

05.4;12

©1994

## ТОКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ КЕРАМИКИ С БОЛЬШИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ТОКАМИ

*В.Ю.Таренков, Б.И.Перекрестов,  
А.И.Дьяченко, А.В.Василенко*

Хотя природа высокотемпературной сверхпроводимости до сих пор еще не выяснена до конца, однако уже можно говорить о практическом применении изделий из ВТСП. Нами разработаны и реализованы способы изготовления керамических ВТСП изделий различного профиля и сечения с рабочим током в несколько сот ампер [1,2]. Подобные изделия могут найти применение в токоподводах для запитки больших магнитных систем, работающих при температурах жидкого гелия. Замена металлических токоподводов в токовой цепи сверхпроводящего соленоида на токоподводы из ВТСП, работающие в бездиссипативном режиме, позволит значительно снизить расход жидкого гелия и сделает эксплуатацию гелиевых систем более рентабельной.

Основными источниками поступления тепла в объем с криогенной жидкостью от токовой цепи соленоида являются джоулево тепло и теплоподвод, обусловленный теплопроводностью материала токовводов. При использовании токоввода из сверхпроводника диссипация энергии, связанная с протеканием тока, устраняется, однако приток тепла за счет теплопроводности остается. Для ВТСП керамики этот источник тепла крайне мал в области низких температур [3], но при более высоких (близких к азотным) температурах теплопроводностью керамики уже нельзя пренебрегать. Цель этой работы — исследование транспортных характеристик макетного образца токоввода, определение теплопроводности керамического изделия в условиях теплообмена в среде газообразного гелия и сравнение ее с теплопроводностью образца аналогичной геометрии из меди — материала, широко применяемого в криогенной технике.

Конструктивно токовводы выполнены в виде цилиндрических керамических трубок с наружным диаметром 4–20, толщиной стенки 0.3–0.4 и длиной 150–200 мм. Изделия получены из порошка синтезированной висмутовой керамики фазы 2223, содержащего пластифицирующие добавки

(5–10% объемных), который экструдировался через матрицу, придающую изделию нужную форму. Другой способ получения плотно скомпактированных трубчатых керамических изделий — это опрессовка порошка гидростатическим давлением 6 кбар в разъемной форме, состоящей из внутреннего стержня и разрезной трубы. В работе оба этих способа показали хорошие результаты. Скомпактированное изделие после нанесения серебряной пастой токовых и потенциальных контактов спекалось при температуре 850°C в течение 24 ч. Затем, для получения большой плотности керамики, гидростатическое обжатие повторяли при давлении 5–6 кбар. Дальнейшая термообработка проводилась в две стадии: 12 ч при  $T = 850$ , затем 14 ч при  $T = 835$ °C.

Исследованные образцы имели высокую плотность, составляющую 90% от рентгеновской, чему способствовало не только применение высоких давлений, но и малая толщина стенок трубки, при которой в прессуемых изделиях не возникает так называемый “арочный” эффект, приводящий к образованию внутренних замкнутых пор.

Измерения теплопроводности проводились методом одноосного теплового потока, который задавался нагревателем из манганиновой проволоки  $d = 0.03$  мм, намотанной на поверхность тонкостенного керамического цилиндра. Ширина намотки составляла 1.5 мм. В непосредственной близости от нагревателя располагался термометр сопротивления  $T_1$  из медной проволоки  $d = 0.02$  мм. На расстоянии 6 мм от первого термометра на поверхность керамики намотан второй термометр  $T_2$ . Температура нагревателя также измерялась медным термометром  $T_3$ , намотанным поверх нагревателя. Термостат в области  $T = 77–250$  К обеспечивал однородность температуры при протяжке и стабилизацию ее на концах образца с точностью  $\delta T = 0.5$  К.

На рис. 1 представлен резистивный  $R(T)$  переход (кривая 3) исследуемого образца с плотностью критического тока  $J_c = 1.7 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup> и критической температурой  $T_c = 110$  К. Крутизна зависимости  $R(T)$  и малое размытие резистивного хвоста указывают на высокое качество межзеренных контактов и однородность токового кластера. Изменение теплопроводности с температурой определялось по разности показаний термометров  $\Delta T = T_1 - T_2$  при постоянном тепловом потоке от локального нагревателя. Величина  $\Delta T$ , пропорциональная теплопроводности  $\lambda(T)$  материала токовода, представлена на рис. 1 (кривая 1). Эта зависимость имеет особенности в области температур 110 и 85 К. Очевидно, особенность при  $T = T_c = 110$  К связана с изменениями в электронной части теплопроводности при переходе в сверхпроводящее состояние керамики. Мелкомасштабная особенность при  $T = 85$  К может быть вызвана включениями

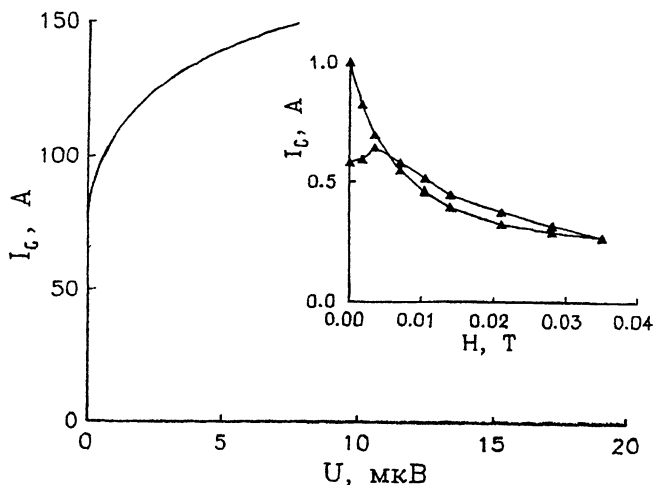


Рис. 1. Температурная зависимость перепада температуры  $\Delta T(T)$  макета токоввода (1) и медного образца (2). Кривая (3) — резистивный сверхпроводящий  $R(T)$  переход токоввода.

низкотемпературной фазы 2212 с  $T_c \sim 85$  К [4], хотя рентгеновские исследования примесей этой фазы не обнаружили. Однако это может быть связано не с ее отсутствием в объеме керамики, а с аморфизированным состоянием включений (тонкие прослойки фазы 2212 на поверхности фазы 2223 наблюдались методом электронной микроскопии высокого разрешения [5]). Кривая 2 на рис. 1 демонстрирует изменение  $\Delta T$  с температурой для медного образца. Сравнение градиентов температур для керамики и меди, полученных при одинаковой мощности нагревателя, показало, что в условиях интенсивного газового теплообмена коэффициент теплопроводности керамического образца по крайней мере в шесть раз меньше, чем у медного. Таким образом, керамическая секция как часть токоввода может служить хорошей тепловой развязкой в области азотных температур.

Транспортные свойства массивных изделий из ВТ-СП существенно отличаются от характеристик маломерных образцов. Так, если для образцов с толщинами  $d = 50 - 100$  мкм плотность критического тока достигает  $J_c \sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>, то для макетов токоввода, изготовленных из той же керамики и прошедших такую же механическую и термическую обработку, характерные значения критического тока  $J_c = 1.2 - 2.5 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>. Такое различие объясняется в первую очередь тем, что хорошо выраженная текстура, являющаяся главным условием высокой плотности крити-

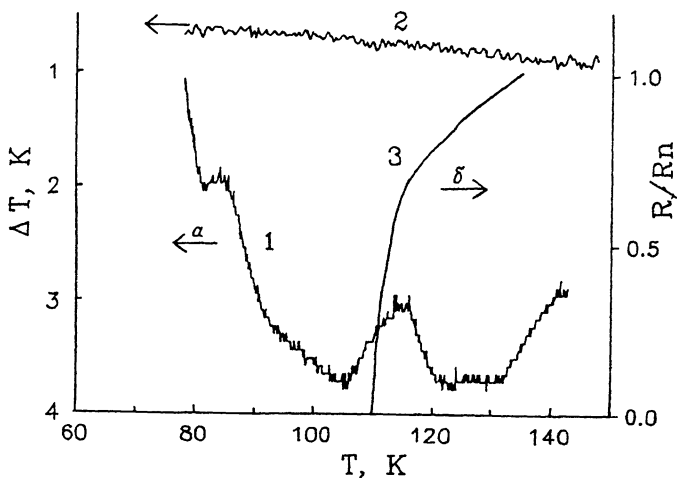


Рис. 2. Типичная ВАХ токоввода.

На вставке — полевая зависимость критического токоввода  $I_c(H)$  при увеличении (а) и уменьшении (б) магнитного поля  $H$ .

ческого тока, достигается с помощью механической обработки только в приповерхностных слоях керамики.

Измерения критических токов ВТСП образцов были выполнены по стандартной четырехконтактной схеме на уровне  $E = 1$  мкВ/см с записью вольтамперных характеристик. Типичная ВАХ показана на рис. 2. Зависимость  $I_c$  токоввода от магнитного поля  $H$ , параллельного оси керамического цилиндра, продемонстрирована на вставке рис. 2 ( $T = 77$  К). Как и в образцах плоской геометрии [6], уже в малых магнитных полях критический ток керамики существенно уменьшается, но далее чувствительность  $I_c$  к магнитному полю падает и зависимость  $I_c(H)$  практически выходит на плато в полях  $H \sim 1$  кЭ. Слабый аномальный гистерезис зависимости  $I_c(H)$  характерен для гранулярных структур [7] и указывает на хорошее качество поверхностного слоя гранул исследуемых керамических образцов.

Работа выполнена в рамках проекта № 608 Государственного комитета по науке и технике Украины.

### Список литературы

- [1] Климов В.В., Гусакова Л.Г., Еремеева Т.Т., Таренков В.Ю. // Тез. докл. IV Всесоюз. симп. "Неоднородные электронные состояния". Новосибирск, 1991. Т. 4. С. 174–175.
- [2] Perekrestov B.I., Tarenkov V.Yu., D'yachenko A.I. et al. // ФТВД. 1993. Т. 3. С. 131–135.
- [3] Кириченко Ю.А., Русанов К.В., Тюрина Е.Г. // СФХТ. 1990. Т. 3. С. 1385–1409.

- [4] Алиев Ф.Г., Брандт Н.Б., Моцалков В.В. и др. // СФХТ. 1989. Т. 2. С. 29–31.
- [5] Selvamanickam V., Salama K. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1572.
- [6] Сви́стунюв В.М., Дьяченко А.И., Таренков В.Ю., Перекрестов Б.И. // ФТВД. 1992. Т. 2. С. 5–15.
- [7] Svistunov V.M., D'yachenko A.I., Tarenkov V.Yu. // Physica C. 1991. V. 185–189. P. 2429–2430.

Донецкий физико-технический  
институт  
Украина

Поступило в Редакцию  
30 августа 1994 г.

### От редакции (список опечаток)

1. В написании фамилии одного из авторов опубликованного нами в т. 20, вып. 4. за 1994 г. на с. 60 письма авторов Зайцева Б. Д., Кузнецовой И. Е., Нефедова И. С. „Затухание акустических волн Рэлея на поверхности арсенида галлия со слоем двумерного электронного газа” допущена ошибка, а именно, напечатано И. Е. Кузнецов, вместо И. Е. Кузнецова.

2. Опечатки в статье „SiC полевой транзистор с малым пороговым напряжением” М. М. Аникина и др. Письма в ЖТФ, Т. 20, В 20, С. 16–19).

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
16	3 сверху	М. Г. Растегаева	М. Г. Растегаева
16	11–10 снизу	при $U_{gs} = +2$ и 20 В	при $U_{gs} = +2$ В и $U_{ds} = 20$ В
16	9 снизу	при $U_{ds} = 0$ и $-20$ В	при $U_{ds} = 0$ и $U_{gs} = -20$ В
18	подпись к рис. 2, а по оси абсцисс внизу.	$U_{ds}$ (В)	$U_{gs}$ (В)