

[6] П у з р е в В.А., Г е р а с и м о в а А.С. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 4. С. 56-76.

[7] М а л л е р Р., К е й м и н с Т. Элементы интегральных схем. М., 1989. 630 с.

Научно-исследовательский институт технического стекла, Москва

Поступило в Редакцию 1 августа 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

05.4

© 1991

## ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ОБЛАСТИ РЕЗИСТИВНОГО СОСТОЯНИЯ ВТСП КЕРАМИК $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Т.А. И г н а т ь е в а, А.Н. В е л и к о д н ы й,  
М.А. Т и х о н о в с к и й

Отличительной чертой ВТСП керамик являются высокие значения температуры сверхпроводящего перехода ( $T_K$ ) и сравнительно небольшие критические токи ( $I_K$ ) при азотных температурах.

Критические токи ( $I_K$ ) ограничиваются слабыми связями между отдельными зёрнами [1]. Их природа определяет чувствительность критических параметров ВТСП керамик, в частности  $I_K$ , к магнитным полям и температурам.

Одним из методов изучения природы разрушения сверхпроводимости ВТСП керамик как под влиянием магнитных полей, так и транспортных токов является анализ ВАХ.

В данной работе исследованы ВАХ образцов из керамики  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , приготовленных обычной керамической технологией. Типичная ВАХ для одного из образцов с  $\rho_{300K} = 2.6 \cdot 10^{-3}$  Ом·см,

$J_K = 160$  А/см<sup>2</sup> и  $T_K \sim 91$  К, содержащая характерные особенности, приведена на рис. 1, а. Как видно из рисунка, на ВАХ наблюдаются две особенности, связанные с появлением резистивного состояния в слабых связях при разрушении ВТСП током. Одна из них – нелинейность начального участка ВАХ в интервале токов от  $I_K$  до  $1.6 I_K$ , другая – неустойчивость при токах более  $1.6 I_K$ , которая заканчивается резким срывом в устойчивое состояние при токе  $I^*$ . Устойчивая часть ВАХ при  $I > I^*$  имеет нелинейный характер, а для наиболее однородных образцов близкий к линейному вплоть до теплового срыва, сопровождающегося расплавлением образца при токах  $(15-20) I_K$ .

На рис. 1, б приведены измерения температуры образца относительно азота  $\Delta T = T_{обр} - 77$  К в зависимости от транспорт-

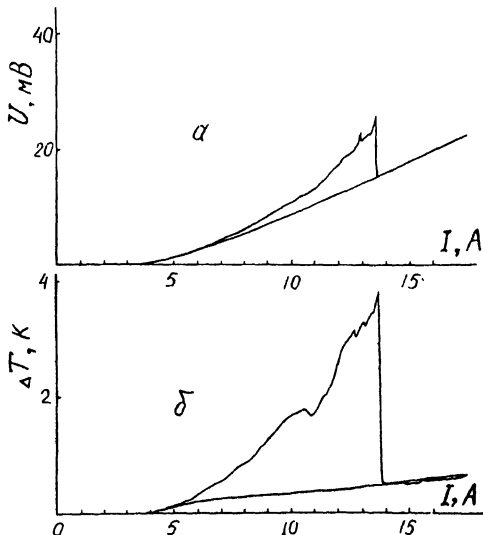


Рис. 1. а) Вольтамперная характеристика. б) Температура образца относительно 77 К в зависимости от транспортного тока.

ного тока. Возможность измерения температуры образца и отсутствие тепловыделений на токовых контактах обеспечивались хорошим качеством серебряных контактов с переходным сопротивлением  $10^{-8}$  Ом·см<sup>2</sup>. Температура измерялась с помощью медь-константановой термопары. Одновременные измерения ВАХ и  $\Delta T$  (рис. 1, а, б) позволяют наблюдать корреляцию неустойчивости ВАХ с перегревом образца. Это свидетельствует о тепловом характере наблюдаемой особенности. Рассмотрим подробнее особенности ВАХ.

Ранее было показано, что нелинейность начального участка ВАХ очень чувствительна к слабым магнитным полям [2], что обусловлено джозефсоновской природой слабых связей [1]. В силу их неоднородности (разориентация зерен, протяженность границ, возможность наличия другой фазы и т.д.) имеется целый набор значений  $I_{ki}$  — критических токов джозефсоновских переходов и постепенное достижение их значений при увеличении тока приводит к нелинейности начального участка ВАХ в интервале  $I_K \div 1.6 K$ . Эта часть ВАХ хорошо описывается степенной зависимостью  $V \sim I^n$ , что, по-видимому, связано с перколяционным характером протекания тока. Для различных образцов  $n = 3.7-4$ , что согласуется с данными [3]. В интервале токов (1.6–2.2)  $I_K$  ВАХ лучше описывается не степенной функцией, а экспонентой, далее при увеличении тока начинаются флуктуации на ВАХ вплоть до скачка. При разрушении джозефсоновских связей межзеренные участки переходят в смешанное состояние с надкритическим током  $I > I_K$  и появляется нормальная компонента джозефсоновского тока. Появление резистивного

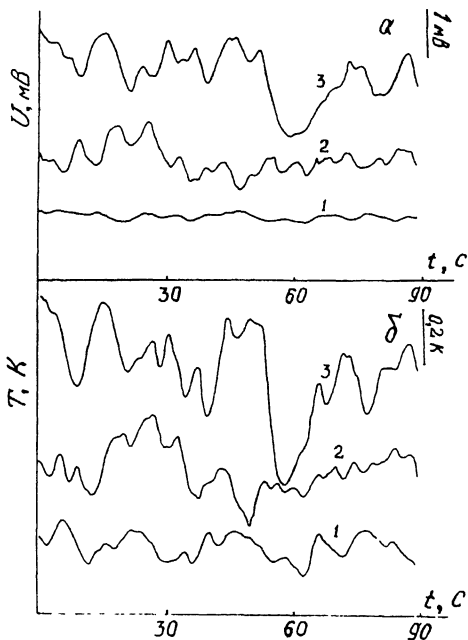


Рис. 2. а) Флуктуации ВАХ при токах: 1 - 8 А; 2 - 11 А, 3 - 12 А. б) Флуктуации температуры образца при токах: 1 - 8 А, 2 - 11 А, 3 - 12 А.

состояния в слабых связях до  $I < 1.6 I_K$  не приводит к заметному разогреву образца. Эта часть ВАХ не имеет гистерезиса (см. рис. 1, а, б).

При дальнейшем увеличении тока, тепловыделения в слабых связях в силу их неоднородности, плохой теплопроводности образца и низкой теплообменной способности среды не успевают выравниваться по образцу. Это приводит к локальным перегревам образца и появлению 2-й особенности на ВАХ - тепловой неустойчивости в интервале токов  $(2.2-5) I_K$  (для приведенного образца). Эта часть ВАХ имеет гистерезис (см. рис. 1, а, б). Достаточно низкое дифференциальное сопротивление образца  $\rho = \frac{dV}{dI}$  до скачка на ВАХ (на 1-2 порядка ниже  $\rho_{300K}$ ), а также низкие значения поля тока в приведенной области ВАХ до  $30 \text{ э} \ll H_{KI}$  зерна приводят к выводу, что наблюдаемая тепловая неустойчивость в этой области резистивного состояния относится к слабым связям.

Мы предполагаем, что здесь начинает играть роль перераспределение тока между нормальными и сверхпроводящими областями слабых связей, а их сопротивление изменяется в соответствии с изменениями температуры. Может быть и другая точка зрения -

настационарность теплообвода. В этой области проявляются флуктуации ВАХ (сопротивления) образца и его температуры при постоянном измерительном токе от времени. Результаты представлены на рис. 2, откуда видно, что при значениях тока, близких к скачку, флуктуации усиливаются.

Для этой области характерным является перегрев образца относительно азота. Максимальная величина  $\Delta T$  в области скачка достигает для различных образцов (1-4) К. По визуальным наблюдениям в момент скачка вдали от токовых контактов происходит локальное вскипание азота около образца - переход от конвективного характера теплообмена к пузырьковому. При этом тепло начинает интенсивнее отводиться от образца за счет резкого увеличения коэффициента теплоотдачи  $\alpha = \frac{Q}{\Delta T}$ , где  $Q$  - тепло, отводимое с единицы поверхности,  $\Delta T = (T_{\text{обр}} - 77)$  К. Из наших экспериментов следует, что в области конвективного теплообмена, предшествующего скачку на ВАХ, коэффициент  $\alpha$  вначале растет, затем медленно уменьшается с ростом  $\Delta T$  (область неустойчивости), в момент скачка резко увеличивается, а после скачка - линейно растет.

Таким образом, тепловую неустойчивость ВАХ необходимо рассматривать, учитывая взаимосвязь тепловыделений в образце с теплоотводящей средой.

Изменение характера теплообмена может привести к исчезновению неустойчивости на ВАХ. При измерениях в азоте это происходит при вскипании азота - переходе на устойчивую ветвь ВАХ. Если же образец поместить в теплообменную среду с коэффициентом теплопроводности на порядок больше, чем у азота, то неустойчивость на ВАХ отсутствует (нет скачка) вплоть до теплового разрушения сверхпроводимости зерен. Амплитуда флуктуаций на ВАХ значительно уменьшается. Такой результат был получен при помещении образца в среду замороженного 15%-го раствора спирта в воде.

Таким образом, мы наблюдали тепловую неустойчивость и флуктуации на ВАХ в области резистивного состояния слабых связей ВТСП керамики, которые чувствительны как к неоднородности слабых связей, так и к условиям теплообмена с окружающей средой. Учитывая сложную электродинамику ВТСП керамик, можно провести аналогию со сверхпроводниками 2-го рода  $S-N-S$  структуры [4] и предположить, что в области резистивного состояния, где наблюдается тепловая неустойчивость, возникают тепловые домены, связанные с неоднородным саморазогревом образца.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] P e t e r s o n R.L., E k i n J.W. // Physica C. 1989. V. 157. P. 325-333.
- [2] И г н а т ь е в а Т.А., В е л и к о д н ы й А.Н., Ч е р н я к Н.А., П р я д к и Б.К., Т и х о н о в с к и й М.А.,

- О л е к с и е н к о М.М. Тез. докл. I Всес. сов. по высоко-  
температурной сверхпроводимости, Харьков, 1988. Т.1. С. 199.
- [3] А л е к с а н д р о в К.С., В а с и л ь е в А.Д., З в я-  
г и н ц е в С.А., П е т р о в М.И., Х р у с т а л е в Б.П.  
Препринт ИФАН № 475Ф, Красноярск, 1988.
- [4] Г у р е в и ч А.В., М и н ц Р.Г., Р а х м а н о в А.К.  
Физика композитных сверхпроводников. М.: Наука, 1987.

Харьковский физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
11 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

05.1; 05.2

© 1991

## ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВСКИЕ ДИСПЕРСИОННЫЕ СИЛЫ МЕЖДУ ПЛАСТИНКАМИ ИЗ СЕЛЕНИДА ГАЛЛИЯ

Т.Р. М а х т и е в, В.П. Р а д и о н о в,  
А.М. А л и е в

Характерной особенностью кристаллического строения селенида галлия является слоистость. Слои представляют собой пакеты плотно упакованных монослоев, расположенных в последовательности анион-катион-катион-анион ( $Se - Ga - Ga - Se$ ), связанных сильными ионно-ковалентными взаимодействиями. Взаимодействия между слоями слабые, в основном Ван-дер-Ваальсовского типа. Последнее утверждение является недостаточно обоснованным, поскольку среди опубликованных работ отсутствуют сообщения о теоретических либо экспериментальных исследованиях Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия в селениде галлия. В данной публикации приводятся результаты соответствующих исследований, проведенных на образцах  $\epsilon - GaSe$  при  $T = 300$  К в вакууме. Методика эксперимента достаточно хорошо описана в работах [1, 2]. Точность измерения зазора между пластинками селенида галлия около 0,2 нм и обеспечивалась использованием оптического интерферометра. Толщина использованных пластинок  $GaSe$  - 1 мкм, радиус кривизны цилиндра  $R = 1$  см. Результаты экспериментов представлены на рисунке. В двойном логарифмическом масштабе приведена зависимость критического расстояния  $H$ -скачка от величины  $c/R$ , где  $c$  - жесткость пружины. Зависимость представляет собой пересечение двух наклонных прямых, отражающих две возможные ситуации Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия:  $H \ll \lambda_0$  и  $H \gg \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  - характерная длина волны. В первом случае наклон прямой определяется константой Хамакера  $A$ , которая, как следует из рисунка, в данном случае равна  $4.9 \cdot 10^{-12}$  эрг. Во втором случае существенными становятся эффекты запаздывания, и наклон прямой определя-