

## ДИАГНОСТИКА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*В.П. Коверя, С.И. Бондаренко*

*Физико-технический институт низких температур НАНУ, г. Харьков, Украина;  
E-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua; тел. +38 (057) 341-09-33*

Зависимости величины локально замороженного магнитного поля от значения внешнего локального поля возбуждения планарных керамических и пленочных образцов соединения  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  позволяют установить неоднородность распределения как критического тока в образце, так и сверхпроводящего тока в нем, если он находится в докритическом состоянии. Эксперименты выполнены в жидком азоте ( $T = 77$  К). Диаметр области замораживания локального поля составил 0,5 мм.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологиям разработки и приготовления современных и перспективных сверхпроводников, в частности высокотемпературных (ВТСП), часто сопутствует возникновение пространственной неоднородности сверхпроводящих свойств получаемых образцов, связанной со сложностью технологического процесса и самих многокомпонентных соединений. Это приводит к появлению в образце локальных участков с различным значением критических параметров, например, критического тока. Обнаружение этих участков и определение величины их критического тока является актуальной задачей [1,2]. С другой стороны, даже в совершенных, достаточно однородных образцах сверхпроводников, находящихся в докритическом и закритическом состояниях, распределение сверхпроводящего тока по образцу зависит от такого множества факторов, что получение расчетных формул становится затруднительным и требует постановки специальных измерений. При этом наиболее предпочтительными методами измерений являются бесконтактные.

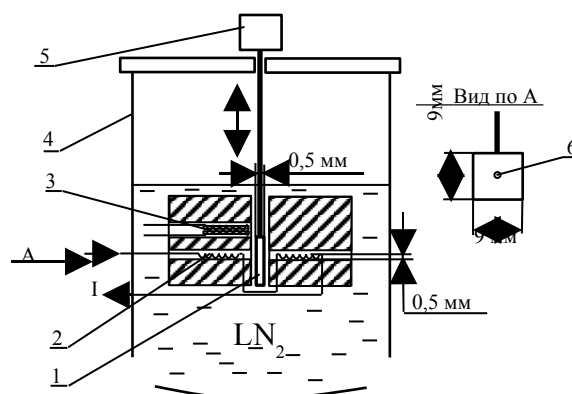
В последние годы несколько научных групп исследуют локально замороженное магнитное поле (ЗМП) в сверхпроводниках [3,4,5]. Исследования ведутся с планарными ВТСП-образцами керамики и тонких пленок. Как будет показано в данной работе, формируя в заданной области образца локальное ЗМП и изучая его параметры, можно получить бесконтактным методом необходимую информацию о распределении критического тока в образце, а в докритическом состоянии – о распределении сверхпроводящего (в нашем случае – мейснеровского) тока.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились в криостате с жидким азотом при температуре 77 К. Измерительная ячейка (рис. 1) с корпусом, изготовленным из текстолита, размещена в жидком азоте и содержит источник локального ( $H_{e,l}$ ) и однородного ( $H_{e,o}$ ) полей возбуждения, детектор ЗМП и исследуемый образец в виде квадратной (4x4 мм) пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с толщиной 0,3 мкм или квадратной (9x9 мм) пластины керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с толщиной 0,5 мм. Сверхпроводящие параметры керамики подобны описан-

ным в [4]. Критическая температура пленки составляет  $T_c = 88,7$  К, плотность критического тока пленки – около  $10^6$  А/см<sup>2</sup> при температуре 77 К [6]. Пленка изготовлена в отделе сверхпроводимости ИФМ НАН Украины методом “off-axis DC magnetron sputtering” на подложке из монокристаллического сапфира (R-срез) с буферным слоем  $CeO_2$  толщиной 30...40 нм (прямое RF магнетронное распыление).

Образец связан тягой с микрометрическим винтом, расположенным на фланце криостата, и может перемещаться в вертикальном направлении внутри ячейки.



*Рис. 1 Схема экспериментальной ячейки, расположенной в азотном криостате: 1 – образец в виде пластины керамики или пленки; 2 – микросоленоид; 3 – датчик феррозондового магнитометра; 4 – сосуд Дьюара; 5 – микрометрический винт; 6 – положение токовихревой структуры, поддерживающей замороженное магнитное поле в образце*

Источником  $H_{e,l}$  являлся составной микросоленоид с диаметром 0,5 или 3 мм, имеющий малый зазор (около 0,6 мм) в центральной части для перемещения в нем подложки с пленкой или пластины из керамики. Источником однородного поля являются катушки Гельмгольца, намотанные медным проводом на корпус ячейки. Детектором ЗМП служит феррозондовый магнитометр, описанный в [5]. Поворот криостата около вертикальной оси позволяет

устанавливать плоскость образца параллельно горизонтальной компоненте магнитного поля Земли. При этом перпендикулярная к плоскости образца компонента этого поля равна нулю (с точностью до  $10^{-2}$  Э), что позволяет исключить ее влияние на токи, возбуждаемые локальным перпендикулярным к поверхности образца полем возбуждения. С помощью микросолеоида можно длительно без его перегрева создавать в любой точке на оси образца локальное постоянное поле возбуждения до 120 Э.

С помощью катушек Гельмгольца можно было создавать постоянное поле до 60 Э.

Для изучения величины локального ЗМП, сформированного в режиме ZFC (ЗМП-ZFC) в зависимости от  $H_{e,l}$ , образец охлаждался до 77 К без поля возбуждения, когда влияние магнитного поля Земли было исключено вышеописанным способом. Затем в центре образца создавалось с помощью микросолеоида постоянное поле возбуждения с заданным значением. После выключения поля образец перемещался в область расположения детектора и регистрировался максимум ( $H_z$ ) вертикальной компоненты ЗМП над центром образца. Для получения  $H_z$  при другом значении поля возбуждения ячейка с образцом поднималась выше уровня жидкого азота в паровую область криостата, отогревалась до температуры выше, чем  $T_k$  и вновь погружалась в жидкий азот. При формировании ЗМП внешним однородным полем оно изменялось подобным же образом. При этом величина возникающего ЗМП измерялась над центром пленки. Экспериментальная установка позволяет включать и выключать однородное и локальное поле как независимо, так и одновременно.

Полученные данные измерений позволяют построить зависимости  $H_z(H_{e,l})$  и  $H_z(H_{e,o})$  для ЗМП-ZFC.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены два вида экспериментов для ЗМП-ZFC: 1) измерение зависимостей  $H_z(H_{e,l})$  ве-

личины локального ЗМП, созданного в различных точках образца керамики, от величины локального поля возбуждения; 2) измерение зависимостей  $H_z(H_{e,l})$  величины ЗМП в керамике и пленке от величины локального поля возбуждения при различных величинах одновременно подаваемого внешнего однородного поля ( $H_{e,o}$ ), не превышающего его критическое значение ( $H_{e,k,o}$ ).

Результаты первого эксперимента приведены на рис.2. Как видно, зависимости  $H_z(H_{e,l})$  характеризуются величиной критического поля начала замораживания  $H_{e,k,l}$  близким к линейному участком роста ЗМП и, наконец, участком насыщения. Зависимости  $H_z(H_{e,l})$  для разных точек на оси образца смещены в большей или меньшей степени друг от друга по оси значений поля возбуждения. Кроме того, видна корреляция между величинами  $H_{e,k,l}$  и величиной насыщения ЗМП ( $H_{zn}$ ). Меньшим величинам  $H_{e,k,l}$  соответствует меньшая величина  $H_{zn}$ . На расстоянии всего в 4 мм эти величины меняются в 2...2,5 раза.

До проведения второго эксперимента в образцах керамики и пленки внешним однородным полем ( $H_{e,o}$ ) формировалось ЗМП, строились зависимости  $H_z(H_{e,o})$  и из них определялась величина критического поля ( $H_{e,k,o}$ ) начала замораживания в этих образцах. Она оказалась равной для керамики около 1 Э, а для пленки около 2 Э. Таким образом, при подаче однородного поля возбуждения меньшего, чем указанные значения, в образце генерируется экранирующий мейсснеровский ток с некоторым распределением в плоскости образца, но не происходит замораживание. При проведении второго эксперимента однородное внешнее поле подавалось одновременно с локальным. Затем строились зависимости  $H_z(H_{e,l})$  локального ЗМП при различных величинах однородного поля, не превышающих для керамики и пленки соответственно 1 и 2 Э. Результаты приведены на рис. 3, 4.

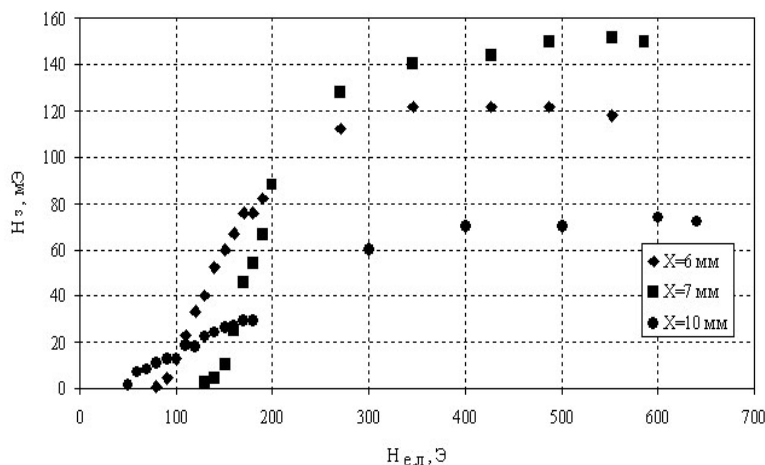


Рис.2. Зависимости величины локального (с диаметром 0,5 мм) ЗМП ( $H_z$ ) в трех точках на оси керамической пластины ( $X = 6, 7, 10$  мм) от величины  $H_{e,l}$

Как видно из рис.3, однородное поле оказывает существенное влияние на замораживание поля в керамике, уменьшая локальное критическое поле

вплоть до нуля по мере роста однородного поля. В противоположность этому влияние однородного поля на локальное критическое поле пленки и зави-

симость  $H_3(H_{e,l})$  в целом существенно меньше (рис. 4).

Результаты экспериментов первого типа можно объяснить неоднородностью плотности исследуемой керамики, что может приводить к неоднородности критического тока отдельных участков керамики [7,8]. В свою очередь, это соответствует неоднородности распределения плотности критического тока ( $j_k$ ), если считать, что толщина ( $t$ ) образца одинакова во всей области замораживания локального поля. Наши исследования ЗМП показывают [9], что локальное значение  $j_k$  может быть связано с критическим полем  $H_{ск,л}$  начала замораживания соотношением:

$$H_{ск,л} = L_3 j_k t / (2 \mu_0 k d), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м,  $d$  - диаметр области локального ЗМП, приблизительно равной диаметру микросоленида ( $d = 0,5$  мм);  $k = 2$ ;  $L_3$  - эффективная индуктивность токовихревой структуры, поддержива-

ющей ЗМП ( $L_3 \approx 6 \times 10^{-8}$  Гн). Оценка величины  $j_k$  с помощью соотношения (1) в трех упомянутых точках замораживания поля дает значения 27, 40, 62 А/см<sup>2</sup>. Заметим, что интегральное значение плотности критического тока образца керамики, определенное четырехзондовым методом, составило 30 А/см<sup>2</sup>.

Наконец, обсудим результаты второго эксперимента. Объяснение различного для керамики и пленки влияния однородного поля возбуждения на величину локального критического поля может быть основано на предположении о различном распределении сверхпроводящего мейснеровского тока, возбуждаемого в этих образцах при воздействии однородного внешнего поля, меньшего, чем его критическое значение. Если в керамике, обладающей малой плотностью критического тока (30 А/см<sup>2</sup>) и представляющей джозефсоновскую среду, этот ток распределяется более или менее однородно по образцу, то в данной пленке с высокой плотностью

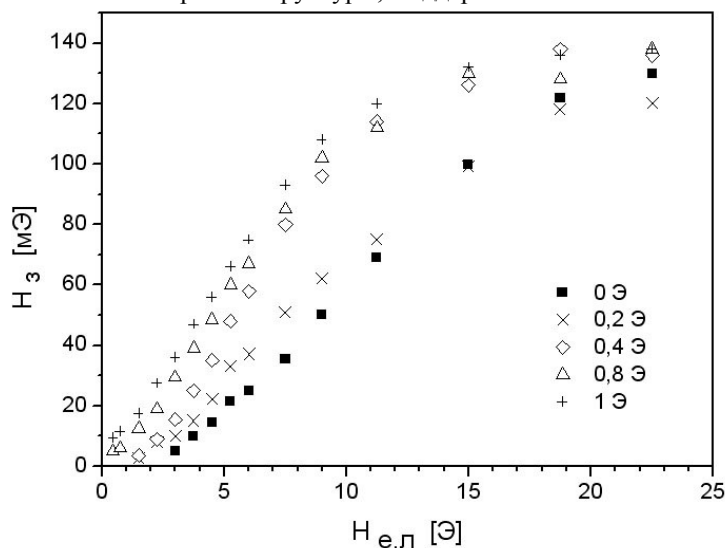


Рис.3. Зависимости величины локального ЗМП в центре керамического образца от локального (с диаметром воздействия 3 мм) поля возбуждения при различных уровнях однородного поля возбуждения (0...1 Э), не превышающего однородное критическое поле керамики (1 Э)

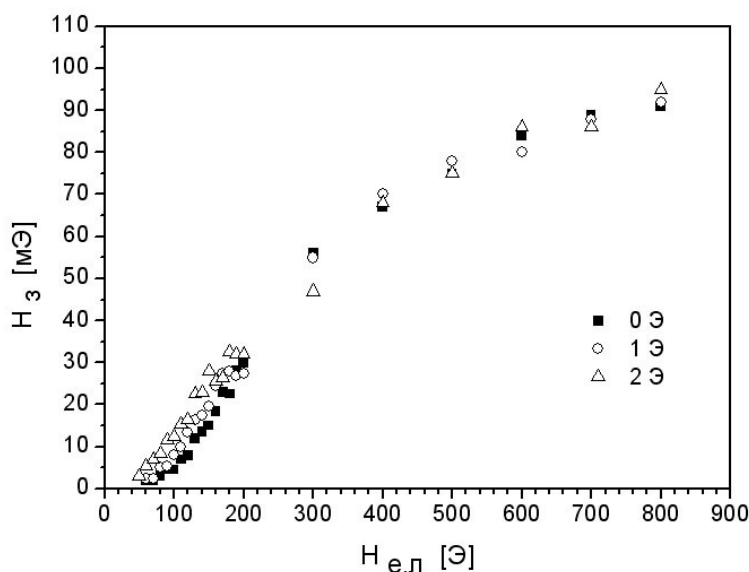


Рис.4. Зависимости величины локального ЗМП в центре пленочного образца от локального поля возбуждения при различных значениях однородного поля возбуждения (0...2 Э), не превышающих величины однородного критического поля пленки (2 Э)

критического тока (порядка  $10^6$  А/см<sup>2</sup>) этот ток должен в основном концентрироваться на краях. В результате центральная часть пленки практически свободна от этого тока и замораживание локального

поля в центре слабо ощущает влияние однородного поля. Наоборот, мейснеровский ток в керамике достаточно заметен и в центре образца, он складывается с локальным током, поддерживающим ЗМП, и

способствует достижению критического значения тока в локальной области образца при меньшем локальном поле. Этим и объясняется заметное уменьшение локального критического поля керамики при наличии однородного поля возбуждения.

В прикладном отношении обнаруженное влияние мейсснеровского тока (или сверхпроводящего тока другого происхождения) на локальное критическое поле замораживания может быть использовано для бесконтактного измерения распределения сверхпроводящего тока в различных точках образца без использования дорогостоящего сканирующего магнитного микроскопа.

### ВЫВОДЫ

Экспериментально продемонстрирована возможность обнаружения и измерения неоднородной плотности критического тока ВТСП-керамики и распределения сверхпроводящего тока в керамике и тонкой пленке  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с помощью локально замороженного магнитного поля.

Локальное замораживание магнитного поля может быть еще одним бесконтактным магнитным методом исследования свойств сверхпроводников (в первую очередь высокотемпературных).

### ЛИТЕРАТУРА

1. H.Yamasaki, Y.Mawatari, Y.Nakagawa, H.Yamada. Nondestructive, Inductive Measurement of Critical Current Densities of Superconducting Films in Magnetic Fields // *IEEE Trans.on Applied Superconductivity*. 2003, v.13, №2, Part III, p.3718-3721.

2. А.П.Журавель, А.Г.Сиваков, О.Г.Турутанов, А.Н.Омельянчук, И.М.Анлаге, А.В.Лукашенко, Д.В.Абраимов. Лазерная сканирующая микроскопия ВТСП пленок и устройств // *ФНТ*. 2006, т.32, №6, с.775.
3. Brian W. Gardner, Janice C.Wynn, D.A.Bonn, Ruixing Liang, W.N.Hardy, John R. Kirtley, Vladimir Kogan, and Kathryn A.Moler. Manipulation of single vortices in  $YBa_2Cu_3O_{6.354}$  with a local applied magnetic field // *Appl. Phys. Lett.* 2002, v.80, №6, p.1010.
4. С.И.Бондаренко, А.А. Шабло, В.П. Коверя. Исследование локально замороженного магнитного поля в ВТСП-керамике // *ФНТ*. 2006, т. 32, № 7, с.825.
5. С.И.Бондаренко, А.А. Шабло, В.П. Коверя, Д.Ю.Фомин. Локально замороженное магнитное поле в ВТСП-керамике // *Изв. РАН (сер. физическая)*. 2007, т. 71, № 8, с.1162.
6. В.М. Пан. Сверхток плотностью выше  $10^6$  А/см<sup>2</sup> при 77К в монокристаллическом пленочном проводнике из ВТСП купрата  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  – мечта или реальность? // *ФНТ*. 2006, т.32, №8/9, с.1029.
7. *Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников* / Под ред. Д.М. Гинзберга. М.: “Мир”, 1990.
8. Е. З. Мейлихов. Структурные особенности ВТСП - керамик и их критический ток и вольт-амперная характеристика // *УФН*. 1993, т.163, № 3, с.42.
9. В.П. Коверя, С.И. Бондаренко. Особенности локального замораживания магнитного поля в пленке  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  // *ФНТ* (в печати).

## ДІАГНОСТИКА НАДПРОВІДНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛОКАЛЬНОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

*В.П. Коверя, С.І. Бондаренко*

Залежності величини локально замороженого магнітного поля від значення зовнішнього локального поля збудження планарних керамічних і плівкових зразків сполуки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  дозволяють встановити неоднорідність розподілу як критичного струму в зразку, так і надпровідного струму в ньому, якщо він знаходиться в докритичному стані. Експерименти виконані в рідкому азоті ( $T=77$  К). Діаметр області заморожування локального поля склав 0,5 мм.

## DIAGNOSTICS OF SUPERCONDUCTIVITY BY MEANS OF LOCAL MAGNETIC FIELD FREEZING

*V.P. Koverya, S.I. Bondarenko*

The dependences of a value of local frozen magnetic field on a value of external local excitation field of plane ceramic and film samples of  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  compound allows to recognize the non uniformity of the distribution of sample critical current or superconducting current if the sample is as far as critical state. The experiments have been made into liquid nitrogen ( $T=77$  K). The diameter of the region with local frozen field is 0,5 mm.