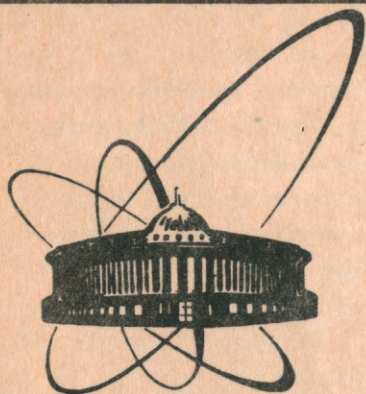


91-259



**сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна**

P13-91-294

А.Р.Буев\*, Н.Л.Истомин\*, А.В.Сермягин,  
Е.А.Силаев, С.В.Учайкин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВТСП-КЕРАМИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ  
С ПОМОЩЬЮ ФЕРРОЗОНДОВОГО ТЕСЛАМЕТРА**

---

\*ОКТБ "Кристалл", г.Йошкар-Ола

Бувев А.Р. и др.

P13-91-294

Исследование ВТСП-керамических экранов с помощью феррозондового тесламетра

С помощью феррозондового тесламетра при температуре жидкого азота проведены исследования полых цилиндрических экранов, изготовленных из различных ВТСП-керамик. Определены критические параметры экранов, изучено поведение экранов при полях, превышающих критические. Сделан вывод о возможности применения ВТСП-экранов, работающих при температуре жидкого азота.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Buev A.R. et al.

P13-91-294

The Study of the HTSC Ceramic Shields with Fluxgate  
Teslameter

With the fluxgate teslameter at liquid nitrogen temperatures the investigations of the tube shields made of different HTSC ceramics were carried out. The critical parameters of the shields were determined, the behaviour of the shields in the fields exceeding critical were studied. The conclusion on possible application of HTSC shields operating at liquid nitrogen temperatures has been made.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991

Электрические и магнитные свойства сверхпроводников (СП) открыли уникальные возможности для прогресса в самых различных областях науки и техники, в частности, в технике специальных физических измерений. С одной стороны, коллективные квантовые эффекты сверхпроводимости позволили создать сверхчувствительные устройства для измерения слабых магнитных полей. С другой стороны, металлические сверхпроводники и, особенно, открытые в последние годы высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) оксидные керамики позволяют осуществлять эффективное электромагнитное экранирование.

Задача работы заключалась в получении экспериментальных оценок критических полей для цилиндрических экранов из ВТСП оксидных керамик различного состава с целью подбора подходящего экземпляра в качестве электромагнитного экрана СКВИД-гальванометра.

#### ЭКРАНЫ ИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Физической основой работы СП-экранов является эффект Мейсснера-Оксенфельда [1]. Внешнее магнитное поле убывает в сверхпроводнике согласно закону

$$B(x) = B(0) \cdot \exp(-x/\lambda),$$

где  $B(0)$  - магнитная индукция на поверхности сверхпроводника;  
 $x$  - расстояние от поверхности;  
 $\lambda$  - лондоновская глубина проникновения.

Для низкотемпературных сверхпроводников  $\lambda \approx 10^{-7}$  м, поэтому слабые поля в сверхпроводник обычных размеров практически не проникают.

Если величина внешнего поля сравнима со значением критического поля СП, он может перейти в промежуточное состояние. При этом образец разбивается на чередующиеся

сверхпроводящие и нормальные области, и в него проникает магнитное поле. Поле, при котором образец из сверхпроводника переходит в промежуточное состояние, определяется его формой и критическими свойствами материала. Для экрана в виде цилиндра с плоским дном и отношением внутреннего диаметра к внешнему более 0.707 это поле (перпендикулярное оси цилиндра) можно определить по соотношению [2,3]:

$$H_{II} = H_C \cdot ((1 - (b/a)^2) / 2)^{1/2},$$

где  $H_C$  - критическое поле сверхпроводящего материала;  
 $a, b$  - внешний и внутренний диаметры цилиндра.

Напряжённость аксиального поля, при котором толстостенный цилиндр переходит в промежуточное состояние, приближённо равна критическому полю материала:

$$H_a \approx H_C.$$

Для низкотемпературных материалов значение  $H_C$  ( $H_{1C}$  для сверхпроводников второго рода) при температуре жидкого гелия обычно достигает величин десятков и сотен эрстед, и даже тонкостенные экраны в земном поле не переходят в промежуточное состояние. Например, в нашей лаборатории из свинцовой фольги толщиной 0,3 мм изготавливались цилиндрические экраны размером 150x13 мм для СКВИД-магнитометров с ослаблением внешних магнитных полей более чем в  $10^8$  раз [4]. Ограничения на коэффициент экранирования накладывало поле, проникающее через горловину экрана.

Поскольку значения  $H_C$  низкотемпературных сверхпроводников высоки, при экранировании земных полей такими СП-экранами основные трудности заключаются в уменьшении "замороженного" магнитного поля. Для этого либо уменьшают напряжённость магнитного поля, в котором охлаждается СП-экран, либо оптимизируют режимы охлаждения экранов.

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СП-ЭКРАНЫ

С открытием высокотемпературной сверхпроводимости появилась возможность создания СП-экранов, работающих при температуре жидкого азота. ВТСП имеют существенные отличия от обычных сверхпроводников, в первую очередь вследствие их гранулированной структуры и джозефсоновских свойств межгранульных границ. Экранирующие свойства ВТСП-керамик можно связать с величиной  $H_{1CG}$  - первым критическим полем межгранульных связей, при котором начинается проникновение магнитного поля в ВТСП. Типичные значения  $H_{1CG}$  - несколько эрстед, что сравнимо с земным полем. Величина  $H_{1CG}$  сильно зависит от технологии приготовления образца, в первом приближении она растет с ростом транспортного критического тока материала [5,6].

Экранирующие свойства ВТСП-керамик изучались на плоских образцах - см., например, работы [7-9], и образцах цилиндрической формы [10-13]. Исследования плоских образцов показали, что ВТСП-экраны могут успешно конкурировать с экранами из меди на частотах до сотен килогерц [8,9] и с экранами из  $\mu$ -металла начиная с области очень низких частот [8]. При этом отмечается улучшение экранирующих свойств с увеличением критических параметров сверхпроводников [7]. Исследования цилиндрических образцов показали, что такими экранами можно уменьшить постоянное магнитное поле до очень малых величин и, возможно, вплоть до "магнитного вакуума". Видимо, наибольшее значение аксиального экранируемого поля, 6,5 Э, было достигнуто на образце из  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  в [13].

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКРАНОВ

Нами исследовались экраны, выполненные в форме цилиндра с дном, длиной 90 мм, внешним диаметром 25 мм и толщиной стенок 3 мм, изготовленные из иттриевой ВТСП-керамики с добавлением серебра и из висмутовой керамики. Допирование серебром иттриевой керамики повышает её критические параметры, что должно улучшить качество экранов из этого материала. Керамика

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}xAg$  приготавливалась традиционным механокерамическим способом из порошков оксидов. На завершающем этапе в порошок ВТСП добавлялся порошок сплава  $Ag-Sn-Cu$  (70% Ag) в количестве 9-11%. Смесь тщательно перемешивалась и прессовалась гидростатически в эластичной форме при давлении 7-10 кбар. Затем прессовка спекалась при температуре 950-960 °С в течение 6-8 час и подвергалась окислительному отжигу при температуре 400 °С в токе кислорода в течение 4-6 час.

Экраны из висмутовой керамики системы 2223 изготавливались аналогичным способом, спекались при температуре 840-850 °С в течение 20-30 часов, охлаждались со скоростью 1 °С/мин до комнатной температуры в воздушной атмосфере. Плотность критического тока, измеренная в коротких образцах-свидетелях, при 77 К и 0 Гс, составляла: для иттриевого (допированного серебром) ВТСП 300-400 А/см<sup>2</sup>, для висмутового ВТСП 80-150 А/см<sup>2</sup>.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки изображена на рис.1.

Керамический экран 1 с феррозондовым датчиком 2 помещался внутри соленоида 3, задававшего внешнее поле. Соленоид на штанге опускался в азотный дьюар 4. Вся система располагалась внутри установленного вертикально двухслойного цилиндрического ферромагнитного экрана 5 с коэффициентом ослабления земного магнитного поля около 100.

Феррозондовый датчик применялся для измерения магнитного поля внутри керамического экрана. Здесь использовался трёхмоточный феррозонд стержневого типа [14] на двух ленточных сердечниках из аморфного материала  $CoFe_5Si_{10}B_{15}$  размерами 30x0,5x0,02 мм каждый. Этот датчик был подключён к измерительному преобразователю 6, осуществлявшему подачу перематнивающего тока в обмотку возбуждения феррозонда и съём сигнала с его измерительной обмотки. Измерительный преобразователь аналогичен описанному в [15]. Отличие заключалось только в параметрах цепи отрицательной обратной связи, что вызвано необходимостью измерять повышенные значения



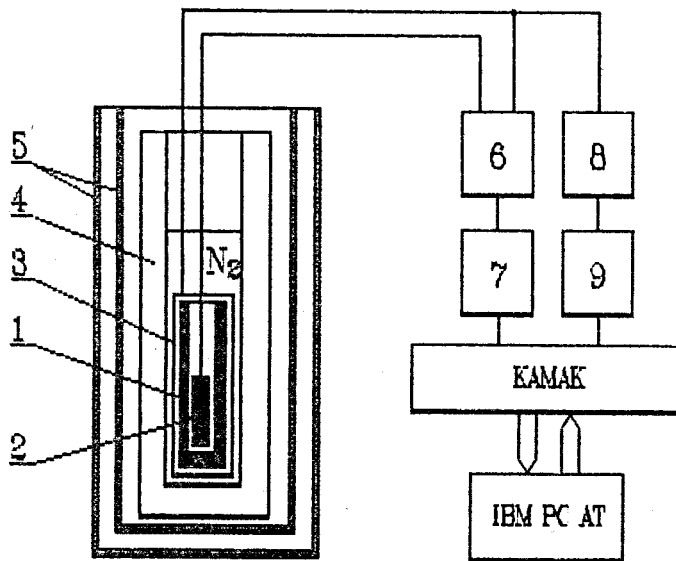


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

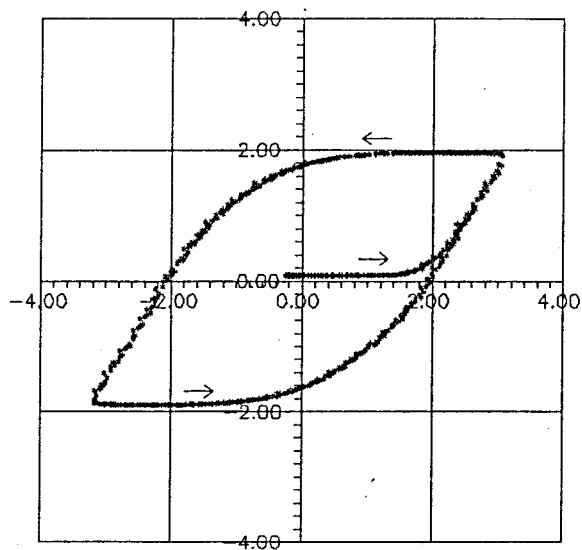


Рис. 2. Измерения индукции внутри экрана, изготовленного на основе висмутовой керамики. По оси абсцисс отложены значения напряженности внешнего поля, Э, по оси ординат - индукция внутри экрана, Гс.

индукции магнитного поля. Выход преобразователя был подключён к одному из входов мультиплексора аналого-цифрового преобразователя АЦП 7.

Соленоид 3 подключён к генератору тока 8, посредством которого можно было устанавливать требуемое значение магнитного поля. Напряжение, пропорциональное установленному току соленоида, подавалось на второй вход АЦП. Генератор тока управлялся с выхода цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) 9. АЦП и ЦАП, выполненные в системе КАМАК, обменивались информацией через крейт-контроллер с компьютером типа IBM PC/AT.

Эксперимент заключался в измерении индукции магнитного поля внутри ВТСП-оксидного керамического экрана как функции приложенного внешнего магнитного поля. Перед началом охлаждения подбором тока соленоида внутри керамического экрана устанавливалось поле с близкой к нулю аксиальной компонентой, после чего в дьюар постепенно заливался жидкий азот. Измерения проводились после окончания процессов охлаждения.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты измерения индукции внутри ВТСП-экрана, изготовленного на основе висмутовой керамики. Керамика характеризуется низким уровнем критического поля порядка одного эрстеда, цикл перемагничивания симметричен.

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость индукции внутри ВТСП-экрана, изготовленного из иттриевой керамики с добавлением серебра, от внешнего поля. Данная керамика имеет значительно более высокое значение критического поля, около 12 Э, и может быть использована для экранирования земного магнитного поля.

Интересно было получить ответ на вопрос: не проникает ли со временем магнитное поле в ВТСП-экран? В связи с этим были проведены долговременные измерения поля внутри экрана, изготовленного на основе иттриевой керамики с добавлением серебра, при фиксированном значении внешнего магнитного поля.

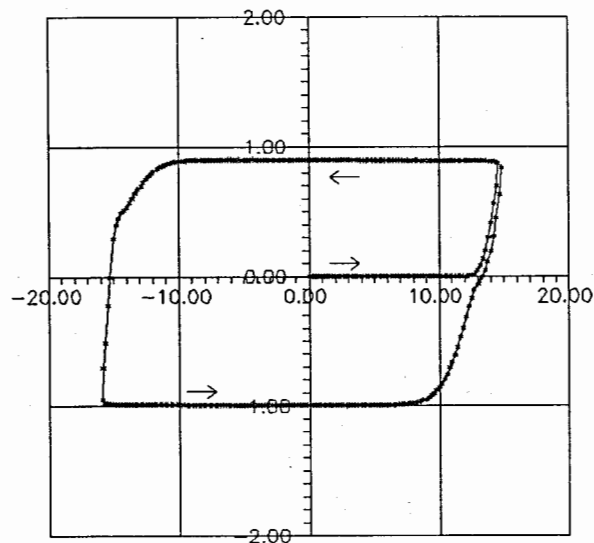


Рис. 3. Измерения индукции внутри экрана, изготовленного на основе иттриевой керамики с добавлением серебра. Единицы измерения те же, что и на рис. 2.

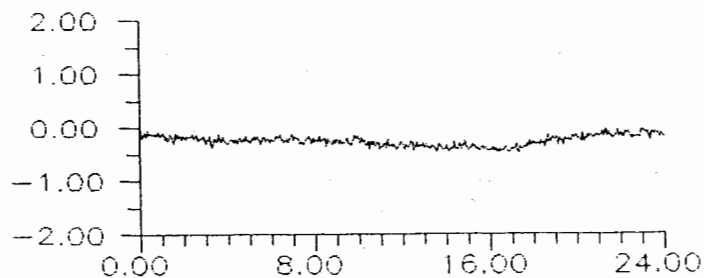


Рис. 4. Измерения индукции внутри экрана, изготовленного на основе иттриевой керамики с добавлением серебра. По оси абсцисс - время в часах, единица оси ординат соответствует  $10^{-3}$  Гс. Напряженность внешнего поля 6 Э. Начало координат соответствует 21 часу московского времени.

Экран постепенно охлаждался до температуры жидкого азота в "нулевом" внешнем магнитном поле, после чего аксиальная компонента внешнего магнитного поля устанавливалась равной половине значения напряженности поля "пробоя" экрана, 6 Э. Результаты представлены на рис. 4. Как можно увидеть, за 24 часа в пределах погрешности измерений поле внутри экрана не изменилось.

Полученные результаты характеризуют проникновение аксиальной компоненты статического магнитного поля в сверхпроводящий экран, в интервале значений вблизи нижнего критического поля,  $H_{1CG}$ . Цилиндрические экраны, изготовленные на основе иттриевой керамики, допированной серебром, имеют удовлетворительные критические свойства. Такие экраны могут быть использованы для экранирования земного магнитного поля при создании различных экспериментальных установок, в частности СКВИД-гальванометра.

Авторы выражают признательность Б.В. Васильеву за постановку задачи, В.И. Дмитриеву и И.А. Жукову за изготовление каркасов, С.С. Тихомировой за намотку катушек, Ле Хан Хьепу и Н.А. Яковенко за полезные обсуждения и помощь в проведении экспериментов.

#### Литература

1. Meissner W., Ochsenfeld R. Naturwissenschaften, 1933, 21, 787.
2. Serin B., Gittleman J., Lynton E.A. The Transition into the Intermediate State of Hollow Superconducting Cylinders. Phys. Rev., 1953, v.92, 3, 566-568.
3. Бондаренко С.И., Шермет В.И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1982, 74.
4. Б.В. Васильев, В.К. Игнатович, Е.В. Колычева. Экранирование слабых магнитных полей сверхпроводящими оболочками. Журнал технической физики, т. 48, в. 9, стр. 1934.
5. Clem J.R. Physica C, 1988, v.153-155, 50-55.

6. Мейлихов Е.З. Диамагнитные свойства ВТСП-керамик. Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1989, т.2, 9, 5-28.
7. Okada T., Takahata K., Nishijima S. Applicability of Oxide Superconductor to Magnetic Shielding. IEEE Trans. on Magn., 1989, v.25, 2, 2270-2272.
8. Ohshima S., Okuyama K. Magnetic Shielding Effect of  $Ba_2YCu_3O_{7-\delta}$  Plates. Jpn. J. Appl. Phys., 1990, v.29, 11, 2403-2406.
9. Russel G.J., Taylor K.N.R. The Shielding Effectiveness of Yttrium Barium Cuprate Superconductors. J. Appl. Phys., 1989, v.66, 11, 5498-5402.
10. Willis J.O., McHenry M.E., Maley M.P., and Sheinberg H. Magnetic Shielding by Superconducting Y-Ba-Cu-O Hollow Cylinders. IEEE Trans. on Magn., 1989, v.25, 2, 2502-2505.
11. Заварицкий В.Н., Заварицкий Н.В. Сверхпроводящие интерференционные магнитометры и магнитные экраны из керамики  $YBa_2Cu_3O_7$ , работающие при азотных температурах. Письма в ЖТФ, т.14, 1791-1794.
12. Shigematsu K., Ohta H., Hoshino K., Takayama H., Yagishita O., Yamazaki S., Takahara H., and Aono M. Magnetic Shield of High- $T_C$  Oxide Superconductors at 77K. Jpn. J. Appl. Phys., 1989, v.28, 5, L813-L815.
13. Gui G.J., Wang S.G., Jiang H.M., Li J.Z., Li C.Y., Lin C.D., Liu R.Z., Zheng Q.L., Fu Y.S., Luo Z.L., Qiao W.C. A Superconductive Shielding can for High  $T_C$  SQUID. IEEE Trans. on Magn., 1989, v.25, 2, 2273-2275.
14. Ю.В.Афанасьев. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
15. Е.А.Силаев. Измерительный преобразователь феррозондового тесламетра. Сообщение ОИЯИ, P13-90-558, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел.  
27 июня 1991 года.