

РЕЦЕНЗИЯ
НА НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Аспирант _____ **Чжан Сюньпэн** _____
фамилия, имя, отчество

Направление подготовки (направленность) _____
03.06.01 Физика и астрономия

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Подпись аспиранта

Чжан Сюньпэн

ФИО аспиранта

Экспериментальное исследование и количественный анализ коэффициента
Нернста в легированных высокотемпературных сверхпроводниках системы
YBaCuO

наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)

03.06.01 Физика и астрономия

отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)

03.06.01 05 Физика конденсированного состояния

наименование направленности (шифр и наименование направления)

Академическая степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф., проф. Гасумянц Виталий Эдуардович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

Научный доклад выполнен в Высшей инженерно-физической школе Института Электроники и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф., проф. Гасумянц Виталий Эдуардович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

Рецензент: д.ф.-м.н., доц., проф. Романов Владимир Викторович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) можно рассматривать как обширную экспериментальную и теоретическую тему, которая широко изучалась с момента первого открытия в 1987 году. Большинство исследований в этой области направлено на выяснение механизма спаривания электронов, который обеспечивает реализацию явления сверхпроводимости. И мы все еще многое не знаем об этом.

Целью данной работы является получение новой информации об энергетическом спектре [1-4] системы $YBaCuO$ путем использования узкой зоной модели для анализа температурных зависимостей коэффициента Нернста полученных для двух серий легированных различными примесями образцов. Мы вводим явления переноса электронов, модель узкой зоны модель и эффект Нернста. Затем объясняем экспериментальную методику и детали эксперимента. После этого мы приводим экспериментальные результаты по температурным зависимостям коэффициента Нернста во всех исследованных образцах. Кроме того, представлены результаты количественного анализа экспериментальных данных в рамках модели узкой зоны. На основе этого анализа определены значения подвижности носителей заряда и асимметрии закона дисперсии и обсуждены их изменения с увеличением содержания легирующих примесей.

В этой работе мы представили результаты экспериментальных исследований и совместного анализа температурных зависимостей коэффициентов термоэдс и Нернста в ВТСП-материалах с двойным замещением на основе $YBaCuO - Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$, где $x = 0.05, 0.10, 0.125, 0.15, 0.175, 0.20$, $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$, где $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$.

Цель и задачи исследования

- Получить экспериментально температурные зависимости коэффициента Нернста для систем $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$ в диапазоне температур от 77К до 300К для каждого образцов с различным содержанием легирующего элемента.
- Провести качественный анализ поведения коэффициента Нернста в исследованных образцах, а также количественный анализ полученных температурных зависимостей совместно с данными для температурных зависимостей коэффициента термоэдс.
- Определить значения параметров энергетического спектра и системы носителей заряда для всех экспериментально исследованных образцов.
- делать выводы о влиянии типа и количества легирующего элемента на сверхпроводимость и параметры нормального состояния.

Научная новизна

1. Впервые получены экспериментальные данные об особенностях поведения коэффициента Нернста в нормальном состоянии для ВТСП-систем $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$.
2. Предложен метод определения параметров энергетического спектра для ВТСП в нормальном состоянии.

3. Определены значения подвижности носителей заряда и степени асимметрии закона дисперсии во всех исследованных образцах, проанализирован характер влияния исследованных примесей на эти значения.

Теоретическая и практическая значимость

- Продемонстрирована возможность использования разработанных модельных представлений о структуре энергетического спектра для получения информации о параметрах системы носителей заряда в образцах ВТСП-материалов различного состава с помощью анализа экспериментальных данных на основе модели узкой зоны.
- Выявлены особенности и механизмы влияния исследованных легирующих примесей для параметры нормального состояния [4] в ВТСП системы YBaCuO.

Апробация работы

Результаты работы рассказывались на семинарах высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в 2018–2022 гг. и были представлены в виде устного доклада на международной конференции «2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics».

Публикации

Опубликована одна статья в журнале, входящем в базу данных Scopus, еще одна статья принята к публикации в журнале Superconductors Science and Technology (входит в 1 квартиль базы Scopus).

Представление научного доклада: основные положения

- Результаты экспериментальных исследований коэффициента Нернста для двух серий легированных образцов.
- Анализ полученных экспериментальных данных в рамках модели узкой зоны совместно с результатами, полученными для коэффициента термоэдс.
- Значения параметров проводящей зоны и системы носителей заряда для образцов с различным уровнем и типом легирования.
- Выводы о характере влияния исследованных замещений на энергетический спектр и сверхпроводимость в исследованных соединениях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность темы диссертации, показано, что цель экспериментальных исследований является значимой в области физики высокотемпературных сверхпроводников. Подтверждена уникальность модели узкой зоны с точки зрения возможности объяснения экспериментальных данных по электронным явлениям переноса в ВТСП-материалах в нормальном состоянии.

В первой главе

Вообще говоря, существует большое количество аспектов ВТСП, которые необходимо изучить. И, по нашему мнению, транспортные свойства ВТСП представляют большой интерес для изучения. Как мы знаем, транспортные свойства ВТСП в нормальном состоянии имеют очень необычное поведение по сравнению с другими обычными материалами. Эти особенности дали нам прямое представление о его уникальном энергетическом спектре. Даже не было никаких очевидных доказательств прямой связи между системой носителей заряда в нормальном состоянии и механизмом электронного спаривания в состоянии сверхпроводимости ВТСП. Мы все еще могли бы с уверенностью сказать, что теория, которая будет разработана для объяснения ВТСП, также должна демонстрировать некоторые характеристики, которые имеют отношение к параметрам нормального состояния. Таким образом, изучение явлений переноса в нормальном состоянии в ВТСП имеет свою потенциальную ценность. С одной стороны, изучение системы носителей заряда и энергетического спектра образцов с различными параметрами могло бы помочь нам лучше понять собственные характеристики ВТСП в нормальном состоянии. С другой стороны, эти параметры ВТСП могли бы косвенно помочь нам проверить теоретические модели, которые будут разработаны для объяснения природы ВТСП. С этой точки зрения, необходимо провести серию исследований фундаментальных параметров, таких как абсолютные концентрации носителей заряда, подвижность и эффективная масса. Тем не менее, в существующих исследованиях ВТСП нет большого количества результатов, посвященных этой теме. Проблемы существующих исследований, связанных с этой темой, можно резюмировать следующим образом: им не хватает полной системы, которая должна включать не только экспериментальные результаты для каждого вида коэффициента переноса для различных ВТСП, но и универсальную теоретическую модель, соответствующую объяснению экспериментальных результатов. Таким образом, с нашей точки зрения, построение такой полной системы для систематического анализа вариационного коэффициента переноса с различными типами легирования является критическим. Следовательно, возможности и определение теоретической модели должны быть даны и подкреплены большим количеством экспериментальных результатов, другими словами, теоретический анализ должен выдавать ограниченное число физически значимых параметров в физике и позволять описать поведение всех основных коэффициентов переноса в ВТСП.

В качестве первого шага наших исследований была введена узкая зонная модель [5], мы феноменологически предположили, что для ВТСП в нормальном состоянии уровень Ферми находится в центре узкого пика, который устанавливается на фоне широко зонного энергетического спектра, ширина этого “пика” достаточно узка, что может быть полностью покрытым размазыванием Ферми с повышением температуры T . Мы также ограничили количество параметров модели, сохранив только разумные параметры для физики, например, ширину зоны, мобильность и т.д.

По общему признанию, наши предварительные исследования температурных зависимостей коэффициента термоэдс $S(T)$ показали большой успех применения этой гипотезы. Основная идея гипотезы может быть подтверждена экспериментальными результатами [4, 6, 7]. Самым захватывающим моментом было то, что модель по-прежнему основывалась на современной физике твердого тела и могла быть использована для описания поведения коэффициента термоэдс в образцах ВТСП различных систем и различного состава. В последующем исследовании [8] мы расширили возможности модели узкой зоны, чтобы ее можно было бы применить для анализа результатов по температурным зависимостям коэффициента Нернста, что дало возможность определить еще два параметра (значения подвижности носителей заряда, а также те же параметр, характеризующий структуру энергетического спектра) были введены [9, 10]. Из-за малого абсолютного значения сигнала Нернста [9, 10] получение зависящего от температуры коэффициента Нернста ВТСП в диапазоне температур выше критической является большой проблемой, поэтому этой теме посвящено не так много работ. Подводя итог, можно сказать, что требуется усовершенствованная модель узкой зоны, которая должна быть способна описывать не только температурные зависимости коэффициента термоэдс, но и зависящий от температуры коэффициент Нернста.

Вторая глава. Модель узкой зоны и метод анализа экспериментальных результатов

Вообще говоря, основная цель применения модели узкой зоны состоит в том, чтобы представить оценочное аналитическое выражение, которое соответствует экспериментальной зависимости коэффициента Нернста от температуры. В модели узкой зоны мы предположили, что детали строения зоны являются несущественными и можно использовать аппроксимацию функций плотности состояний, дифференциальной и холловской проводимости прямоугольниками, которые достаточно узки по сравнению с размытием Ферми. Таким образом, размытие Ферми [5, 8, 10] могло бы охватить всю зону или, по крайней мере, большинство возможных для нахождения электронов состояний. Химический потенциал при этом находится в диапазоне энергий вблизи середины проводящей зоны.

В модели узкой зоны количество параметров в выражении для описания температурных зависимостей коэффициента термоэдс было сокращено до трех независимых параметров: общая эффективная зона пропускания Wd , эффективная зона пропускания проводимости $W\sigma$, степень заполнения зоны электронами F . Обратим внимание, что здесь мы имеем $W\sigma < Wd$, что можно отнести к причине локализованных электронов, другими словами, явление локализации Андерсона происходит вблизи краев зоны. Степень заполнения зоны F является показателем расположения химического потенциала в диапазоне энергий зоны, это отношение электронной концентрации n к общему количеству состояний в зоне N . Если $F < 1/2$, у нас есть химический потенциал ниже середины зоны, $F = 0$, у нас есть химический потенциал в середине зоны, $F > 1/2$, у нас есть химический потенциал в верхней зоне [5].

На самом деле, в большинстве случаев мы не встречали идеальной симметричной проводящей зоны, чтобы учесть этот фактор, мы ввели степень асимметрии плотности состояний b . Это можно легко рассматривать как небольшое смещение от центра зоны проводимости на расстоянии $b Wd$.

Тогда температурные зависимости коэффициента термоэдс могут быть непосредственно описаны соответствующим образом:

$$S = -\frac{k_B}{e} \left\{ \frac{(C/T^*)}{sh(C/T^*)} \left[e^{-\mu^*} + e^{-\mu^*} ch\left(\frac{C}{T^*}\right) - \frac{T^*}{C} (ch(\mu^*) + ch(C/T^*)) \times \ln\left(\frac{e^{\mu^*} + e^{C/T^*}}{e^{\mu^*} + e^{-C/T^*}}\right) \right] - \mu^* \right\} \quad (1)$$

Это выражение может дать соответствующие аналитические результаты для расчет температурно-зависимого коэффициента термоэдс в рамках модели узкой зоны.

К настоящему времени мы получили четыре различных параметра модели, имеющие ясный физический смысл: общую эффективную ширину проводящей зоны Wd , эффективную ширину интервала проводящих состояний $W\sigma$, степень заполнения зоны электронами F и степень асимметрии зоны b [5]. Чтобы извлечь более подробную информацию о характеристиках носителей заряда в ВТСП, необходимо провести дальнейшие эффекта Нернста и провести их анализ совместно с данными для коэффициента термоэдс, полученными для образцов тех же составов.

Как мы знаем, в классическом случае эффект Нернста возникает из-за разницы в степени между дрейфующим потоком и термодиффузией в образце, к которому прикладывается температурный градиент и поперечное магнитное поле. Эти два потока отклоняются в противоположных направлениях, и сила отклонения связана

со временем релаксации τ . Сигнал Нернста можно рассматривать как среднюю энергию носителей заряда, различную между дрейфовым потоком и термодиффузией, где время релаксации зависит от энергии. Таким образом, эффект Нернста мог бы дать возможность получить информацию о механизме отклонений носителей заряда [8].

Аналитическая формула для расчета температурных зависимостей коэффициента Нернста в рамках модели узкой зоны может быть представлен следующим образом:

$$Q = -\frac{1}{eT} \mu \left(-\frac{I_{\sigma_{H_0}} I_{\sigma_1}}{I_{\sigma_0}^2} + \frac{I_{\sigma_{H_1}}}{I_{\sigma_0}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

где

$$I_{\sigma_0} = \int_{-\frac{W_{\sigma} + bW_D}{2}}^{\frac{W_{\sigma} + bW_D}{2}} \sigma(\varepsilon) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon;$$

$$I_{\sigma_1} = \int_{-\frac{W_{\sigma} + bW_D}{2}}^{\frac{W_{\sigma} + bW_D}{2}} \sigma(\varepsilon) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \varepsilon d\varepsilon;$$

$$I_{\sigma_{H_0}} = \int_{-\frac{W_H + kW_D}{2}}^{\frac{W_H + kW_D}{2}} \sigma_H(\varepsilon) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon;$$

$$I_{\sigma_{H_1}} = \int_{-\frac{W_H + kW_D}{2}}^{\frac{W_H + kW_D}{2}} \sigma_H(\varepsilon) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \varepsilon d\varepsilon;$$

$$\mu = k_B T \frac{\sinh(FW_D/2k_B T)}{\sinh((1-F)W_D/2k_B T)} - bW_D/k_B T$$

Это выведенные результаты из уравнения Больцмана в приближении времени релаксации, полученные при использовании прямоугольной аппроксимации для функций плотности состояний, дифференциальной и холловской проводимости. В таком случае возникает еще два модельных параметра – τ и k [8]. Первый из них – это усредненная по всей зоне подвижность носителей заряда, а второй характеризует асимметрию закона дисперсии и вводится в модель как смещение точки смены знака функции холловской проводимости. Остальные параметры, входящие в выражение для коэффициента Нернста – те же, что и в выражении для коэффициента термоэдс. Следовательно, при анализе зависимостей $Q(T)$ можно использовать их значения, предварительно найденные из анализа зависимостей $S(T)$. Таким образом, совместный анализ температурных зависимостей коэффициентов термоэдс и эффекта Нернста позволяет получить значения всех шести модельных параметров, т.е. существенно расширить информацию о параметрах нормального состояния, которую можно получить из анализа экспериментальных данных по электронным явлениям переноса.

Третья глава. Результаты эксперимента, их обсуждение и анализ параметров диапазона для серии образцов состава $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

Мы измерили зависящий от температуры коэффициент Нернста $Q(T)$ для всех образцов, которые мы планировали изучить. При комнатной температуре $Q(T)$ представлены рядом очень малых значений (не превышающих $1 \text{ нВ}(\text{К}\cdot\text{T})$). Особенность поведения коэффициента Нернста при комнатной температуре, изменяющегося в зависимости от степени легирования кальцием x , $Q_{T=300\text{K}}(x)$, показала результат, противоречащий случаю результатов для коэффициента термоэдс $S_{T=300\text{K}}(x)$, который монотонно уменьшается с x , см. рис. 1. Зависимость $Q_{T=300\text{K}}(x)$ имеет v-образную форму, демонстрируя минимум при $x = 0,125$ и два крутых спада значений $Q_{T=300\text{K}}$ с x по обе стороны от точки минимума.

Все экспериментальная зависимость $Q(T)$ для всех изученных образцов представлена на рис. 2, за исключением образца с $x = 0,05$ (см. рис. 3), который мы не будем рассматривать как допустимый результат для обсуждения. Очень очевидно, что зависящие от температуры экспериментальные результаты коэффициента Нернста для системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ ($x = 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2$) показывают идентичную тенденцию, которую можно разделить на три части по температуре: 1. Из диапазона низких температур $Q(T)$ быстро увеличивается от нижнего предела температуры, 2. В среднем температурном диапазоне достигается пиковое значение Q_{Max} , 3. Широкая гладкая платформа в диапазоне высоких температур для $Q(T)$. Эти экспериментальные результаты хорошо согласуются с типичным поведением коэффициента Нернста в ВТСП- материалах иттриевого семейства других составов.

Как мы упоминали ранее, была замечена специфическая особенность $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O$, содержание кальция обладает способностью восстанавливать сверхпроводимость, а цинк разрушает сверхпроводимость, эти два вида легирования оказывают противоположное влияние на сверхпроводимость. Таким образом, для результата образца $x = 0,05$ возможный механизм разрушения может быть объяснен сильным эффектом легирования цинком при низком уровне кальция.

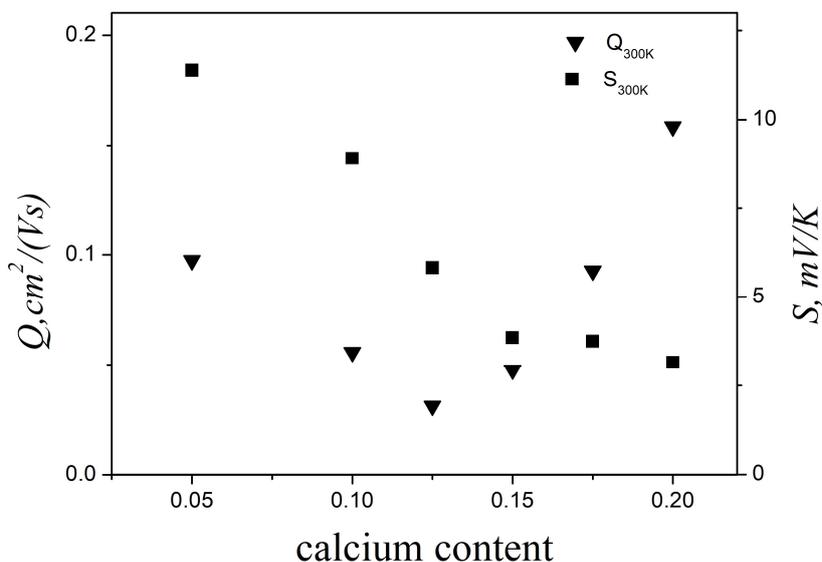


Рис. 1. Коэффициенты Нернста и термоэдс при комнатной температуре изменяются в зависимости от степени легирования кальцием x в образцах системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

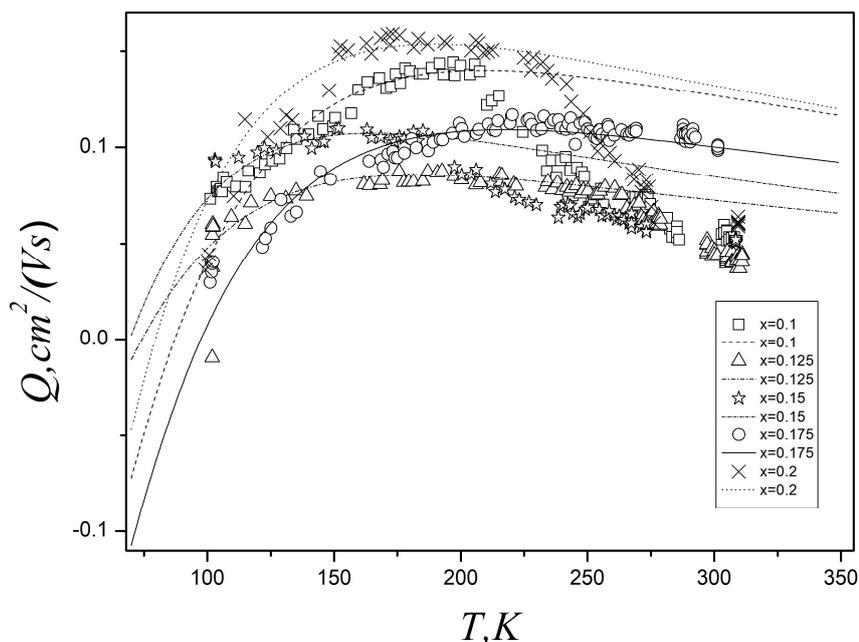


Рис. 2. Результаты измерения температурно-зависимого коэффициента Нернста для всех измеренных образцов системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$.

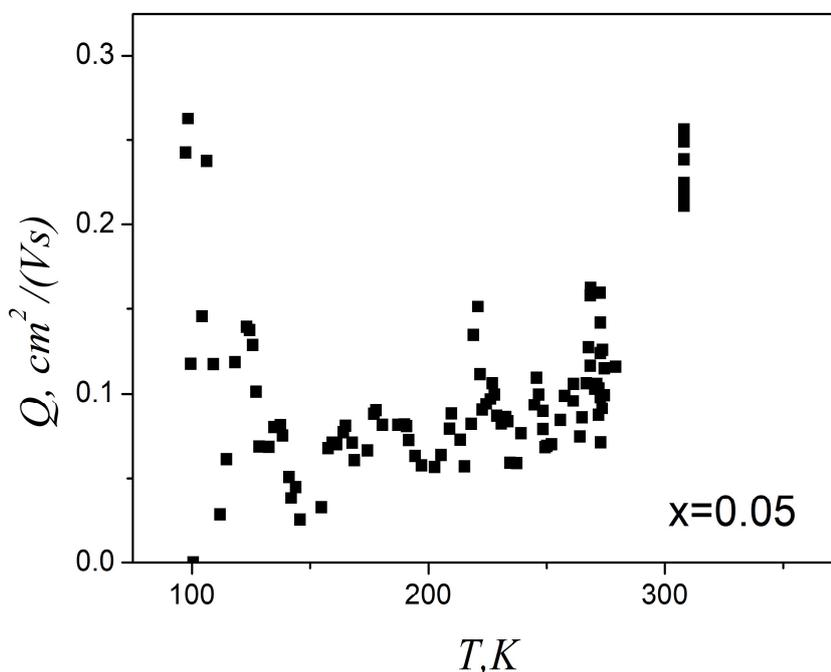


Рис. 3. Результаты измерения температурно-зависимого коэффициента Нернста для образца системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ с $x = 0,05$.

Совместный анализ температурных зависимостей коэффициентов термоэдс и Нернста делает возможным определение количественных характеристик проводящей зоны и системы носителей заряда, как это указывалось выше

Особенности влияния легирования цинком и кальцием в системе $YBaCuO$ впервые появились при исследовании зависимостей $S(T)$. Таким образом, в нашем случае очень необходимо ввести более подробную информацию о зависящем от

температуры коэффициенте термоэдс $S(T)$ для исследованной системы. Из рис. 4 ясно видно, что для всех образцов системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ температурные зависимости коэффициента термоэдс имеют очевидную тенденцию: значение T_c монотонно повышается с увеличением x , что демонстрирует восстановление сверхпроводимости с увеличением x , другими словами, содержание кальция приводит к существенному улучшению сверхпроводящих свойств исследованного соединения. Другой рисунок, рис. 5, дал нам более четкую тенденцию изменения значения $S_{T=300K}(x)$. Это значение продемонстрировало плавную кривую, постепенно уменьшающуюся с увеличением x . Полученные из анализа представленных зависимостей $S(T)$ данные по четырем параметрам модели узкой зоны представлены в таблице 1. Если мы определим зависимости $F(x)$, $WD(x)$, $b(x)$ и $C(x)$ соответственно (см. рис. 6), то тенденции в изменении модельных параметров под влиянием легирования кальцием может быть четко видны для F , WD и b , в то время как значение параметра C изменяется с ростом x несистематически.

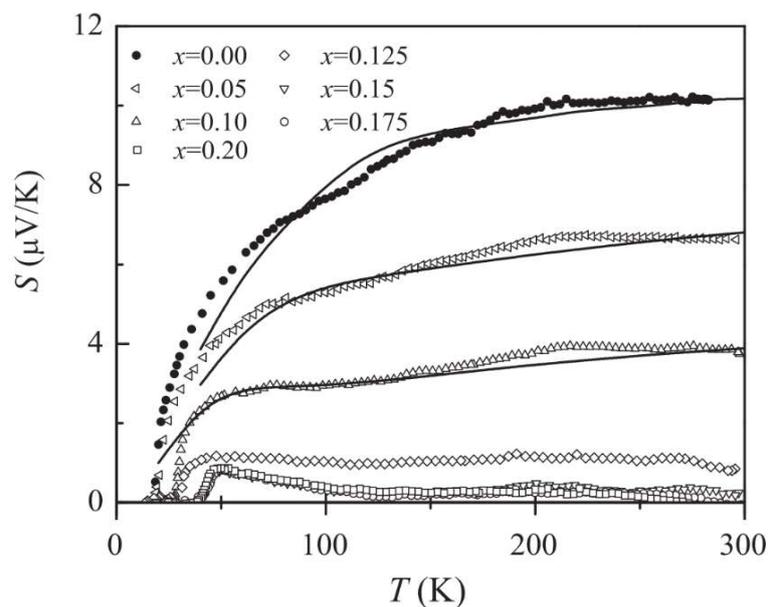


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента термоэдс для системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

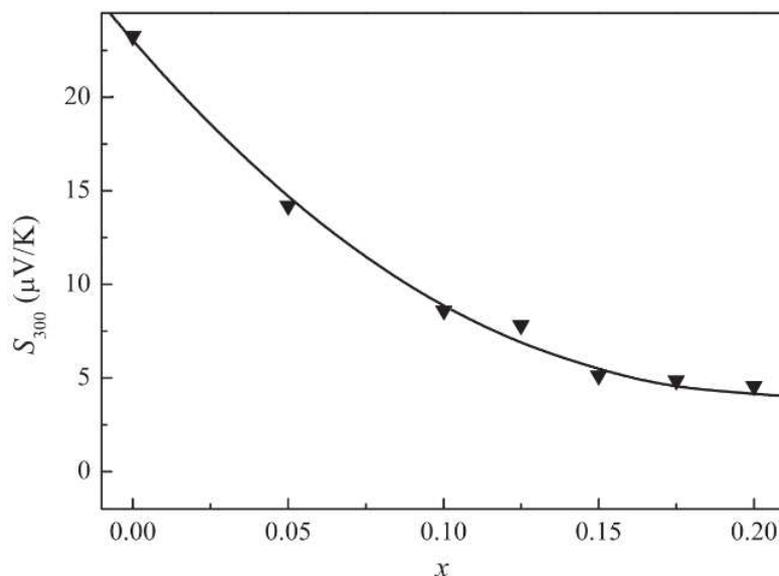


Рис. 5. Значение коэффициента термоэдс при $T=300K$ для системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

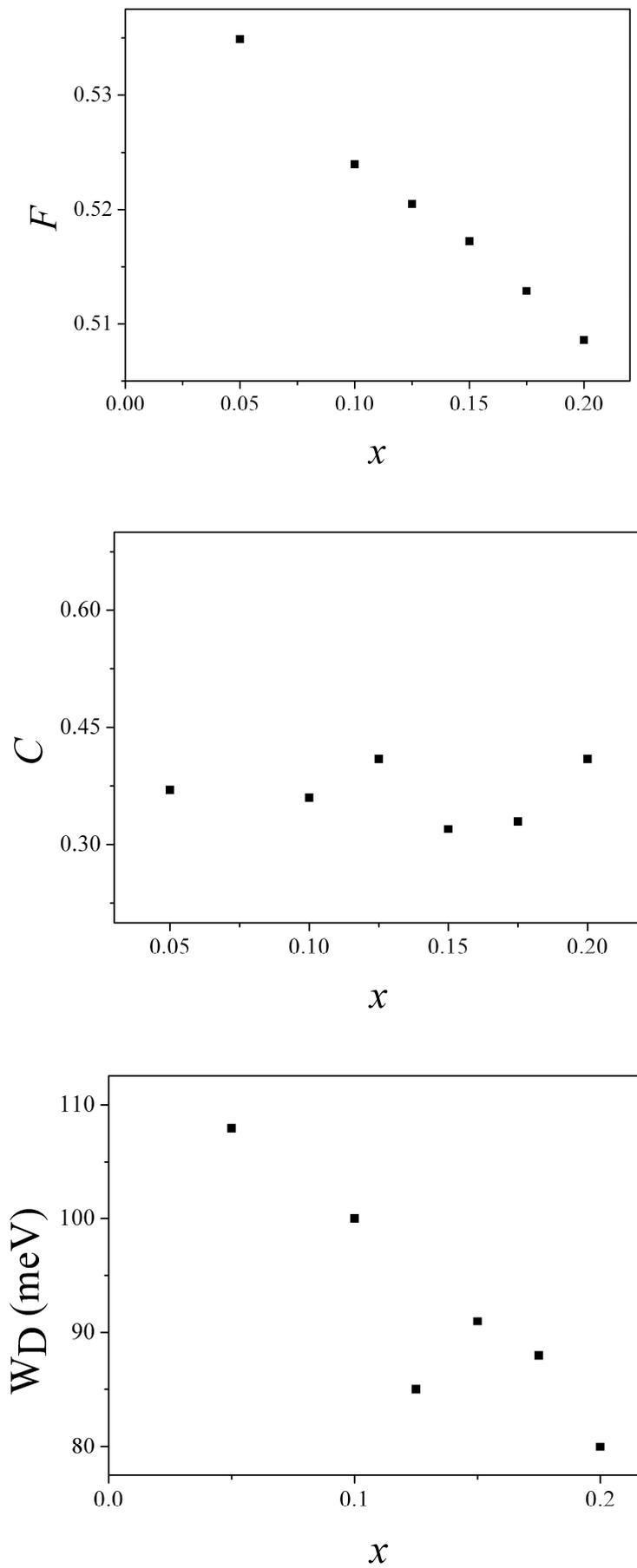


Рис. 6. Зависимости $F(x)$, $WD(x)$ и $C(x)$ для системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

Таблица 1 Значения параметров модели, полученные из анализа зависимостей $S(T)$ для системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

x	F	WD (meV)	b	$C(W\sigma/Wd)$
0.05	0.5349	108	0.0168	0.37
0.1	0.524	100	0.0108	0.36
0.125	0.5205	85	0.0072	0.41
0.15	0.5172	91	0.0041	0.32
0.175	0.5129	88	-0.0002	0.33
0.2	0.5086	80	-0.0034	0.41

Таблица 2 Подвижность μ и степень закона дисперсии k в образцах системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

x	k	μ
0.1	-0.12	0.47
0.125	-0.146	0.27
0.15	-0.121	0.36
0.175	-0.163	0.47
0.2	-0.163	0.52

Процесс вычисления расчетных зависимостей $Q(T)$ был выполнен путем замены значений F , WD , $W\sigma$ и b в формуле для коэффициента Нернста на значения, представленные в таблице 1. Путем подгонки расчетных кривых экспериментальных данных для зависимостей $Q(T)$ нам удалось достичь их хорошего согласия, что позволило однозначно определить значения дополнительных модельных параметров – μ и k . Отметим, что при вычислении расчетных кривых значение μ в основном определяет абсолютный уровень значений коэффициента Нернста, а значение k – форму его температурной зависимости $Q(T)$, что существенно упрощает процедуру расчета. Найденные таким образом значения приведены в таблице 2. Таким образом, модель узкой зоны демонстрирует хорошую возможность одновременного количественного описания температурных зависимостей коэффициента термоэдс $S(T)$ и коэффициента Нернста $Q(T)$ в образцах системы $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$.

Рассмотрим данные, полученные из анализа температурных зависимостей коэффициента Нернста. Подвижность μ имеет очень малое значение в случае $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$, не превышающее $1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, хорошо согласуется с результатами, полученными ранее для слаболегированных образцов системы $YBa_2Cu_3O_y$. Несмотря на то, что во всех наших образцах содержание введенных примесей было достаточно велико, этот результат представляется разумным, поскольку введение кальция приводит к приближению свойств исследованных образцов (включая значение критической температуры) именно к тем, которые характерны для слаболегированных систем. Величина подвижности увеличивается с увеличением x , это означает, что время релаксации также увеличивается с увеличением x или, другими словами, происходит уменьшением вероятности

рассеяния носителей заряда. Это явление можно рассматривать как специфическое влияние кальция на свойства ВТСП на основе YBaCuO. Фактически, полученные данные показывают, что введение кальция улучшает свойства системы носителей заряда, компенсируя негативное влияние примеси цинка на их параметры. Этот вывод может быть косвенно подтвержден наблюдаемым улучшением сверхпроводящих свойств в системе $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ с увеличением содержания кальция [11].

Степень асимметрии закона дисперсии k отрицательна и изменяется в зависимости от x в узком диапазоне (см. Таблицу 2). Характер изменения закона дисперсии при легировании кальцием удобнее обсуждать, используя абсолютную величину энергетического сдвига точки, в которой холловская проводимость меняет свой знак, от середины зоны. Из таблицы 3 видно, что значение $|kWD|$ в образцах $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ остается практически неизменным, что очень хорошо согласуется с результатами анализа коэффициента Нернста для различных легированных образцов системы YBaCuO в рамках модели узкой зоны [10], полученными ранее. Это приводит нас к тому, что степень асимметрии закона дисперсии нечувствительна к уровню легирования образцов системы YBaCuO различными примесями, включая исследованную нами примесь кальция. Таким образом, этот вывод можно рассматривать как дополнительное подтверждение высказанного ранее предположения о том, что наличие асимметрии закона дисперсии является общим характерным свойством структуры энергетического спектра в образцах системы YBaCuO, а не связано, как асимметрия проводящей зоны, с влиянием примеси кальция.

Таблица 3 Степень асимметрии закона дисперсии в системе $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$

x	k	$ kWD $ (meV)
0.05	-0.120	12.0
0.1	-0.146	12.4
0.125	-0.121	11.0
0.15	-0.163	14.3
0.175	-0.163	13.0
0.2	-0.120	12.0

Четвертая глава. Результаты эксперимента, их обсуждение и анализ параметров энергетического спектра для серии образцов состава $YBa_2Cu_3-xZnxO_y$

В этой главе мы представим результаты экспериментальных исследований и анализа поведения коэффициента Нернста в системе $YBa_2Cu_3-xZnxO_y$ ($x=0-0.2$). Легирование цинком специфическим образом влияет на свойства ВТСП системы $YBaCuO$. С одной стороны, цинк, замещая плоскостную медь, ответственную за наличие явления высокотемпературной сверхпроводимости, приводит к очень резкому уменьшения значения критической температуры с ростом его содержания. С другой стороны, эта примесь достаточно слабо влияет на значения кинетических коэффициентов, хотя и приводит к некоторой трансформации вида температурной зависимости коэффициента термоэдс $S(T)$. По этой причине актуальным является проведение комплексных исследований электронного транспорта в образцах состава $YBa_2Cu_3-xZnxO_y$ при содержании цинка, изменяющемся в широком диапазоне.

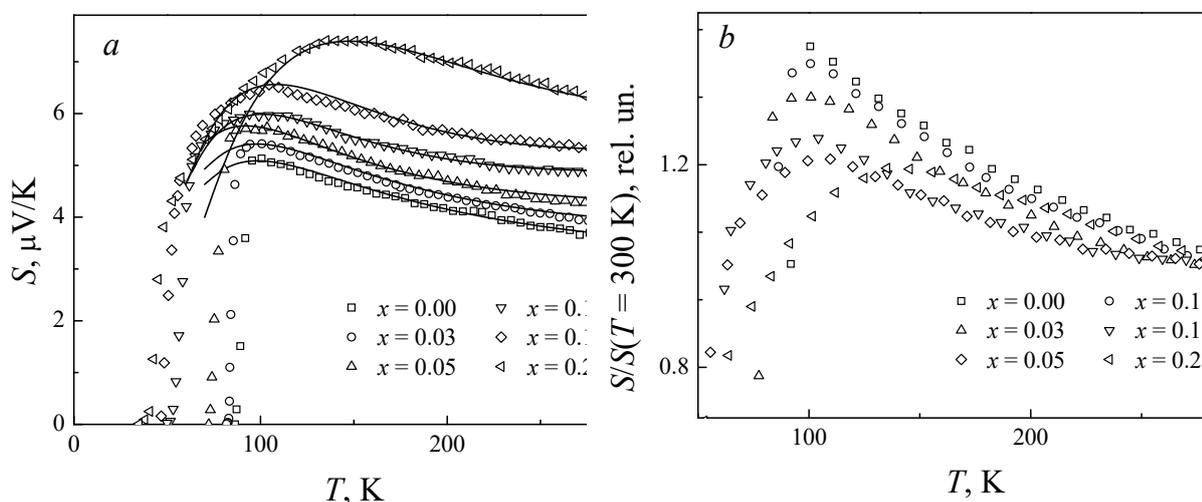


Рисунок 7. Температурные зависимости коэффициента термоэдс в системе $YBa_2Cu_3-xZnxO_y$. а – экспериментальные данные (символы) и результаты расчетов в рамках узкой зонной модели (линии); б – экспериментальные зависимости, нормированные на значение коэффициента термоэдс при комнатной температуре для каждого образца

На рисунке 7, а приведены температурные зависимости коэффициента термоэдс в образцах системы $YBa_2Cu_3-xZnxO_y$. Мы можем видеть, коэффициент термоэдс, в целом демонстрируя типичное для системы $YBaCuO$ поведения, характеризуется наличием дополнительных особенностей, связанных с влиянием примеси цинка. Увеличение x приводит к последовательному уменьшению наклона кривых $S(T)$ в области высоких температур, в то время как абсолютные значения коэффициента термоэдс при комнатной температуре возрастают крайне незначительно. Эта особенность хорошо видна на рисунке 7, б, где полученные экспериментальные данные представлены в относительных единицах – значение коэффициента термоэдс для каждого образца разделено на соответствующую его величину при комнатной температуре. Видно, что положение максимума на кривой $S(T)$ практически не изменяется в диапазоне $x=0-0.15$, но амплитуда этого максимума существенно уменьшается с ростом содержания цинка.

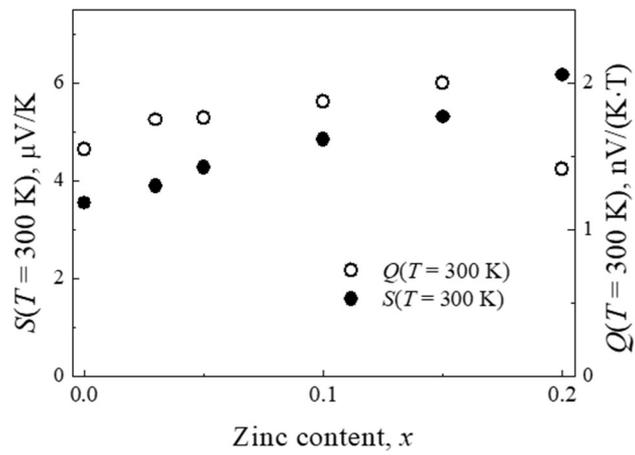


Рисунок 8. Изменения значений коэффициента термоэдс и коэффициента Нернста при комнатной температуре в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$

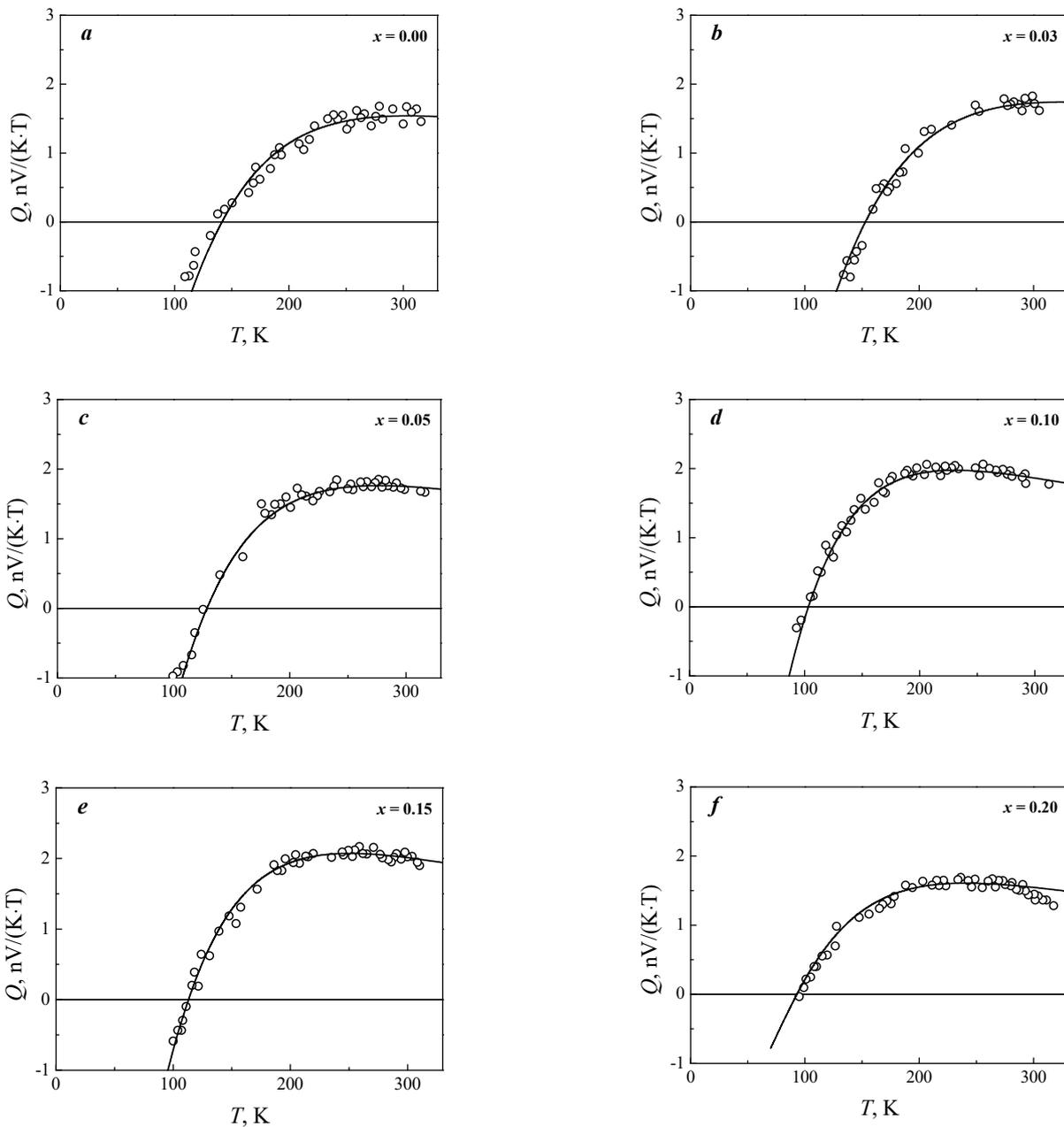


Рисунок 9. Температурные зависимости коэффициента Нернста в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$. Символы - экспериментальные данные; линии - результаты расчетов в рамках узкой зонной модели

Из рисунка 8 видно, что увеличение содержания цинка оказывает незначительное влияние на комнатные значения как коэффициента термоэдс, так и коэффициента Нернста, в отличие от серии образцов, данные для которых были представлены в предыдущей главе работы. Исключение составляет образец с максимальным уровнем легирования. Наблюдаемое для него падение значение коэффициента Нернста при комнатной температуре, так же как и изменение характера трансформации зависимости $S(T)$ (см. рис. 7) являются, по нашему мнению, следствием того, что цинк, при большом его содержании, приводит к достаточно сильному разрушению зоны, ответственной за проводимость в исследованном соединении.

На рисунке 9 приведены экспериментальные данные по измерению температурных зависимостей коэффициента Нернста. Видно, что при высоких температурах значение коэффициента Нернста изменяется очень слабо, после чего она достаточно резко уменьшается и демонстрирует переход к отрицательным значениям в области низких температур. Все эти особенности, как уже говорилось выше, являются достаточно типичными для поведения данного коэффициента в ВТСП системы $YBaCuO$.

Полученные данные для зависимостей $S(T)$ и $Q(T)$ были проанализированы на основе модели узкой зоны, как это объяснялось выше. Это позволило нам определить значения всех модельных параметров, которые и будут представлены ниже.

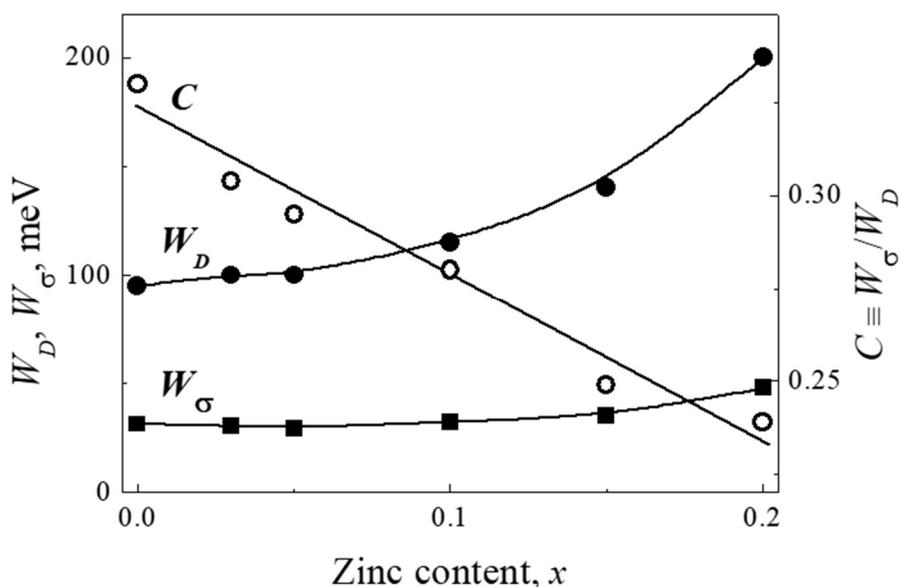


Рисунок 10. Изменение энергетических параметров зоны проводимости в системе $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$

На рис. 10 показано влияние цинка на энергетические параметры зоны проводимости в системе $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$. Видно, что как общая эффективная зона ширина зоны W_D , так и эффективная ширина интервала делокализованных состояний W_σ увеличиваются с ростом x , и чем выше уровень легирования, тем сильнее становится их увеличение. Кроме того, отношение $C = W_\sigma / W_D$ уменьшается почти линейно с увеличением содержания цинка, что указывает на увеличение степени локализации состояний с ростом содержания цинка в системе $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$.

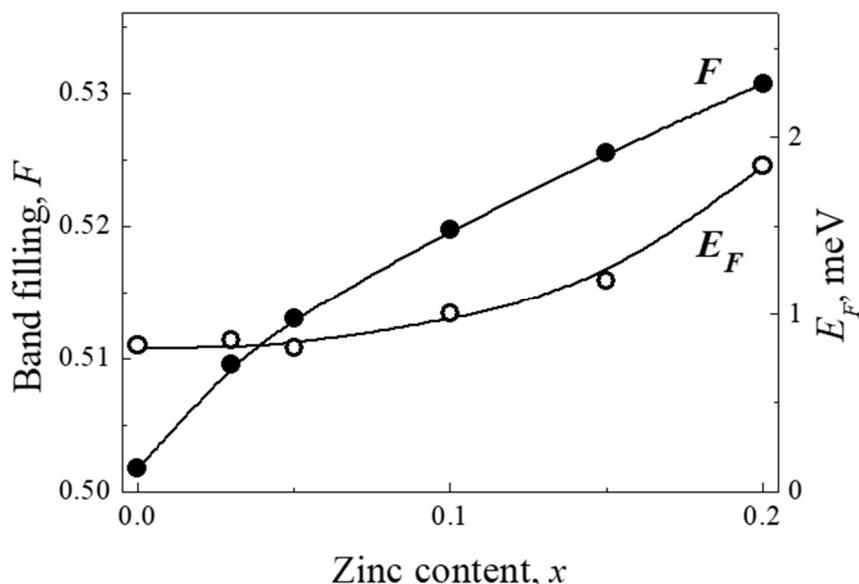


Рисунок 11. Изменения степени заполнения зоны электронами и положения низкотемпературного уровня Ферми в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$

Из рисунка 11 видно, что степень заполнения зоны электронами в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$ последовательно увеличивается с ростом x от 0,509 ($x = 0$) до 0,531 ($x = 0,2$). Отметим, что в случаях большинства неизовалентных замещений в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ увеличение F обусловлено влиянием примеси на зарядовый баланс в решетке. Замещение цинком плоскостной меди является изовалентным, поэтому обнаруженное увеличение значений F объяснения. По нашему мнению, это связано с тем, что введение цинка приводит к выбросу зонных состояний в области более низких энергий. В результате, поскольку степень заполнения равна отношению числа электронов к числу состояний в зоне, ее значение последовательно увеличивается.

Отметим, что увеличение степени заполнения зоны в легированных образцах системы YBaCuO приводит обычно к росту абсолютных значений коэффициента термоэдс, что не наблюдается в нашей системе. Это связано с тем, что введение цинка приводит к появлению и последовательному увеличению степени асимметрии зоны, при этом параметр асимметрии b , согласно нашим расчетам, изменяется по закону $b \approx 0.1$. Следует учесть, что в общем случае значение коэффициента термоэдс определяется не степенью заполнения зоны электронами, а положением уровня Ферми [12, 13]. Мы провели расчет этого значения в наших образцах с учетом наличия асимметрии проводящей зоны. Как мы можем видеть из рисунка 11, увеличение содержания цинка приводит к крайне слабому смещению уровня Ферми от середины зоны вверх по шкале энергий. Это и объясняет обнаруженных экспериментально слабый рост абсолютных значений коэффициента термоэдс в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$ при увеличении содержания цинка.

Перейдем теперь к обсуждению результатов, полученный из анализа поведения коэффициента Нернста. Параметр k , характеризующий степень асимметрии закона дисперсии, отрицателен для всех исследованных образцов и изменяется от $k = -0,22$ ($x = 0$) до $k = -0,08$ ($x = 0,2$). В результате значение абсолютного смещения точки смены знака функции холловской проводимости $|kWD|$ последовательно уменьшается от 20 мэВ ($x = 0$) до 15 мэВ ($x = 0.2$). Этот факт подтверждает сделанный ранее вывод о наличии непосредственного влияния цинка на структуру проводящей зоны в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$.

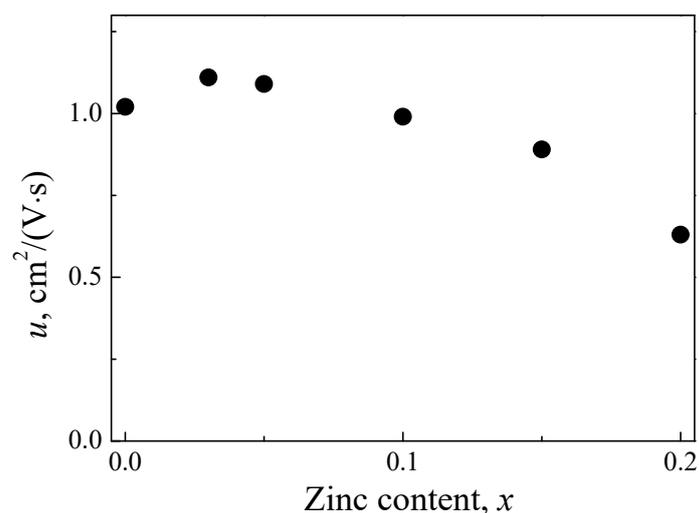


Рисунок 12. Изменение значения подвижности электронов в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$

Как мы можем видеть на рис. 12, вычисленные значения подвижности для всех образцов меньше $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, что находится в общем диапазоне значений этой величины для других легированных образцов системы YBaCuO . Для образцов с $x=0-0,1$ подвижность можно считать практически неизменной. По мере дальнейшего увеличения x подвижность начинает немного уменьшаться, это означает, что цинк оказывает определенное влияние не только на энергетическую структуру проводящей зоны, но и на свойства носителей заряда в нормальном состоянии [14–16]. Таким образом, при низких уровнях легирования все параметра энергетического спектра и системы носителей заряда в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$ остаются почти неизменными. Это указывает на то, что подавление сверхпроводимости цинком связано с его непосредственным воздействием на механизм спаривания электронов. При высоком уровне легирования цинк вызывает частичное разрушение зоны, ответственной за проводимость, приводя к ее расширению (рис. 10) и уменьшению значения подвижности электронов (рис. 12). Такое изменение параметров нормального состояния может оказывать дополнительное воздействие на подавление сверхпроводящих свойств, как это происходит в случае различных неизовалентных катионных замещений.

Заключение

Таким образом, в данной работе мы представили данные экспериментального исследования температурных зависимостей коэффициента Нернста в нормальном состоянии в образцах ВТСП-соединений состава $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ и $YBa_2Cu_3-xZn_xO_y$, а также результаты их количественного анализа, проведенного совместно с анализом данных о поведении коэффициента термоэдс в рамках модели узкой зоны. Получены следующие основные результаты и выводы.

1. Впервые получены экспериментальные данные о температурных зависимостях коэффициента Нернста в образцах ВТСП систем $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ и $YBa_2Cu_3-xZn_xO_y$ в нормальной фазе в широком диапазоне температур. Обнаружено, что в обеих исследованных системах они в целом характеризуются наличием общих особенностей. При уменьшении температуры коэффициент Нернста слабо изменяется в области высоких температур, затем демонстрирует широкий максимум и резко уменьшается при дальнейшем уменьшении температуры, переходя для некоторых из составов в области отрицательных значений. Значения коэффициента Нернста при комнатной температуре для всех образцов составляют менее $1 \text{ нВ}/(\text{К}\cdot\text{Т})$ и незначительно изменяются с увеличением уровня легирования x .

2. Все экспериментальные зависимости $Q(T)$ для образцов систем $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ и $YBa_2Cu_3-xZn_xO_y$ могут быть удовлетворительно описаны в рамках модели узкой зоны с использованием значений основных параметров модели, предварительно определенных из анализа температурных зависимостей коэффициента термоэдс. Таким образом, подтверждена возможность проведения совместного количественного анализа экспериментальных данных для исследованных двух кинетических коэффициентов на основе разработанного подхода.

3. Впервые определены значения подвижности носителей заряда и степени асимметрии закона дисперсии в образцах систем $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ и $YBa_2Cu_3-xZn_xO_y$, получены и проанализированы данные о характере их изменения с ростом содержания вводимых примесей.

4. Обнаружено, что подвижность электронов μ имеет очень малое значение (порядка $1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). В образцах $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ значение μ увеличивается с ростом содержания кальция в диапазоне легирования $x > 0,1$. Это указывает на то, что введение кальция улучшает не только сверхпроводящие свойства образцов $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$, но и свойства системы носителей заряда в нормальном состоянии, компенсируя негативное влияние примеси цинка на их параметры. В образцах $YBa_2Cu_3-xZn_xO_y$ значение μ слабо изменяется в диапазоне $x=0-0,1$, а при дальнейшем увеличении уровня легирования незначительно уменьшается. Таким образом, несмотря на очень слабое изменение абсолютных значений коэффициентов термоэдс и Нернста под действием легирования цинком, он оказывает непосредственное влияние на свойства системы носителей заряда в нормальном состоянии.

5. В обеих исследованных системах наблюдается наличие асимметрии закона дисперсии, что говорит о том, что данная особенность является общей характеристикой ВТСП системы $YBaCuO$ независимо от типа и уровня легирования. При этом в системе $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$ значение энергетического сдвига точки смены знака холловской проводимости остается практически неизменным с ростом содержания кальция, что указывает на то, что внесение кальцием дополнительных состояний в зону не приводит к искажению вида закона дисперсии.

В системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Zn}_x\text{O}_y$ это значение уменьшается с ростом содержания цинка, что подтверждает вывод о том, что введение цинка в YBaCuO приводит к последовательному разрушению зоны, ответственной за проводимость в нормальной фазе.

Литературы

- [1] N. P. Ong, “The Hall effect and its relations to other transport phenomena in the normal state of the high temperature superconductors,” in *Physical Properties of High Temperature Superconductors*, vol. II, D. M. Ginsberg, Ed. Singapore: World Scientific, 1990, pp. 459–507.
- [2] A. B. Kaiser and C. Ucher. “Thermoelectricity of high-temperature superconductors,” in *Studies of High Temperature Superconductors*, vol. 7, A. V. Narlikar, Ed. New York: Nova Science Publishers, 1991, pp. 353–392.
- [3] Y. Iye, “Transport properties in high T_c cuprates,” in *Physical Properties of High Temperature Superconductors*, vol. III, D. M. Ginsberg, Ed. Singapore: World Scientific, 1992, pp. 285–361.
- [4] V. E. Gasumyants, “Analysis of the electron transport phenomena in HTSC-materials as the method of studying the band spectrum and its transformation under doping by different impurities,” in *Advances in Condensed Matter and Materials Research*, vol. 1, F. Gerard, Ed. New York: Nova Science Publishers, 2001, pp. 135–200.
- [5] V. E. Gasumyants, V. I. Kaidanov and E. V. Vladimirskaia, “The electron transport phenomena in Y-based HTSC’s and their analysis on the basis of phenomenological narrow-band theory. The band structure transformation with oxygen content and substitution for Cu,” *Physica C*, vol. 248, pp. 255–275, 1995.
- [6] V. E. Gasumyants and O. A. Martynova, “Normal-state band spectrum in chain-free high-temperature superconductors: mechanisms of modification under changing sample composition and influence of the normal-state parameters on the critical temperature,” in *Superconductivity: Theory, Materials and Applications*, V. Rem Romanovskii, Ed. New York: Nova Science Publishers, 2012, pp. 285–326.
- [7] V. E. Gasumyants and O. A. Martynova, “Specific features of the thermopower behavior of calcium-containing Y-based high-temperature superconductors: Experimental investigation and interpretation,” in *Horizons in World Physics*, vol. 291, A. Reimer, Ed. New York: Nova Science Publishers, 2017, pp. 129–216.
- [8] N. V. Ageev and V. E. Gasumyants, “[The Nernst-Ettingshausen coefficient in conductors with a narrow conduction band: Analysis and application of its results to HTSC materials](#),” *Phys. Solid State*, vol. 43, pp. 1834–1844, 2001.
- [9] V. E. Gasumyants, N. V. Ageev and M. V. Elizarova, “[The Nernst-Ettingshausen coefficient in the normal phase of doped HTSCs of the \$YBa_2Cu_3O_y\$ system](#),” *Phys. Solid State*, vol. 47, pp. 202–213, 2005.
- [10] V. E. Gasumyants and O. A. Martynova, “Experimental investigation and quantitative analysis of the normal-state Nernst coefficient in doped high-temperature superconductors of the $YBa_2Cu_3O_y$ system,” in *High-Temperature Superconductors: Occurrence, Synthesis and Applications*, M. Miryala and M. R. Koblishka, Eds. New York: Nova Science Publishers, 2018, pp. 95–152.
- [11] O. A. Martynova, D. V. Potapov, V. E. Gasumyants and E. V. Vladimirskaia. “Mechanism of a strong rise of T_c due to the calcium doping in $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_{2.8}Zn_{0.2}O_y$,” *Physica C*, vol. 471, pp. 308–313, 2011.
- [12] V. E. Gasumyants, V. I. Kaidanov, and E. V. Vladimirskaia, “The electron transport phenomena in Y-based HTSC’s and their analysis on the basis of phenomenological narrow-band theory. The band structure transformation with oxygen content and substitution for Cu,” *Physica C*, vol. 248, pp. 255–275, 1995.

- [13] V. E. Gasumyants, "Analysis of the electron transport phenomena in HTSC-materials as the method of studying the band spectrum and its transformation under doping by different impurities," in *Advances in Condensed Matter and Materials Research*, vol. 1, F. Gerard, Ed. New York: Nova Science Publishers, 2001, pp. 135–200.
- [14] Gasumyants V. E., Martynova O. A., Experimental investigation and quantitative analysis of the normal-state Nernst coefficient in doped high-temperature superconductors of the YBa₂Cu₃O_y system // *High-Temperature Superconductors: Occurrence, Synthesis and Applications*. Miryala M., Koblishka M. R. (Editors). New York: Nova Science Publishers, 2018. Pp. 95–152.
- [15] Gasumyants V E, Ageev N V, Elizarova M V 2005 *Phys. Solid State* 47 202
- [16] Martynova O A, Gasumyants V E 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* 769 012063
- [17] R. P. Gupta and M. Gupta, "Effect of nickel and zinc substitutions on the electronic charge-density redistribution in a YBa₂Cu₃O₇ superconductor," *Phys. Rev. B*, vol. 59, pp. 3381–3384, 1999.