

УДК 621.315.592

## О РАЗМЫТИИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$

С.А.АЛИЕВ<sup>б</sup>, С.С.РАГИМОВ<sup>а</sup>, В.М.АЛИЕВ<sup>а</sup>

*Институт Физики НАН Азербайджана,  
370143, Баку пр.Джавида 33<sup>а</sup>*

*Институт Фотоэлектроники АН Азербайджана,  
370141, Баку, ул.Ф.Агаева 555 квартал<sup>б</sup>*

Проведены исследования температурных и магнито-полевых зависимостей удельного сопротивления  $\rho(B,T)$  и термоэдс  $\alpha(B,T)$  в  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ . Полученные результаты интерпретированы в рамках теории размытых фазовых переходов (РФП). Определены параметр  $a$ , характеризующий степень размытости ФП, функция включения сверхпроводящей (СП) фазы  $L(T)$ , температурная скорость ФП  $dL/dT$  и  $T_0$  температура, при которой массы обеих фаз равны. Показано, что в висмутовом СП фазовый переход носит сильно размытый характер. Установлено, что под действием магнитного поля степень размытости ФП сильно возрастает.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов, происходящих в области фазовых превращений (ФП) в твердых телах является одним из перспективных и развивающихся направлений физики твердого тела. В работах [1,2] определены термодинамические параметры размытых ФП в  $\text{Ag}_2\text{Te}$ . В [2] на основании совместного исследования дифференциального термического анализа (ДТА) и электрических свойств вблизи и в области ФП установлено, что малоинерционные электронные процессы наиболее чувствительны к ФП. Результаты экспериментов интерпретированы в рамках теории РФП [3,4] и показано, что электрические свойства также могут быть использованы для вычисления функции включения второй фазы  $L(T)$  и определения изменения термодинамических параметров в области ФП.

Анализ температурных зависимостей электрических свойств ВТСП в области ФП показывает, что они имеют характер присущий РФП. Это вызвано особенностями сверхпроводников II рода. Среди таких особенностей следует выделить необычный механизм взаимодействия их с магнитным полем  $B$ , большое значение ширины  $\Delta T$  ФП, сильную асимметрию кривых относительно  $T_0$ , при которой массы обеих фаз равны, «преждевременное» уменьшение сопротивления и др. В них разрушение СП фазы магнитным и электрическим полем происходит намного медленнее, происходит сильное уширение  $\Delta T(B)$ , наблюдается возрастание асимметрии, появление излома на кривой  $V_{c2}(T)$  и др. явления.

Поэтому в данной работе поставлена задача рассмотреть электрические свойства  $\rho(T,B)$ ,  $\alpha(T,B)$   $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  в области ФП в рамках теории РФП по методике предложенной в [2].

### ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Вопросы сосуществовании отдельных фаз в области ФП рассмотрены в работах [3,4]. С этой целью использована теория размытых ФП в конденсированных системах, основанная на введении функции включения  $L(T)$ . Предполагается что, если термодинамические потенциалы  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз обозначить через  $\Phi_\alpha$  и  $\Phi_\beta$ , то

термодинамический потенциал  $\Phi(T)$  в области сосуществования фаз может быть представлен в виде

$$\Phi(T) = \Phi_{\alpha}(T) - \Delta\Phi(T) \cdot L(T) \quad (1)$$

где  $\Delta\Phi(T) = \Phi_{\alpha}(T) - \Phi_{\beta}(T)$ . В случае, когда ФП происходит в интервале температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  ( $T_2 > T_1$ ), функция включения должна удовлетворять условиям

$$L(T) = \begin{cases} 0 & T < T_1 \\ 0 < L < 1 & T_1 < T < T_2 \\ 1 & T > T_2 \end{cases} \quad (2)$$

Согласно теории РФП, для функции  $L(T)$  получено выражение

$$L(T) = \{1 + \exp[-a(T - T_0)]\}^{-1}, \quad (3)$$

где  $T_0$ -температура, при которой массы обеих фаз количественно равны,  $a$ -постоянная, характеризующая степень размытости ФП и зависящая от объема возможных флуктуаций, а также энергии и температуры ФП. Учитывая, что функция  $L(T)$  характеризует относительную долю фаз в области их сосуществования, ее можно представить в простом виде

$$L(T) = \frac{m_{\beta}(T)}{m_{\alpha}(T) + m_{\beta}(T)} = \left[1 + \frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}}(T)\right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $m_{\alpha}$  и  $m_{\beta}$ -массы  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз. Из температурной зависимости  $\ln\left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}}\right)$  можно определить температуру  $T_0$ . Из совместного решения выражений (3) и (4) получим

$$a = \frac{1}{T_0 - T} \ln \frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}}. \quad (5)$$

Если  $a$  некоторая постоянная, то множитель  $\ln \frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}}$  должен быть линейной функцией температуры.

Не менее информативным является производное  $L(T)$  по температуре

$$dL/dT = \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{1 + \exp(a \cdot (T - T_0))}, \quad (6)$$

выражающее температурную скорость фазовых превращений каждой фазы.

В работах [5,6] была показана возможность определения  $L(T)$  на основе структурного исследования фазовых переходов в твердых телах. При этом предполагалось, что в указанной области сосуществования фаз температурное изменение интенсивности рентгеновских отражений обусловлено количественным изменением фаз. В работе [2], допуская, что в области ФП температурные изменения электрических и тепловых свойств также обусловлены, в основном, количественным изменением  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз  $\text{Ag}_2\text{Te}$ , определены:  $a$ ,  $T_0$ ,  $L(T)$ ,  $dL/dT$  и другие термодинамические параметры. Для этого необходимо было вблизи и в области перехода добиться линейного изменения температуры, тогда область от начала перехода до конца интервала  $\Delta T$  можно разбить на равные промежутки и соответствующие значения исследуемых эффектов отнести к предполагаемым фазам, например:

$$\Delta T_y = T_{y,\alpha} \left(1 - m_{\beta} / m_{\alpha}\right) + \Delta T_{y,\beta} \left(\frac{m_{\beta}}{m_{\alpha}}\right). \quad (7)$$

Сопоставление результатов  $a, T_0, L(T), dL/dT$  и др. термодинамических параметров, полученных для  $\text{Ag}_2\text{Te}$  по данным интенсивности рентгеновских отражений [6,7], с результатами ДТА и электрических свойств [2] дали почти совпадающие значения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Если, по аналогии с  $\text{Ag}_2\text{Te}$ , принять за одну фазу нормальную, а за другую — сверхпроводящую, то описанную методику можно применять и для ВТСП. Соответствующие массы при этом примут значения  $m_n$  и  $m_{cp}$ .

В данной работе рассмотрены результаты измерений температурных и полевых зависимостей сопротивления  $\rho(T, B)$  и термоэдс  $\alpha(T, B)$  керамических и кристаллических образцов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  [7-9]. На Рис.1 представлены зависимости  $\rho(T, B)$  и  $\alpha(T, B)$  [6]. На

Рис.2 приведены характерные зависимости  $\ln y \left( y = \frac{m_{co}}{m_n} \right)$  от  $T$  при  $B=0$  и  $B=2\text{Тл}$ .

Соответствующие массы  $m_{cp}$  и  $m_n$  определены из данных  $\rho(T, B)$  и  $\alpha(T, B)$ . По точке пересечения прямых с осью абсцисс (Рис.2) определены условные температуры  $T_0$ . Прямые на этом рисунке описываются выражением

$$Y = \exp(-a(T - T_0)), \quad (8)$$

где значение  $a$ , определенное из наклона прямых, является температурной постоянной перехода. Как видно, в указанных координатах на прямые ложатся точки не всего интервала ФП, что указывает на справедливость использованного метода определения  $m_{cp}/m_n$  для основной области ФП. Из этих данных наглядно видно, что от прямой отклоняются точки, относящиеся к области преждевременного уменьшения  $\rho$  и  $\alpha$ . Согласно Рис.2,  $T_0$  под действием магнитного поля в 2 Тл уменьшается на 5К (от 87,5 до 82,5К), а температурная постоянная  $a$  — на 33% (от 0,3 до 0,2).

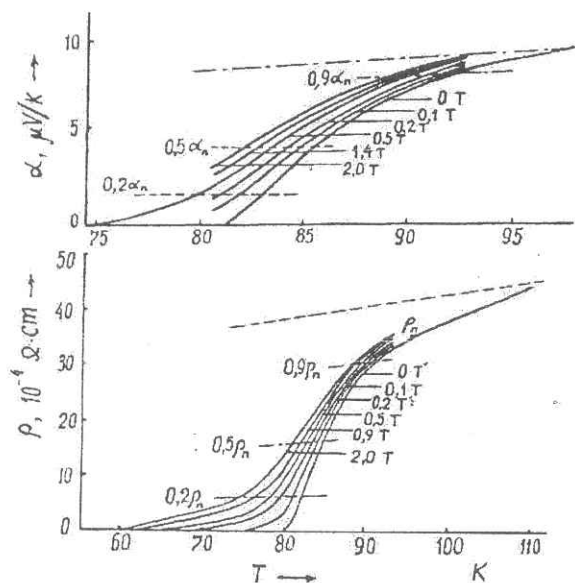


Рис.1.

Температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho(a)$  и термоэдс  $\alpha(b)$  при различных значениях магнитного поля.

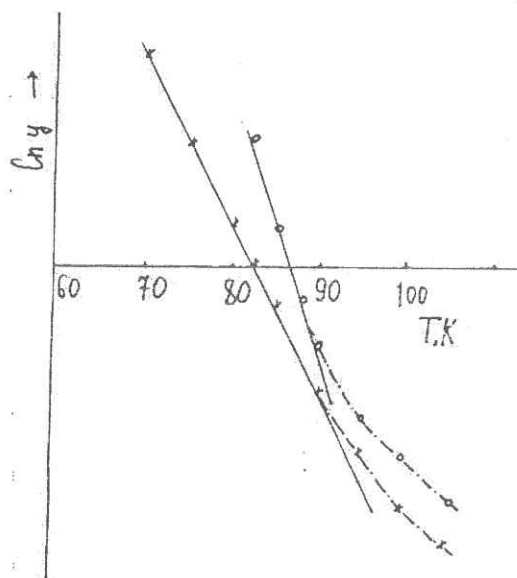


Рис.2.

Температурная зависимость  $\ln y$ .

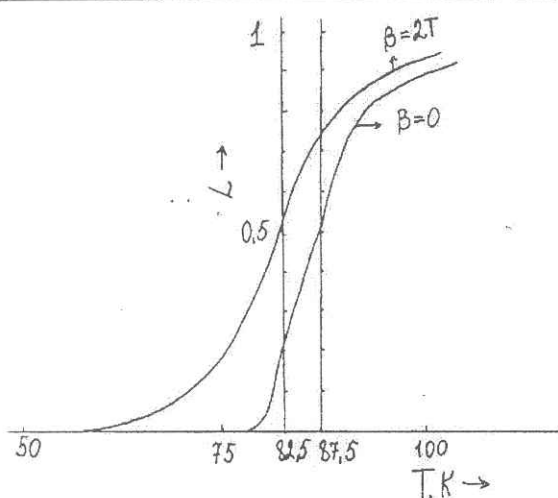


Рис.3.

Температурная зависимость  $L$ , рассчитанная по формуле (4).

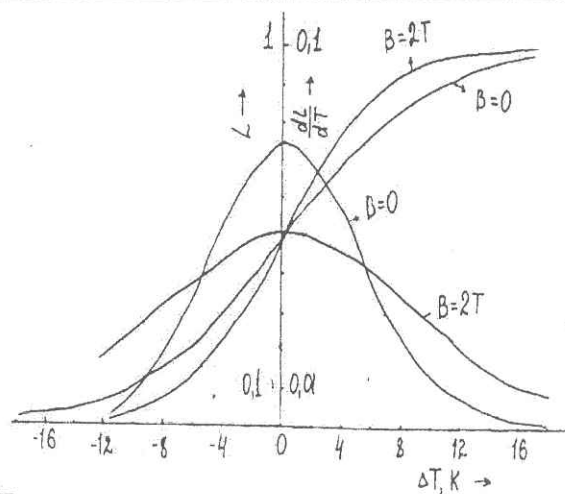


Рис.4.

Зависимости  $L$  и  $dL/dT$  от  $\Delta T$ , рассчитанные по формулам (3) и (6) соответственно.

На Рис.3 представлены температурные зависимости функции включения  $L(T)$  при  $B=0$  и  $B=2T$ , вычисленные по формуле (4). Ввиду отличающегося значения  $T_0$  при  $B=0$  и  $B=2T$ , кривые  $L(T)$  смещены, но при  $T_0$  они равны 0,5, что следует из теории [3]. Видно, что в магнитном поле низкотемпературная часть кривой  $L(T)$  сильно вытянута, она повсюду проходит выше, чем кривая  $L(T)$  в отсутствии магнитного поля. На Рис.4 представлены зависимости  $L$  от перепада температуры  $(T-T_0)$ , рассчитанные по формуле (3). При расчете были использованы соответствующие значения  $a$ . Как видно, эти данные более наглядно отражают роль магнитного поля в образовании источников приводящих к усилению размытия. Кривые  $L(T)$  достигают нулевого значения при температурах близких к соответствующим  $T_k$ . Из данных  $L(T)$ , рассчитанных по формуле (3), следует, что степень размытия ФП обратно пропорциональна значению  $a$ . Это наглядно видно из кривых  $dL/dT$ , представленных на Рис.4. Видно, что кривые  $dL/dT$  достигают максимального значения при  $\Delta T=0$ , причем значения в точке максимума всегда равны  $a/4$  [6]. В данном случае  $dL/dT$  при  $\Delta T_0=0$  и  $B=0$  равно 0,075, а при  $\Delta T=0$ ,  $B=2T$  - 0,05. Это означает, что в магнитном поле значительно уменьшается температурная скорость ФП. Кривая  $dL/dT$  при  $B=0$  обладает более острым пиком, резко уменьшается, охватывая более узкую область  $\Delta T$ . Наблюдается асимметрия при больших значениях  $\Delta T$ . Кривая  $dL/dT$  в магнитном поле более пологая, пересекает кривую при  $B=0$  и спадает значительно медленнее, причем низкотемпературная часть кривой отстает от нее больше, чем высокотемпературная. Безусловно, все данные указывают на возрастание степени размытости СП в магнитном поле.

Таким образом, на основании приведенных экспериментальных данных и результатов расчета можно заключить, что ФП в висмутовом ВТСП можно отнести к числу сильно размытых фазовых переходов. Физической природой размытости ФП в отсутствии магнитного поля могут служить неоднородности, связанные с наличием включения других СП фаз (в случае  $V_i$ -вых фазы 2201 и 2223), недостатком кислорода и др. [7-9]. Дефекты, приводящие к размытию в магнитном поле для всего класса ВТСП, обусловлены вихревым состоянием. Известно, что, начиная с очень слабых полей  $B_{c1}$  ( $B_{c1} \ll B_{c2}$ ), в СП II рода самопроизвольно возникают вихревые токи. При дальнейшем возрастании  $B$  размеры вихрей и величина потока магнитного поля остаются неизменными, увеличивается количество вихрей, образуя подобно атомам кристалла

правильную решетку (в сечении треугольной формы). Поэтому с ростом  $B$  возрастает и степень размытия.

1. С.А.Алиев, Ф.Ф.Алиев, Г.П.Пашаев, *Неорганические материалы*, **29** (1993) 1073.
2. С.А.Алиев, Ф.Ф.Алиев, З.О.Гасанов, *ФТТ*, **40** (1998) 1693.
3. Б.Н.Ролов, *Размытие фазовых переходов*, Рига, (1972) 311.
4. Б.Н.Ролов, *Изв. АН Латв ССР, сер. физ. техн. наук*, №4 (1983) 33.
5. К.П.Мамедов, М.Ф.Гаджиев, З.Д.Нуриева, *ДАН СССР*, **321** (1976) 94.
6. К.П.Мамедов, М.Ф.Гаджиев, З.Д.Нуриева, *ФТТ*, **19** (1977) 2196.
7. С.А.Алиев, В.М.Алиев, С.С.Рагимов и др., *Разрушение СП в висмутовых керамиках магнитным полем*, препринт №102, НПО космических исследований» Баку-1990.
8. S.A.Aliev, D.A.Bagirov, S.S.Ragimov et al. *J.Rare Earths*, №3 (1991) 1060.
9. S.A.Aliev, S.S.Ragimov and V.M.Aliev, *Fiz. Nizkich Temperatur.*, **22** (1996) 679.

### $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ –dә FAZA KEÇIDİNİN YAYINIQLIĞI HAQQINDA

S.A.ƏLİYEV, S.S.RƏHİMOV, V.M.ƏLİYEV

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_x$  –dә  $\rho(\beta T)$  və  $\alpha(\beta T)$  nəticələri yayılma faza keçidi (FK) nəzəriyyəsi əsasında təhlil edilmişdir. Faza keçidinin yayıniq dərəcəsinini xarakterizə edən parametr ( $a$ ), ifratkeçirici fazanın qəşulma funksiyası  $L(T)$  FK temperatur sür'əti  $dL/dT$  və  $T_0$  (hər iki fazanın bərabər olduğı temperatur) tə'yin edilmişdir. Vismut İK-dә faza keçidinin kəskin yayıniq olması köstərilmişdir. Maqnit sahəsinin tə'siri altında FK yayıniqlığının kəskin artması göstərilmişdir.

### On the DIFFUSIVITY of PHASE TRANSITION of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$

S.A.ALIEV, S.S.RAGIMOV, V.M.ALIEV

The magnitudes of  $\rho(\beta T)$  and  $\alpha(\beta T)$  of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  were interpreted according to diffusive phase transition (FT). The parameters:  $a$  – the degree of PT diffusivity,  $L(T)$  – the SC including function,  $dL/dT$  – the temperature rate of PT and  $T_0$ , the temperature when both of phase are equal, were determined. Character of PT of Bi-based SC was shown to be strongly diffusive. The diffusivity degree of PT was established to be increasing.

Редактор: А.Халилова