо согласуются с литературными данными [7].

Далее приводятся температурные и частотные зависимости динамической проводимости $\sigma(\omega, T)$ (см. рис. 2). Из данных рис. 2 следует, что в диапазоне частот $1 \div 500 \text{ МГц}$ и температур $4.2 \div 100 \text{ К}$ $\sigma(\omega, T)$ хорошо описывается асимптотической формулой (1), причём показатель степени s в области прыжковой проводимости изменяется от $s \approx 0.8$ ($T = 77 \text{ К}$) до $s \approx 0.76$ ($T = 4.2 \text{ К}$), а значение индекса α практически постоянно и составляет $\alpha \approx 0.3$.

Используя полученные значения $g(E_F)$ и a , можно сравнить экспериментальные данные $\sigma(\omega, T)$ (рис. 2) с результатами моделирования в рамках существующих теорий динамической прыжковой проводимости [1, 2]. На рис. 3 приведены расчётные температурные зависимости динамической проводимости в парном приближении в случае электронного туннелирования

$$\text{Re}(\sigma) = \frac{\pi^4}{24} a e^2 k_b T g(E_F)^2 \omega R_\omega^4, \text{ где } R_\omega = (a/2) \ln(v_{ph} / \omega) \quad (3)$$

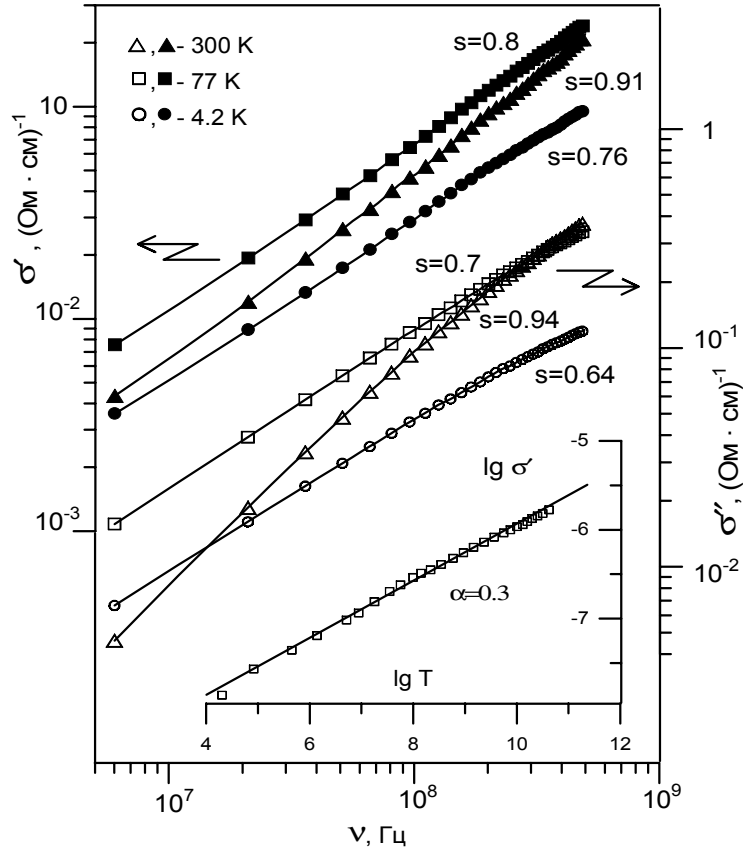


Рис. 2. Действительная и мнимая часть высокочастотной проводимости образца a-GaSb при различных температурах. На вставке показана температурная зависимость проводимости на частоте 100 МГц.

(формула Поллака-Джебалла, кривая 1) и в поляронной модели

$$\text{Re}(\sigma) = \frac{\pi^4}{12} e^2 (k_B T)^2 g(E_F)^2 \frac{\omega R_\omega^4}{2k_B T / a + W_{H0} r_0 / R_\omega^2} \quad (4)$$

(кривая 2) совместно с экспериментальными данными статической (кривая 4) и динамической (кривая 3) проводимости.

Количественный анализ полученных результатов $\sigma(\omega, T)$ показывает, что для моделей, основанных на парном приближении, имеет место тенденция к значительному (1÷2 порядка) завышению теоретических значений $\sigma(\omega, T)$ по сравнению с экспериментальными данными (см. рис. 3). Возможная причина расхождения статических и динамических характеристик заключается в том, что во всём частотном и температурном интервале длина прыжка на переменном токе (R_ω в формулах (3,4)) превышает оптимальную длину прыжка на постоянном токе $R_{opt} = (a/2)(T_0/T)^{1/4}$, и, следовательно, условие применимости парного приближения

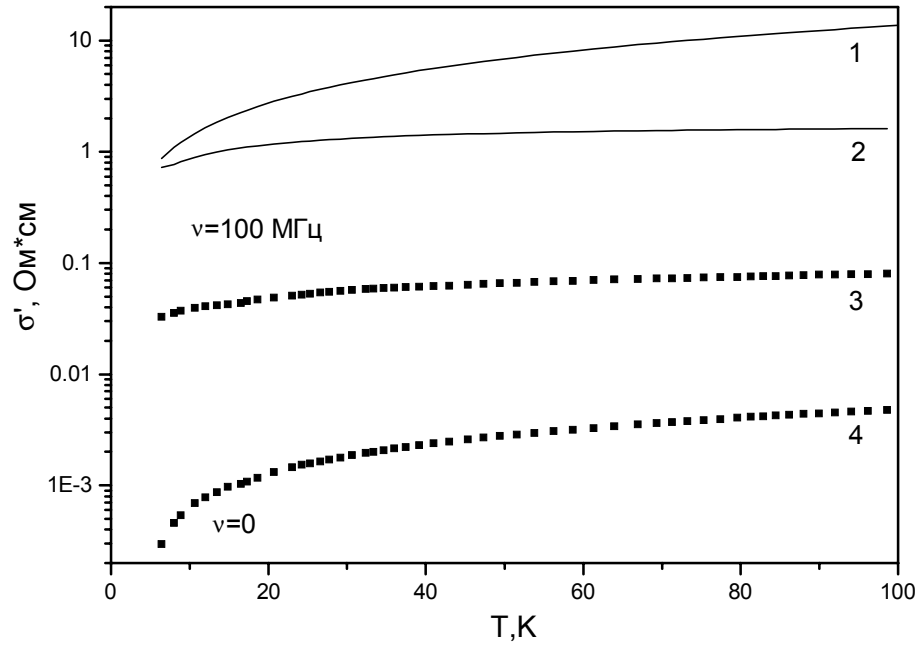


Рис. 3. Сравнение статической (кривая 4) и динамической (кривая 3) прыжковой проводимости с расчетом по формулам (3,4) (кривые 1 и 2 соответственно) для экспериментальных параметров локализованных состояний в a-GaSb.

нарушается. В этом случае более адекватным является использование модели многократных прыжков [2], однако и эта модель не даёт удовлетворительного количественного описания экспериментальных частотных и температурных зависимостей динамической проводимости $\sigma(\omega, T)$.

В завершение этой главы излагается альтернативный подход, основанный на рассмотрении неоптимальных прыжков [8] при сохранении описания $\sigma'(\omega, T)$ в парном (дипольном) приближении. Исходя из представлений об обрезании длины прыжка на переменном токе R_ω на расстоянии, равном длине когерентности фазы волновой функции L_T и обусловленном неупругим взаимодействием с фононами, в настоящей работе получена для $\sigma'(\omega, T)$ следующая оценка:

$$\sigma' = \frac{\pi}{18} \hbar e^2 D^* g(E_F)^2 a^3 \omega \left(\ln \frac{k_B T}{\hbar \omega} \right)^3, \quad (5)$$

где $D^* = L_T^2 k_B T / \hbar$ - эффективный коэффициент диффузии [8]. Показано, что использование формулы (5) позволяет не только качественно, но и количественно описать экспериментальные данные по частотным и температурным зависимостям динамической прыжковой проводимости a-GaSb.

Четвёртая глава посвящена комплексному исследованию низкотемпературных аномалий транспортных характеристик "Кондо-изоляторов" SmB_6 и FeSi на постоянном и переменном токе.

Обнаружено, что в соединении с промежуточной валентностью SmB_6 при гелиевых температурах наблюдается низкочастотная дисперсия проводимости в диапазоне частот $500 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$ (см. рис. 4). Для ответа на вопрос о механизмах токопереноса в гексабориде самария, ответственных за возникновение низкочастотной дисперсии $\sigma(\omega)$, были выполнены измерения на постоянном токе следующих величин: проводимости $\sigma(T)$, коэффициента Холла $R_H(T, H)$ и термоЭДС $S(T)$. Определены параметры носителей в области собственной проводимости ($T \geq 15 \text{ К}$). Показано, что диапазон температур $5 \leq T \leq 15 \text{ К}$ соответствует случаю проводимости по состояниям в запрещённой зоне, и получены оценки энергии активации и радиуса локализации этих состояний: $E_{\text{ex}} \approx 3.5 \text{ мэВ}$ и $a^* = \hbar / \sqrt{2m^* E_{\text{ex}}} \approx 6 \text{ \AA}$.

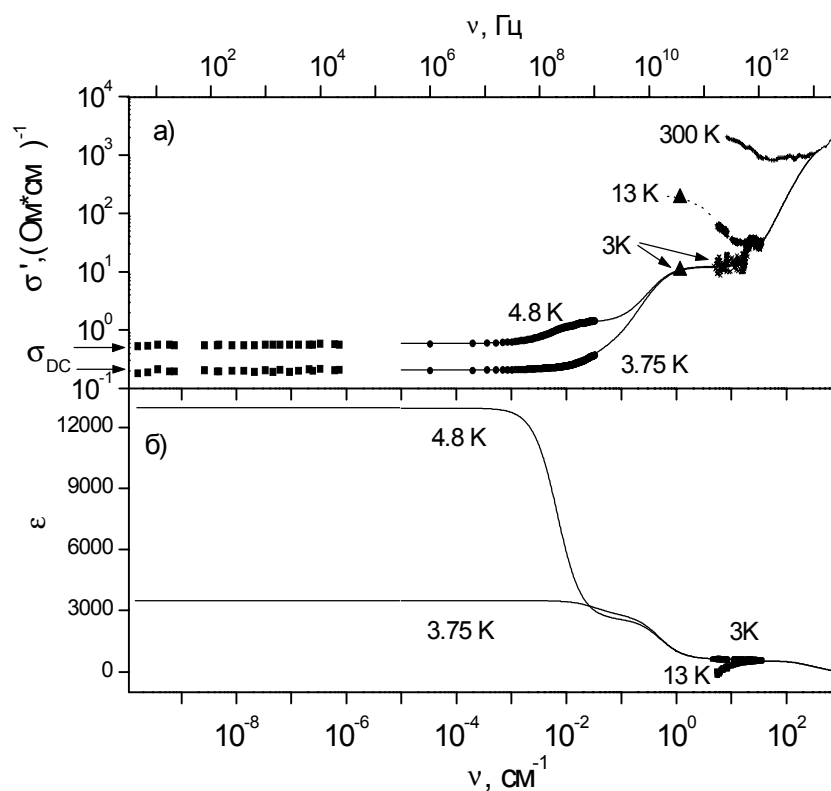


Рис. 4. Экспериментальные данные и модельный расчёт действительной части динамической проводимости $\sigma'(\omega)$ (а) и диэлектрической проницаемости $\epsilon'(\omega)$ (б) для SmB_6 (• - настоящая работа, остальные точки взяты из литературы, линии - моделирование с помощью набора гармонических осцилляторов).

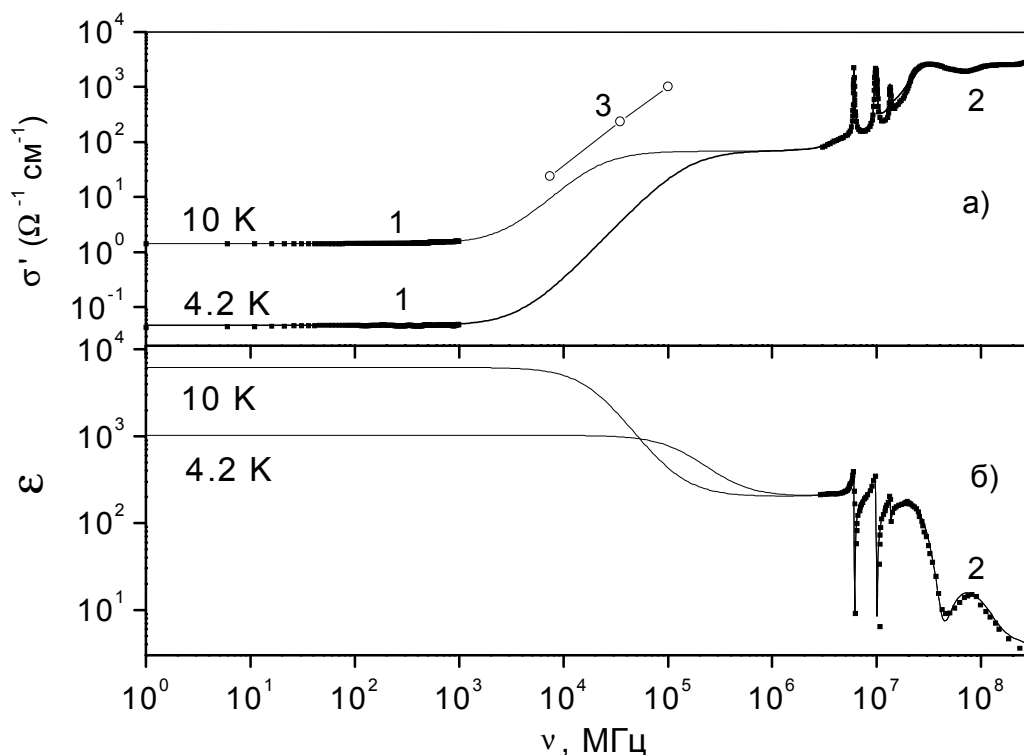


Рис. 5. Дисперсия проводимости и диэлектрической проницаемости FeSi: а) - экспериментальные частотные зависимости динамической проводимости (1) и литературные данные измерений в инфракрасном (2) и миллиметровом (3) диапазонах. Сплошные линии - моделирование с помощью набора гармонических осцилляторов. б) - ожидаемая дисперсия диэлектрической проницаемости, рассчитанная из данных $\sigma'(\omega, T)$.

Установлено, что в окрестности гелиевых температур $T \leq 5$ К имеет место аномальное поведение всех исследованных физических величин. Полученные результаты обсуждаются в рамках экситон-поляронной модели Кикоина-Мищенко [9] и модели Фаликова-Кимбалла [10]. Показано, что появление низкочастотной дисперсии $\sigma(\omega)$ отражает формирование у SmB₆ когерентного основного состояния при гелиевых температурах.

Во второй части главы излагаются результаты измерений транспортных характеристик FeSi. Найдено, что дисперсия динамического отклика в этом соединении практически отсутствует вплоть до частот ~ 1 ГГц (см. рис. 5). Также как и в случае SmB₆, для анализа механизмов проводимости FeSi привлечены результаты измерений гальваномагнитных характеристик на постоянном токе. Показано, что

низкотемпературные аномалии физических свойств FeSi могут быть интерпретированы в рамках модели Хаббарда, при этом в качестве носителей заряда в области низких температур, по-видимому, выступают магнитные поляроны, образованные в результате поляризации магнитных моментов на Fe-центрах, расположенных в ближайшем окружении носителя в верхней хаббардовской полосе. В этой модели ожидается возникновение сильной дисперсии проводимости в диапазоне частот $10 \div 1000$ ГГц, проявляющейся в виде дополнительной широкой полосы поглощения и высоких значений диэлектрической проницаемости при гелиевых температурах.

В пятой главе рассмотрены диэлектрические свойства и критическое поведение низкоразмерных магнетиков CuGeO_3 и $\alpha\text{-NaV}_2\text{O}_5$. В начале главы обсуждается поведение диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T, \omega)$ в диапазоне температур $4.2 \div 300$ К и частот 1 МГц \div 1 ГГц (при ориентации электрического поля вдоль оси **c** в случае $\alpha\text{-NaV}_2\text{O}_5$ и вдоль оси **a** для CuGeO_3). Найдено, что в обоих материалах во всём исследованном частотном и температурном диапазоне дисперсия практически отсутствует: $\epsilon(\omega, T = \text{const}) \approx \text{const}$. Установлено, что при $4.2 \leq T \leq 100$ К диэлектрическая проницаемость CuGeO_3 постоянна в пределах точности измерений, в то время как для $\alpha\text{-NaV}_2\text{O}_5$ кривые $\epsilon'(T, \omega = \text{const})$ демонстрируют при $T_c = 33.2$ К отчётливую аномалию λ -типа с амплитудой скачка около 0.5% на фоне практически не зависящей от температуры базовой линии.

Далее в этой главе излагается количественный анализ наблюдаемой у $\alpha\text{-NaV}_2\text{O}_5$ λ -аномалии на температурной зависимости $\epsilon(T)$ совместно с литературными данными: расходящейся части теплоёмкости $\delta c(T)$, магнитных потерь $\chi''(T)$ на частоте 36.2 ГГц и аномальной части скорости распространения ультразвука $\Delta V/V(T)$. Установлено, что для всех указанных параметров в окрестности перехода характерна либо логарифмическая расходимость физических величин вида $f(T) \sim \ln|(T - T_c)/T_c|$, или конечный скачок при $T = T_c$, определяемый функцией

$$f(T) = A_{1,2} + B_{1,2}/(|T - T_c|^{p_{1,2}} + C_{1,2}). \quad (6)$$

Показано, что критическое поведение различных физических величин демонстрирует заметные отклонения от предсказаний стандартной теории фазовых переходов II рода, включая сильную асимметрию критической области выше и ниже точки перехода, возникновение аномальных базовых линий, на фоне которых наблюдаются

особенности, и практически одинаковую форму температурных зависимостей различных параметров в критической области (см. табл. 1).

Таблица 1. Значения критических индексов в формуле (6) для α' - NaV_2O_5 .

Величина	$p_1 (T > T_c)$	$p_2 (T < T_c)$	T_c, K
ϵ	0.59 ± 0.04	1.14 ± 0.04	33.2
χ''	0.60 ± 0.02	1.09 ± 0.12	36.1
$\Delta V/V$	0.69 ± 0.03	1.19 ± 0.04	34.8
δc	1.84 ± 0.06	1.06 ± 0.09	33.6
	1.59 ± 0.05	1.08 ± 0.06	33.5

Шестая глава посвящена исследованиям прыжковой проводимости на постоянном и переменном токе в карбине кумуленового типа, синтезированном в условиях высокого давления.

В первой части главы излагаются результаты исследований гальваномагнитных характеристик на постоянном токе. Обнаружено, что температурные зависимости проводимости карбина при $T \leq 50 \text{ K}$ подчиняются закону Мотта (2), причём изменение температуры синтеза образцов под давлением 7.7 ГПа приводит к изменению индекса $n=1/(1+d)$ (d -размерность пространства) от $n=1/2$ при $T_{\text{syn}}=650^\circ\text{C}$ до $n=1/4$ при $T_{\text{syn}}=1000^\circ\text{C}$. Из данных транспортных измерений были определены параметры локализованных состояний, соответствующих случаям 2D и 3D прыжковой проводимости.

Далее приведены экспериментальные данные динамической проводимости. Найдено, что в прыжковой области динамическая проводимость карбина описывается асимптотикой (1), однако наблюдается сильная температурная зависимость индекса $s(T)$ (см. рис. 6), отсутствующая как в моделях, основанных на парном приближении, так и в модели многократных прыжков. Показано, что такое поведение $\sigma(\omega, T)$ можно интерпретировать в рамках модели Ханта для 1D динамической прыжковой проводимости [11]

$$\sigma' \approx f(T) \cdot \omega^{s(T)}, \quad s(T) \approx \frac{(AT_0/T)^{1/2} - 2}{(AT_0/T)^{1/2} + 2} \quad (7)$$

(кривая 4 на рис. 6), в то время как предсказания модели кулоновских корреляций для 2D проводимости (кривая 3) противоречат экспериментальным данным $\sigma(\omega, T)$.

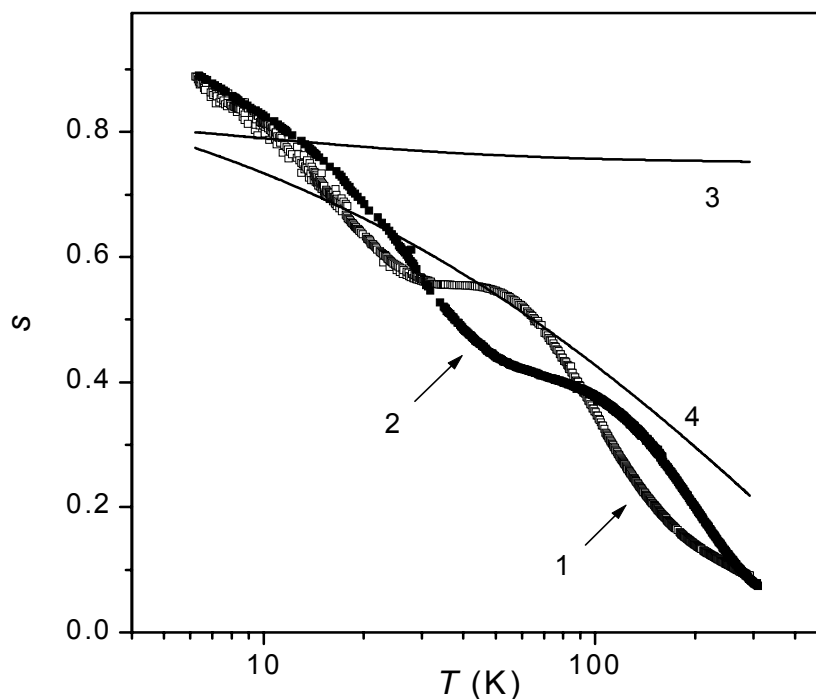


Рис. 6. Анализ температурной зависимости показателя степени s для образца карбина, полученного при $T_{syn}=690^{\circ}\text{C}$. 1-эксперимент (100 МГц), 2-эксперимент (500 МГц), 3-модель кулоновских корреляций для $d=2$, 4-модель Ханта (7) для $d=1$.

Полученные результаты свидетельствуют, что изменение показателя степени прыжковой проводимости n в карбинах, синтезируемых в условиях высокого давления, обусловлено изменением эффективной размерности системы, причём значение $n=1/2$ отвечает 1D прыжковой проводимости и не связано с образованием кулоновской щели в плотности состояний. Увеличение температуры синтеза, сопровождающееся ростом концентрации sp^2 связей в матрице карбина, индуцирует 1D→3D кроссовер, а в переходной области $700 < T_{syn} < 800^{\circ}\text{C}$ прыжковая проводимость двумерна.

III. ВЫВОДЫ

Основные результаты, полученные в настоящей работе, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Создана методика исследования комплексной проводимости и диэлектрической проницаемости образцов для диапазона частот 1 МГц÷1 ГГц, позволяющая проводить измерения в интервале температур 1.8÷300 К в

магнитном поле до 7 Тл. Аппаратная и программная компенсация вклада измерительной линии позволили определять активную и реактивную составляющую импеданса в диапазоне $5 \cdot 10^{-2} \div 10^5$ Ом с максимальной относительной точностью до 10^{-4} .

2. Впервые исследована проводимость на переменном токе и определены частотные и температурные зависимости $\sigma(\omega, T)$ в объёмных образцах аморфного антимонида галлия. Количественный анализ транспортных характеристик позволил установить, что прыжковая проводимость в области частот $1 \div 500$ МГц не может быть описана в рамках парного (дипольного) приближения или в модели многократных прыжков. Причина такого расхождения заключается в уменьшении характерной длины прыжка по сравнению с теоретическим значением, по-видимому, обусловленным влиянием длины когерентности фазы волновой функции локализованного состояния.
3. Исследован динамический отклик "Кондо-изоляторов" SmB_6 и FeSi . В соединении с промежуточной валентностью SmB_6 при гелиевых температурах обнаружена низкочастотная дисперсия проводимости в диапазоне частот $500 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$, которую можно связать с формированием когерентного основного состояния при $T \leq 5 \text{ К}$.

В случае FeSi найдено, что дисперсия динамического отклика отсутствует вплоть до частот $\sim 1 \text{ ГГц}$ и предсказано возникновение сильной дисперсии в миллиметровой и субмиллиметровой области спектра, по видимому, обусловленной полосой поглощения магнитных поляронов.

4. Установлено, что в низкоразмерном магнетике $\alpha'\text{-NaV}_2\text{O}_5$ в окрестности фазового перехода $T=33.2 \text{ К}$ имеет место λ -аномалия диэлектрической проницаемости. Показано, что критическое поведение ϵ и других физических величин в этом соединении носит универсальный характер, отличающийся от предсказываемого стандартной теорией фазовых переходов II рода.
5. Исходя из данных по статической и динамической проводимости карбинов, синтезированных в условиях высокого давления, установлено, что условия синтеза под давлением позволяют менять эффективную размерность системы от одномерной до трёхмерной. Показано, что для одномерной прыжковой проводимости показатель экспоненты n в законе Мотта равен $1/2$, причём это значение не связано с образованием кулоновской щели в плотности

локализованных состояний. Впервые получено экспериментальное подтверждение модели Ханта для одномерной прыжковой проводимости на переменном токе.

Список публикаций по теме диссертации

1. С.В. Демишев, А.А. Пронин, Н.Е. Случанко, Н.А. Самарин, А.Г. Ляпин. Возникновение режима неоптимальных прыжков для проводимости на переменном токе в аморфном антимониде галлия. Письма в ЖЭТФ, т.65, №.4, с.322-327 (1997).
2. С.В. Демишев, М.В. Кондрин, А.А. Пронин, Н.Е. Случанко, Н.А. Самарин, А.Г. Ляпин, Дж. Бискупски. ТермоЭДС в области прыжковой проводимости: переход от формулы Мотта к формуле Звягина. Письма в ЖЭТФ, т.68, №.11, с.806-811 (1998).
3. Н.Е. Случанко, В.В. Глушков, С.В. Демишев, М.В. Кондрин, К.М. Петухов, А.А. Пронин, Н.А. Самарин, И. Брунсерраде, В.В. Мошчалков, А.А. Меновски. Низкотемпературные аномалии коэффициента Холла FeSi. Письма в ЖЭТФ, т.68, №10, с.774-778 (1998).
4. С.В. Демишев, А.А. Пронин, Н.Е. Случанко, Н.А. Самарин, А.Г. Ляпин, В.В. Бражкин, Т.Д. Варфоломеева, С.В. Попова. 1D-3D кроссовер в прыжковой проводимости карбинов. Письма в ЖЭТФ, т.72, №7, с.547-552 (2000).
5. Н.Е. Случанко, А.А. Волков, В.В. Глушков, Б.П. Горшунов, С.В. Демишев, М.В. Кондрин, А.А. Пронин, Н.А. Самарин. Природа низкотемпературных аномалий физических свойств соединения SmB₆ с промежуточной валентностью. ЖЭТФ, т.115, №3, с.970-978 (1999).
6. N.E. Sluchanko, V.V. Glushkov, B.P. Gorshunov, S.V. Demishev, M.V. Kondrin, A.A. Pronin, A.A. Volkov. Intragap states in SmB₆. Phys. Rev. B, v.61 (15), pp.9906-9909 (2000).
7. N.E. Sluchanko, V.V. Glushkov, B.P. Gorshunov, S.V. Demishev, M.V. Kondrin, A.A. Pronin, A.A. Volkov, Y. Bruynseraede, V.V. Moshchalkov, S. Kunii. The origin of fast valence fluctuations in SmB₆. Physica B v.284-288, pp.1355-1356 (2000).
8. V.V. Glushkov, N.E. Sluchanko, S.V. Demishev, M.V. Kondrin, A.A. Pronin, K.M. Petukhov, Y. Bruynseraede, V.V. Moshchalkov, A.A. Menovsky, Low-temperature transport anomalies in FeSi. Physica B v.284-288, pp.1179-1180 (2000).

9. S.V. Demishev, A.A. Pronin, M.V. Kondrin, N.E. Sluchanko, N.A. Samarin, T.V. Ischenko, G. Biskupski, I.P. Zvyagin. DC and AC Hopping Transport in Bulk Amorphous Gallium Antimonide. *Phys. Stat. Sol. (b)* v.218, pp.67-70 (2000).
10. A.G. Lyapin, V.V. Brazhkin, S.G. Lyapin, S.V. Popova, T.D. Varfolomeeva, R.A. Voloshin, A.A. Pronin, N.E. Sluchanko, A.G. Gavriilyuk, I.A. Trojan. Non-Traditional Carbon Semiconductors Prepared from Fullerite C₆₀ and Carbyne under High Pressure. *Phys. Stat. Sol. (b)*, v.211, pp.401-412 (1999).
11. С.В. Демишев, А.А. Пронин, Н.Е. Случанко, Н.А. Самарин, А.Н. Васильев, М. Исобэ, И. Уеда. Аномальное критическое поведение NaV₂O₅. *ФТТ*, т.43, №2, с.307-311 (2001).
12. М.В. Кондрин, А.А. Пронин, Н.Е. Случанко, Н.А. Самарин, С.В. Демишев. Прыжковая проводимость в аморфном антимониде галлия при низких температурах. Тезисы докладов XXXI совещания по физике низких температур, 2-3 декабря 1998 г. Москва, изд-во МГУ, с.46-47.
13. А.А. Пронин, А.А. Волков, В.В. Глушков, Б.П. Горшунов, С.В. Демишев, М.В. Кондрин, Н.А. Самарин, Н.Е. Случанко, И. Брунсерраде, В.В. Мошталков, С. Кунии. Природа низкотемпературных аномалий физических свойств соединения с промежуточной валентностью SmB₆. Тезисы докладов XXXI совещания по физике низких температур, 2-3 декабря 1998 г. Москва, изд-во МГУ, с.38-39.
14. В.В. Глушков, Н.Е. Случанко, М.В. Кондрин, А.А. Пронин. Природа быстрых валентных флуктуаций в узкозонном полупроводнике SmB₆. Международная зимняя школа по физике полупроводников, научные сообщения молодых учёных. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург – Зеленогорск, 25-28 февраля 2000 г., тезисы докладов, с.6-7.
15. Н.Е. Случанко, В.В. Глушков, С.В. Демишев, М.В. Кондрин, А.А. Пронин, С. Кунии. Анизотропия проводимости и многочастичные эффекты в SmB₆ при низких температурах. Тезисы докладов XXXII всероссийского совещания по физике низких температур. Казань, 3-6 октября 2000 г., с.31-32.

Цитированная литература

1. Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах, т. 1. М.: Мир, 1981, 368с.
2. И.П. Звягин. Кинетические явления в неупорядоченных полупроводниках. М.: Изд-во МГУ, 1984.
3. Б.А. Струков, А.П. Леванюк. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М.: Наука, 1983, 239 с.
4. А.А. Волков, Ю.Г. Гончаров, Г.В. Козлов, С.П. Лебедев. Диэлектрические измерения и свойства твёрдых тел на частотах 10^{11} - 10^{12} Гц. Труды ИОФАН, т.25, с.3-51 (1990).
5. M. Hase, I. Terasaki, K. Uchinokura. Observation of the Spin-Peierls Transition in Linear Cu^{+2} (Spin-1/2) Chains in an Inorganic Compound CuGeO_3 . Phys. Rev. Lett., v.70, №23, p.3651 (1993).
6. Е.А. Туров. Материальные уравнения электродинамики. М.: Наука, 1983, 157 с.
7. С.В. Демишев, Д.Г. Лунц, А.Г. Ляпин, Н.Е. Случанко, Н.А. Самарин. Моттовская спектроскопия локализованных состояний в аморфном антимониде галлия. ЖЭТФ, т.110, с.334-341 (1996).
8. I.P. Zvyagin. The Temperature Dependence of the Conductivity near the Localization Threshold. Phys.Stat.Sol. (b) v.120, p.503-509 (1983).
9. К.А. Kikoin, А.С. Mishchenko. Magnetic excitations in intermediate-valence semiconductors with a singlet ground state. J. Phys. Cond. Mat., v.7, №2, p.307 (1995).
10. T. Portengen, Th. Ostreich, and L.J. Sham. Theory of electronic ferroelectricity. Phys. Rev. B, v.54, pp.17452-17463 (1996).
11. A. Hunt. A general treatment of 1-dimensional hopping conduction. Solid State Commun. v.86, №12, pp.765-768 (1993).