

# Влияние магнитного поля на теплопроводность $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ в области сверхпроводящего фазового перехода

С.С. Рагимов, С.А. Алиев, В.М. Алиев

*Институт физики НАН Азербайджана, пр. Джавида, 33, г. Баку, 1143, Азербайджан*  
E-mail: Sadiyar@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 марта 2009 г., после переработки 25 мая 2009 г.

Проведено исследование влияния магнитного поля на теплопроводность  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ . Обнаружено, что под действием магнитного поля теплопроводность увеличивается, что связано с ростом электронной доли теплопроводности, обусловленной распариванием куперовских пар и уменьшением фонон-вихревого рассеяния.

Проведено дослідження впливу магнітного поля на теплопровідність  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ . Виявлено, що під дією магнітного поля теплопровідність збільшується, що пов'язано із зростанням електронної доли теплопровідності, обумовленої розпарюванням куперівських пар та зменшенням фонон-вихревого розсіювання.

PACS: 74.25.Fy Транспортные свойства (электро- и теплопроводность, термоэлектрические эффекты и т.д.).

Ключевые слова: теплопроводность, магнитное поле, фонон-вихревое рассеяние.

## 1. Введение

Исследованию теплопроводности ВТСП посвящено много работ [1–10]. Тем не менее встречаются и противоречивые суждения о механизмах проводимости тепла и рассеяния фононов и электронов в них.

Коэффициент теплопроводности  $k$  ВТСП на основе купратных металлооксидных соединений ниже критической температуры  $T_c$  в плоскости слоев  $\text{Cu-O}_2$  резко возрастает и проходит через максимум при  $T \sim T_c/2$ . Согласно [1,5], теплопроводность вдоль оси  $c$  на порядок ниже, чем в плоскости  $ab$ . Величина теплопроводности в области максимума в 1,5–2 раза может превышать теплопроводность в нормальном состоянии при  $T > T_c$  [1,2]. Такой рост  $k(T)$  трудно объяснить увеличением одного только решеточного вклада [3]. Несмотря на квазидвумерность электронного спектра и сильную анизотропию электрон-фононной релаксации [4], этот механизм приводит к росту теплопроводности при  $T < T_c$  как в плоскости  $ab$ , так и вдоль оси  $c$ .

Особый интерес представляет изучение влияния магнитного поля на теплопроводность ВТСП в области фазового перехода. Исследование теплопроводности в магнитном поле дает возможность судить о

вихревом состоянии сверхпроводника, а также о механизме рассеяния, так как взаимодействия тепловых носителей с квазичастицами в центре вихрей дают информацию о электрон-фононном и электрон-электронном взаимодействиях.

Многие авторы при  $T < T_c$  наблюдали уменьшение  $k(B)$ . Одни считают, что это обусловлено, в основном, рассеянием фононов на вихрях, другие — рассеянием на распарившихся электронах [9–12].

Как известно, в ВТСП ниже температуры сверхпроводящего фазового перехода под действием магнитного поля происходит резкое возрастание концентрации абрикосовских вихрей, образующих, подобно атомам в кристалле, правильную решетку. В полях  $B > B_1$  магнитное поле, сжимая решетку, начинает «разрушать» куперовские пары на свободные электроны, способные участвовать в процессе проводимости заряда и тепла. В зависимости от значений магнитного поля, температуры и концентрации дефектов кристалла можно создать условия для наблюдения двух противоположно действующих явлений: рассеяние фононов, приводящее к уменьшению теплопроводности решетки  $k_l$ , и процесс переноса тепла распарившимися электронами

ми. Напомним, что в области сверхпроводящего фазового превращения (СПФП) для частичного разрыва куперовских пар требуются не очень сильные поля.

В данной работе изучено влияние магнитного поля на теплопроводность поликристаллической висмутовой ВТСП (2212) в области СПФП.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Теплопроводность измерялась методом стационарного теплового потока. Измеряемый образец имел форму параллелепипеда с размерами  $15 \times 2 \times 1,5$  мм, нагревательная печь в виде миниатюрной медной катушки с размерами  $\varnothing = 1,5$  мм и высотой 2 мм приклеивалась серебряной пастой на торец образца. Регистрация температуры в интервале 65–300 К проводилась с помощью медь-константановых термопар. Термопары приклеивались серебряной пастой на грань образца на расстоянии 8 мм. Для устранения фоновой эдс, вызванной перепадом температуры между их холодными и теплыми концами, перед выходом из ячейки, где монтируется образец, медь-константановые провода наматывались на медный стержень (имеющий контакт с хладагентом) и фиксировались клеем БФ-2. Регистрация сигналов с термопар производилась с помощью компаратора напряжений, что делало возможным практически полностью скомпенсировать фоновую эдс до начала измерений в магнитном поле. Точность измерения температуры в области 66–77 К составляла 0,05 К. При определении коэффициента теплопроводности в указанной области ( $B = 2,2$  Тл) погрешность достигает 3–5% и обусловлена, в основном, размерами образца, измерениями температуры и мощности нагревателя. В работе [13] показано, что магнитное поле до  $B = 3\text{--}3,5$  Тл на термоэдс медь-константановых термопар при азотных температурах не оказывает влияние. Измерения  $k(B)$  проводились на одном поликристаллическом и на одном керамическом образцах. Данные отличались лишь количественно, и в настоящей работе приведены только результаты измерений на поликристаллическом образце  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ .

На рис. 1 представлены температурные зависимости теплопроводности керамического и кристаллического образцов. В кристаллическом образце значение теплопроводности значительно больше, чем в керамическом. В керамическом образце зависимость  $k(T)$  с 70 К начинает уменьшаться. В кристаллическом образце  $k(T)$  в интервале 30–200 К практически не зависит от температуры, с 30 К начинает возрастать и при  $T \sim 23$  К проходит через максимум. Безусловно, это обусловлено отсутствием строгой кристаллической структуры и высокой концентрацией дефектов в керамическом образце, на которых происходит интен-

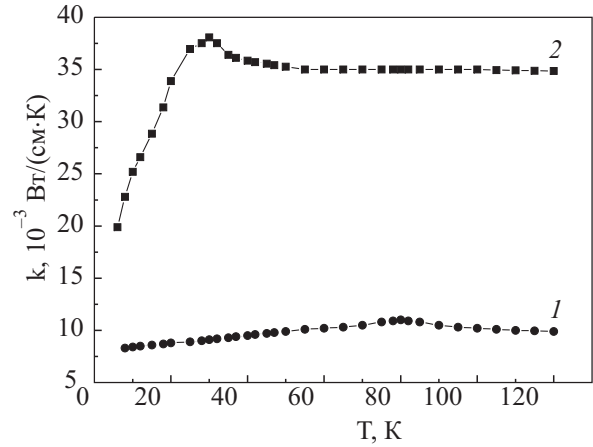


Рис. 1. Температурные зависимости теплопроводности:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  (керамика) (1),  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  (поликристалл) (2).

сивное рассеяние фононов. Расчет электронной доли  $k_e(T)$  проведен по соотношению Видемана–Франца ( $k_e = LT/\rho$ ) в приближении упругого характера рассеяния и составляет 20% от общей теплопроводности.

Зависимость теплопроводности от магнитного поля представлена на рис. 2. Чтобы исключить систематические погрешности, связанные с геометрическими размерами образца, расстоянием между спаями термопар и мощностью нагревателя, результаты измерения в магнитном поле приводятся в виде отношения теплопроводностей  $k(B)/k(0)$ . При  $T \geq 85$  К величина  $k(B)/k(0)$  от  $B$  не зависит, с понижением температуры ( $T < 80$  К) наблюдается возрастание теплопроводности в магнитном поле. Эффект возрастания  $k(B)$  наблюдается в ограниченном интервале температур (65–80 К). Максимальное возрастание теплопроводности соответствует  $T \approx 76$  К, ниже 65 К и выше 85 К магнитное поле не оказывает влияние на  $k$ . Считаем, что при  $T \geq 85$  К это обусловлено очень малой подвижностью носителей

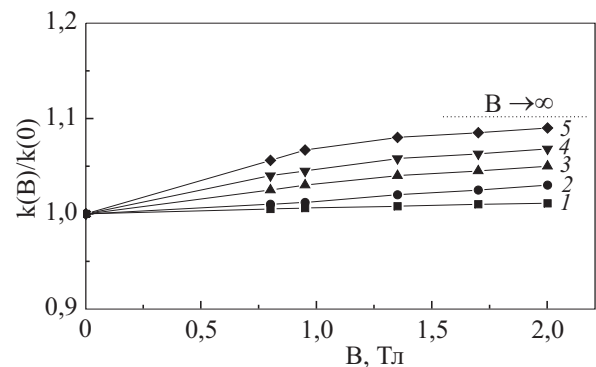


Рис. 2. Зависимость относительной теплопроводности  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  от магнитного поля при различных температурах  $T$ , К: 90 (1); 65 (2); 80 (3); 70 (4); 76 (5).

заряда в  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ , а отсутствие эффекта при  $T < 65$  К связано с сильным возрастанием значения  $B_{c2}$  с понижением температуры. Максимальное возрастание  $k(B)/k(0)$  соответствует примерно середине СПФП.

Во многих теоретических [4,14,15] и экспериментальных работах [1,5,10,16] полагается, что основную роль в переносе тепла ниже  $T_c$  играет фононная компонента. Возрастание теплопроводности ниже  $T_c$  обусловлено падением концентрации нормальных электронных возбуждений, которые ограничивают максимальные пробеги фононов вблизи  $T_c$ . Длина свободного пробега фононов также ограничена их рассеянием друг на друге, на примесях и дефектах в объеме образца. Однако в работах [2,3,11,17] увеличение  $k(T)$  в сверхпроводящем состоянии связывают с возрастанием электронной компоненты теплопроводности. В этих работах полагают, что в достаточно широком интервале температур по обе стороны от  $T_c$  решеточная теплопроводность не зависит от температуры. Поскольку электронная компонента теплопроводности в исследованном нами образце достигает 20%, можно полагать, что возрастание  $k(B)/k(0)$  обусловлено переносом тепла распарившимися носителями заряда, так как при  $B > B_1$  происходит формирование вихревой решетки, при котором значительно уменьшается фонон-вихревое рассеяние. При этом участие распавшихся электронов в переносе тепла становится заметнее. Поэтому в таком сильно дефектном образце решеточная теплопроводность значительно уменьшается, и вклад электронной теплопроводности, возникающий под действием магнитного поля, увеличивается. Такая картина наблюдается и в [18], в образце с высоким содержанием цинка, что создает точечные дефекты, приводящие к эффективному рассеянию фононов и, соответственно, к возрастанию отношения  $k_e/k_0$ .

Рост теплопроводности сверхпроводника в магнитном поле при определенных условиях обнаружен и в работе [19], где рассмотрено влияние магнитного поля на теплопроводность  $k(B,T)$   $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$  в интервале  $B$  до 6 Тл и 2,5–24 К. Обнаружено, что начиная с  $B > 0,5$  Тл происходит возрастание отношения  $k(B)/k(0)$ . С повышением температуры возрастание усиливается. Авторы поставили задачу повторить эти измерения в образце с большой концентрацией калия. В этом случае с повышением температуры происходит сильное возрастание  $k(B)/k(0)$  (до 3–4 Тл), а затем насыщение  $k(B)$ . Для этого образца при 15,2 К возрастание  $k(B)/k(0)$  доходит до 30%.

Приведенные рассуждения о возрастании проводимости электронной системы в ВТСП под действием магнитного поля находятся в соответствии и с данными по термоэдс  $S(T,H)$  [20], характер зависимости которой повторяет ход  $k(B)/k(0)$ . За десять градусов до СПФП  $S(T)$  проходит через небольшой максимум, за-

тем резко убывает до СП состояния, где  $S = 0$ . В магнитном поле термоэдс изменяется, происходит уширение области ФП  $\Delta T(H)$ . Ниже  $T < T_c$  и выше  $T > 90$  К изменение термоэдс практически исчезает, что соответствует поведению  $k(B)$ .

### 3. Заключение

Рост теплопроводности под действием магнитного поля в  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  обусловлен уменьшением фонон-вихревого рассеяния из-за формирования вихревой решетки и увеличением электронной доли теплопроводности, вызванным распариванием куперовских пар.

1. R. Yu, V. Salamon, J. Lu, and W. Lee, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1431 (1992).
2. P. Allen, X. Du, L. Mihaly, and L. Forro, *Phys. Rev.* **B49**, 9073 (1994).
3. Э.А. Пашицкий, В.И. Пентегов, *Письма в ЖЭТФ* **60**, 366 (1994).
4. L. Tewordt and Th. Wolkhausen, *Solid State Commun.* **75**, 515 (1990).
5. В.Б. Ефимов, Л.П. Межов-Деглин, *ФНТ* **23**, 278 (1997) [*Low Temp. Phys.* **23**, 204 (1997)].
6. А.Б. Бондаренко, О.А. Гавренко, Б.А. Мерисов, М.А. Оболенский, А.В. Сологубенко, Г.Я. Хаджай, *ФНТ* **17**, 318 (1991) [*Low Temp. Phys.* **17**, 165 (1991)].
7. A. Jezowski, *Solid State Commun.* **75**, 779 (1990).
8. Б.А. Мерисов, Г.Я. Хаджай, А.В. Сологубенко, *ФНТ* **16**, 1270 (1990) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **16**, 730 (1990)].
9. В.В. Флорентьев, А.В. Инюшкин, А.Н. Талденков, О.К. Мельников, А.Б. Быков, *СФХТ* **3**, 2302 (1990).
10. А.Б. Багдалов, Ш.Б. Абдулвагидов, М.С. Буттаев, *СФХТ* **8**, 665 (1990).
11. M. Houssa and M. Ausloss, *J. Condens. Matter* **9**, 201 (1997).
12. A.N. Taldenkov, P. Esqunazi, and K. Leicht, *J. Low Temp. Phys.* **115**, 15 (1999).
13. С.С. Шалыт, В.М. Муждаба, А.Д. Галецкая, *ФТТ* **10**, 1277 (1968).
14. K. Noto, M. Matsukava, K. Iwasaki, K. Watanabe, T. Sasaki, and N. Kobayashi, *Sci. Rep. RITU* **A42**, 359 (1996).
15. L.P. Kadanoff and P.C. Martin, *Phys. Rev.* **128**, 2390 (1961).
16. В.М. Anderson, B. Sandqvist, J. Niska, and B. Loberg, *Phys. Rev.* **B49**, 4189 (1994).
17. H. Hara and N. Kontani, *J. Phys. Soc. Jpn* **76**, 073705 (2007).
18. В.М. Алиев, С.С. Рагимов, М.И. Абдуллаев, *Fizika (Азербайджан)* **XIII**, 208 (2007).
19. B. Chen, F. Tsui, C. Uher, P. Han, D. Payne, and K. Rao, *Phys. Rev.* **B51**, 6171 (1995).
20. С.А. Алиев, С.С. Рагимов, В.М. Алиев, *ФНТ* **22**, 679 (1996) [*Low Temp. Phys.* **22**, 522 (1996)].

The magnetic field influence on thermal conductivity of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  in the superconducting phase transition region

S.S. Ragimov, S.A. Aliev, and V.M. Aliev

The effect of magnetic field on thermal conductivity of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  has been investigated. It is found that the thermal conductivity influenced by magnetic field increases due to an increase in the

electron fraction of thermal conductivity, caused by copper pair dissipation and phonon–vortex scattering decrease.

PACS: 74.25.Fy Transport properties (electric and thermal conductivity, thermoelectric effects, etc.)

Keywords: thermal conductivity, magnetic field, phonon–vortex scattering.