

05.4

## Перегрев пленочных микромостиков из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

© О.В. Матюнина, А.В. Погребняков

Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники

Поступило в Редакцию 25 июля 1996 г.

Установлено, что развивающийся с понижением температуры гистерезис на вольт-амперных характеристиках тонкопленочных микромостиков из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  обусловлен перегревом микромостиков транспортным током. Определено значение коэффициента теплопередачи  $\alpha = 5500-7500 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$  и значение теплового сопротивления границы раздела пленка-подложка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{MgO}$   $R_{\text{тр}} = (1.3-1.8) \cdot 10^{-4} (\text{см}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ .

Эффективность теплоотвода может оказывать существенное влияние на характеристики электронных приборов. Наряду с объемной теплопроводностью материалов определяющим теплоотвод фактором является тепловое сопротивление границы раздела пленка-подложка,  $R_{\text{тр}}$ , которое характеризует процессы теплопереноса в подложку. При низких температурах ( $\leq 30-40 \text{ К}$ )  $R_{\text{тр}}$  хорошо описывается моделью рассогласования акустических импедансов [1]. Однако, как показали исследования, выполненные разными методами (создания нестационарной дифракционной решетки с помощью оптической интерференции, исследования нестационарного поглощения при импульсном облучении, болометрические измерения и др. (см., например, [2-4])), тепловое сопротивление границы раздела между пленкой  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  и различными подложками при температурах 80-100 К значительно больше определяемого моделью [1] и имеет значения в интервале  $1 \cdot 10^{-4} - 1.3 \cdot 10^{-3} (\text{см}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ .

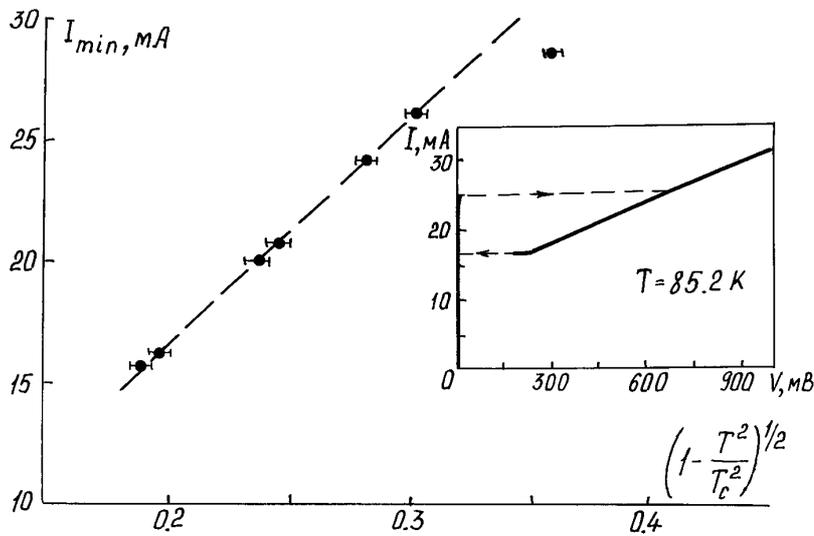
Недостаточный теплоотвод при измерениях вольт-амперных характеристик тонкопленочных микромостиков может приводить к образованию гистерезиса, а также быть причиной уменьшения критического тока, возрастания шумовой температуры и уменьшения амплитуды вызываемых СВЧ-облучением ступенек тока [5]. Гистерезис вольт-амперных характеристик сверхпроводниковых слабых связей, сформированных из

низкотемпературных сверхпроводников, в частности микромоистиков, изучался в ряде работ. Расчеты и эксперименты с микромоистиками из олова, выполненные Скокполом с сотрудниками [6], показали, что из-за ограниченной скорости диссипации тепловой энергии в микромоистиках может возникать нормальная область ("тепловое пятно"), температура которой  $T > T_c$ . При понижении температуры измерений минимальный ток  $I_{\min}$ , необходимый для поддержания теплового пятна, становится меньше критического тока  $I_c$  и тогда на вольт-амперных характеристиках возникает гистерезис. Как показано в работе [6], величина  $I_{\min}$  зависит от температуры измерений, размеров и удельного сопротивления материала микромоистика, а также от коэффициента теплоотдачи от микромоистика в подложку.

В данной работе исследовались характеристики тонкопленочных микромоистиков из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Показано, что развивающийся с понижением температуры гистерезис вольт-амперных характеристик микромоистиков обусловлен перегревом.

Эпитаксиальные пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  толщиной до 5000 Å выращивались на подложках (100) MgO лазерным методом. Использовались также пленки, созданные ионно-лучевым распылением стехиометрической мишени. Результаты исследований пленок методом разерфордского обратного рассеяния в режиме каналирования показали, что ось  $c$  пленок ориентирована перпендикулярно подложке. Критическая температура ( $T_c$ ) пленок была равна 86–91 К (по середине перехода в сверхпроводящее состояние по сопротивлению), температурный интервал перехода был в пределах 0.5–1 К (по уровню 10–90% остаточного сопротивления). Исследовались микромоистики длиной 5–7 мкм, которые были сформированы с использованием электронной литографии и облучения ионами водорода [7] в дорожках шириной 20 мкм и длиной 250 мкм. Критическая плотность тока микромоистиков при температуре 77 К достигала значения:  $j_c(77 \text{ K}) = 1.2 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ . Высокие значения  $j_c$  и относительно большая ширина микромоистиков способствовали образованию гистерезиса вольт-амперных характеристик в результате перегрева микромоистиков транспортным током. При измерениях вольт-амперных характеристик использовался генератор тока.

При проведении измерений характеристик микромоистиков ниже определенной температуры  $T_0$  ( $T_0$  — некоторая характерная для каждого микромоистика температура, которая зависит от условий теплоотвода), на их вольт-амперных характеристиках возникал гистерезис (см. вставку



**Рис. 1.** Зависимость от приведенной температуры тока  $I_{\min}$ , при котором происходит возврат вольт-амперной характеристики к  $V = 0$  при уменьшении тока развертки. Точки — экспериментальные данные, пунктир — зависимость, описываемая формулой (1) в тексте. На вставке приведена имеющая гистерезис вольт-амперная характеристика, зарегистрированная при температуре 85.2 К.

к рис. 1): с увеличением тока через микромостик происходил скачок в область вольт-амперных характеристик, соответствующую большим напряжениям. При дальнейшем возрастании тока связь между током и напряжением была однозначной. При уменьшении тока возврат вольт-амперных характеристик  $V = 0$  происходил по другому пути.

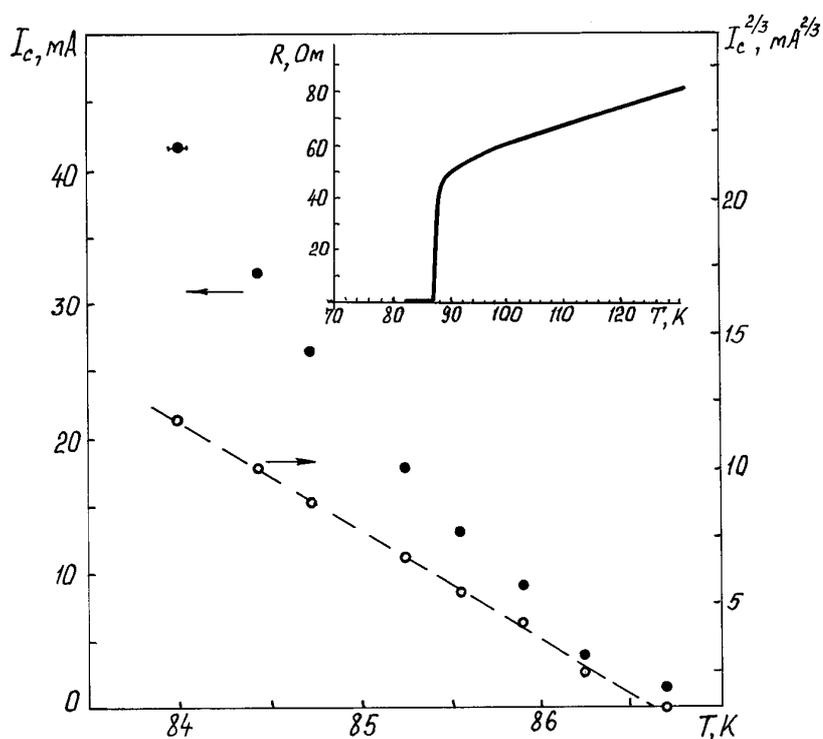
Пулен с сотрудниками [8] исследовали эффект переключения из сверхпроводящего в нормальное состояние микромостиков, сформированных в пленках высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , в результате образования в них теплового пятна. В этой работе гистерезис вольт-амперных характеристик отсутствовал, поскольку при регистрации вольт-амперных характеристик использовался генератор напряжения. Анализировались также уравнения для потока тепла в микромостике, аналогичные рассматривавшимся в [2], но с уче-

том линейной зависимости сопротивления материала  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  от температуры. Было получено следующее выражение для минимального тока поддержания теплового пятна:

$$I_{\min} = \sqrt{\frac{\alpha w^2 d}{c}} \left[ 1 - \frac{T^2}{T_c^2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на единицу площади поверхности пленки,  $w$  и  $d$  — ширина и толщина пленки соответственно,  $c$  — тангенс угла наклона линейной зависимости удельного сопротивления пленки от температуры:  $r = r_0 + cT$  и  $T$  — температура, при которой проводятся измерения.

На рис. 1 представлена зависимость от  $(1 - T^2/T_c^2)^{1/2}$  тока  $I_1$ , при котором происходит возврат вольт-амперной характеристики к  $V = 0$  при уменьшении тока развертки, для одного из микромостиков, исследовавшихся в данной работе. Как следует из этого рисунка, экспериментальные данные (точки) хорошо описываются выражением (1). Для исследовавшихся микромостиков было получено, что  $I_c \sim (1 - T/T_c)^{3/2}$  (рис. 2), поэтому при понижении температуры измерений минимальный ток поддержания теплового пятна становится меньше критического тока микромостика. Таким образом, теплоотвод от микромостика из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  может стать недостаточным для поддержания его в резистивном сверхпроводящем состоянии. В этом случае при пропускании транспортного тока в области микромостика, в которой параметр порядка, а следовательно, и критический ток имеют минимальное значение, начинается движение вихрей, т.е. имеет место диссипация энергии. При дальнейшем увеличении тока через микромостик происходит скачкообразное увеличение напряжения до значения, соответствующего линейному участку зависимости тока от напряжения — возникает тепловое пятно, длина которого равна длине микромостика. При последующем уменьшении тока зависимость тока от напряжения является линейной (см. вставку к рис. 1), т.е. размеры теплового пятна практически не изменяются до тех пор, пока ток не достигнет значения  $I_1 = I_{\min}$ . Отклонение экспериментальных данных от теоретической зависимости (1) при понижении температуры измерений (что соответствует большим значениям  $I_{\min}$ ), по-видимому, связано с нагревом подложки, т.е. с тем, что ее температура становится выше температуры окружающей среды, поскольку измерения проводились в парах гелия.



**Рис. 2.** Зависимости критического тока,  $I_c$ , микромостика и  $I_c^{2/3}$  от температуры (точки — экспериментальные данные). На вставке приведена зависимость сопротивления микромостика от температуры.

Следует отметить, что обсуждаемые явления в микромостиках, описываемые уравнениями для потока тепла (см. [6,8]), соответствуют стационарным условиям. Фактически же при регистрации вольт-амперных характеристик с разверткой по току реализуется нестационарный случай: при скачкообразном увеличении напряжения происходит расширение теплового пятна до размеров длины микромостика. При достаточно низкой температуре измерений распространение теплового пятна на всю длину микромостика не успевает произойти; вместо

этого происходит локальный перегрев области прохождения цепочки вихрей. Температура в области перегрева становится столь высокой, что микроэлектрод "перегорает". Визуальный анализ перегоревших микроэлектродов показал наличие более светлых по сравнению с остальными областями пленки участков, пересекающих дорожки по ширине. Более того, на некоторых образцах наблюдалось даже образование трещины в подложке в том месте, где перегорел микроэлектрод.

С использованием данных, подобных приведенным на рис. 1, и зависимости сопротивления микроэлектродов от температуры (на вставке к рис. 2 приведена зависимость сопротивления от температуры для того же микроэлектрода, характеристики которого представлены на рис. 1 и 2) по формуле (1) определялся коэффициент теплопередачи  $\alpha$ . Для исследованных в данной работе образцов  $\alpha = 5500-7500$  Вт/(см<sup>2</sup> · К). Значение  $R_{гр} = (1.3-1.8) \cdot 10^{-4}$  (см<sup>2</sup> · К)/Вт как величины, обратной коэффициенту теплопередачи, согласуется с данными, полученными другими методами [4]. Следует отметить, что, поскольку длины волн фотонов ( $\approx 4$  Å при 100 К [9]) значительно меньше толщины переходного слоя на границе раздела, на эффективность теплопереноса через границу раздела существенное влияние будет оказывать чистота и совершенство кристаллической структуры переходного слоя.

С использованием для удельной теплоемкости  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  значения  $0.9$  Дж/(см<sup>3</sup> · К) [10], а также с учетом определенных в данной работе значений  $R_{гр}$  для пленок толщиной  $2000$  Å тепловая постоянная времени оценивается в  $2-3$  нс. Полученные данные важны для разработки чувствительных быстродействующих болометров на основе пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

## Список литературы

- [1] Little W.A. // Can. J. Phys. 1959. V. 37. P. 334.
- [2] Levey C.G., Etemad S., Inam A. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 1. P. 126.
- [3] Nahum M., Verghese S., Richards P.L. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 16. P. 2034.
- [4] Marshall C.D., Tokmakoff A., Fishman I.M. et al. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 2. P. 850-857.
- [5] Tinkham M., Octavio M., Skocpol W.J. // J. Appl. Phys. 1977. V. 49. N 3. P. 1311-1320.

- [6] Skocpol W.J., Beasley M.R., Tinkham M. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 4054–4066.
- [7] Погребняков А.В. // Весті АН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 1994. N 1. С. 94–99.
- [8] Poulin G.D., Lachapelle J., Moffat S.H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. N 19. P. 2576–2578.
- [9] Klitsner T., Pohl R.O. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 12. P. 6551–6565.
- [10] Loram J.W., Mirsa K.A., Freeman P.F. // Physica C. 1990. V. 171. P. 243.