

ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ НА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ГРАНИЦЕ YBaCuO И PrBaCuO

А. В. Варлашкин

Среди классических применений сверхпроводимости важное место занимают сверхпроводниковые болометры, представляющие собой полосу из тонкой пленки сверхпроводника в резистивном состоянии [1–4]. В настоящей работе мы исследовали образцы ВТСП болометров на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с защитным слоем $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Из отклика на импульсы $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ лазера была впервые получена количественная оценка теплового сопротивления на эпитаксиальной границе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ – $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x = (0.3 \div 1.3) \cdot 10^{-3} \text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$.

Ключевые слова: тонкопленочные микроболометры, ВТСП, YBaCuO , защитный слой.

Среди классических применений сверхпроводимости важное место занимают высокочастотные и быстродействующие устройства. Быстродействующие, чувствительные детекторы и смесители с широким спектральным диапазоном требуются в различных областях науки и техники. Применение высокотемпературных сверхпроводников не только позволяет повысить рабочую температуру детектора и удешевить охлаждение, но и расширить его спектральный диапазон.

Таковыми чувствительными детекторами могут быть сверхпроводниковые болометры, представляющие собой полосу из тонкой пленки сверхпроводника в резистивном состоянии. Большая крутизна сверхпроводящего перехода, скорость переключения и нелинейность позволяют строить на основе таких структур чувствительные и быстродействующие детекторы [1], смесители [2] и другие высокочастотные устройства [3]. При этом на основе той же пленки можно сделать необходимые линейные компоненты системы, т.е. линии и фильтры [4].

Чувствительность болометра определяется его массой, а быстродействие болометра – скоростью охлаждения активного элемента – тонкой пленки. Так как оба эти па-

раметра улучшаются с уменьшением толщины пленки, то весьма желательно использовать как только возможно более тонкие пленки, толщиной порядка нескольких периодов кристаллической решетки. В отношении $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ оказалось, однако, что такие тонкие пленки очень неустойчивы к термоциклированию и атмосферному воздействию. Поэтому в этих устройствах приходится использовать те или иные защитные слои. В этих случаях важными становятся свойства границы активного элемента болометра и защитного слоя. В данной работе мы обнаружили, что даже эпитаксиальная граница близких по структуре и составу веществ может иметь значительное тепловое сопротивление.

В настоящей работе для изучения теплового сопротивления на эпитаксиальной границе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ - $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ мы исследовали образцы ВТСП микроболометров на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с защитным слоем $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Для получения болометров вначале на подготовленную подложку из MgO последовательно без разрыва вакуума осаждали слои $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ и Au . Осаждение осуществлялось методом импульсного лазерного распыления с использованием скоростной фильтрации, подробно метод описан в [5]. Затем полученные многослойные структуры подвергались литографии, в результате которой формировался рисунок, содержащий микромостик, состоящий из пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, покрытой защитным слоем $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, и подводящую копланарную линию из Au и антенну, технология детально описана в [6].

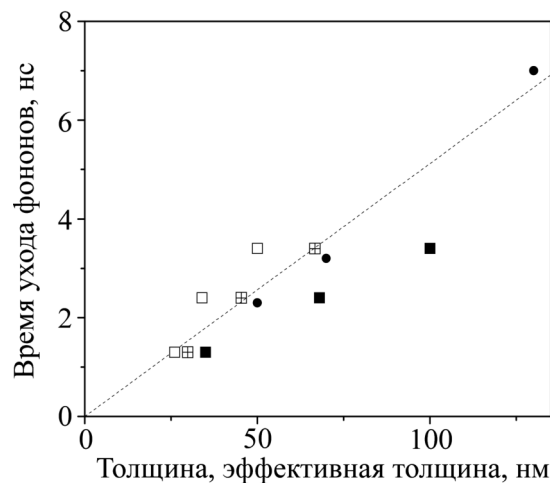


Рис. 1: Зависимость времени ухода фононов в подложку τ_{es} от толщины (эффективной толщины) d пленки. (●) – $\tau_{es}(d)$ для плёнки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ без покрытия [7]; $\tau_{es}(d)$ для плёнки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ - $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$: (□) $d = d_Y$, (■) $d = (d_Y + d_{Pr})$, (⊞) $d = d_{\text{eff}}$.

Полученные микроболометры устанавливали в оптический криостат и исследовали отклик на импульсы $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ лазера с длительностью импульса около 100 фемтосекунд [6]. В сигнале микроболометра наблюдался короткий пик, связанный с детектированием “горячих” электронов ($\tau_{\text{ep}} = 2.2$ пс). За этим пиком следовал похожий на экспоненциальный спад, связанный с выходом фононов в подложку. Далее данные на участке этого спада аппроксимировали функцией $\exp(-t/\tau_{\text{es}})$.

Т а б л и ц а 1

Данные образцов

| Образец, # | 685-2 | 609-2 | 606-2 |
|--|-------|-------|-------|
| Толщина пленки YBCO , нм | 26 | 34 | 50 |
| Толщина пленки PrBCO , нм | 9 | 34 | 50 |
| Толщина пленки Au , нм | 80 | 200 | 230 |
| Критическая температура пленки T_c , К, по измерению $\chi(T)$ | 86.6 | 86.2 | 86.7 |
| Ширина перехода пленки ΔT_c , К, по измерению $\chi(T)$ | 2.8 | 1.0 | 0.6 |
| Длина мостика, мкм | 3.5 | 9 | 3.5 |
| Ширина мостика, мкм | 4 | 3 | 3 |
| Сопротивление мостика R (при 90 К), Ом | 200 | 320 | 120 |
| Критическая температура мостика T_c , К, по измерению $R(T)$ | 88.0 | 85.5 | 89.0 |
| Ширина перехода мостика ΔT_c , К, по измерению $R(T)$ | 2.2 | 2 | 2 |
| Время выбега фононов τ_{es} , нс | 1.3 | 2.4 | 3.4 |
| Эффективная толщина d_{eff} , нм | 30 | 45 | 67 |

Полученные данные о времени выбега фононов τ_{es} приведены в табл. 1 вместе с другими данными микроболометров.

Сравнение с данными о времени выбега фононов τ_{es} для пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ без защитного слоя [7] (рис. 1) показало, что хотя τ_{es} и возрастает с толщиной пленки, однако для этих образцов оно не соответствует ни толщине пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (рис. 1, \square) или $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, ни их сумме (рис. 1, \blacksquare).

Чтобы оценить время ухода фононов из двуслойной $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ структуры с толщиной слоев d_Y ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) и d_{Pr} ($\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) можно воспользоваться рассуждением [6] и рассчитать эффективную толщину пленки по ф. (6) работы [6]:

$$d_{\text{eff}} = d_Y \left[1 + \frac{d_{\text{Pr}}}{(2d_Y + d_{\text{Pr}})} \right]. \quad (1)$$

Эффективная толщина $d_{\text{эф}}$, рассчитанная таким образом, приведена в табл. 1. Время выхода фононов в зависимости от эффективной толщины приведено на рис. 1 квадратами с крестом. Видно, что зависимость времени выхода фононов от таким образом определенной эффективной толщины хорошо согласуется с ожидаемой линейной зависимостью и данными других измерений для плёнок без покрытия [7].

В то же время в рамках этой модели [6] можно численно оценить R_{YPr} – тепловое сопротивление на границе YBCO/PrBCO. Ограничим наше рассмотрение временем после установления равновесия между электронами и фононами в пленке $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, так что внешний по отношению к фононам нагрев отсутствует. Положим также, что $R_{\text{PrY}} = R_{\text{YPr}}$, а температура подложки постоянна, и будем отсчитывать температуру от нее. Составим систему дифференциальных уравнений теплового баланса для пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (T_Y) и $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (T_{Pr}):

$$d_Y c_Y \frac{dT_Y}{dt} = -\frac{1}{R_{\text{YPr}}}(T_Y - T_{\text{Pr}}) - \frac{1}{R_{\text{YMg}}}T_Y, \quad (2)$$

$$d_{\text{Pr}} c_{\text{Pr}} \frac{dT_{\text{Pr}}}{dt} = \frac{1}{R_{\text{YPr}}}(T_Y - T_{\text{Pr}}), \quad (3)$$

где c_{Pr} – удельная теплоемкость $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, при температуре наших измерений равная $1.2 \text{ Дж/К}\cdot\text{см}^3$ [8]. Простые преобразования приводят их к виду:

$$C_Y \frac{dT_Y}{dt} = Y_{\text{YPr}}T_{\text{Pr}} - (Y_{\text{YPr}} + Y_{\text{YMg}})T_Y, \quad (4)$$

$$C_{\text{Pr}} \frac{dT_{\text{Pr}}}{dt} = -Y_{\text{YPr}}T_{\text{Pr}} + Y_{\text{YPr}}T_Y, \quad (5)$$

$$Y_{\text{YPr}} = \frac{1}{R_{\text{YPr}}}, \quad Y_{\text{YMg}} = \frac{1}{R_{\text{YMg}}}, \quad C_Y = d_Y c_Y, \quad C_{\text{Pr}} = d_{\text{Pr}} c_{\text{Pr}}. \quad (6)$$

Для начальных условий $T_Y = T_0$, $T_{\text{Pr}} = 0$, где T_0 – температура пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в момент начала охлаждения, решение уравнений имеет вид:

$$T_Y = A_1 \exp(\lambda_1 t) + A_2 \exp(\lambda_2 t), \quad (7)$$

$$T_{\text{Pr}} = (\exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t)) \frac{A_1 A_2 (\lambda_1 - \lambda_2)}{T_0} \frac{C_Y}{Y_{\text{YPr}}}, \quad (8)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2C_Y C_{\text{Pr}}} (-Z \pm \sqrt{Z^2 - 4C_Y C_{\text{Pr}} Y_{\text{YMg}} Y_{\text{YPr}}}), \quad (9)$$

$$Z = C_{\text{Pr}} Y_{\text{YPr}} + C_{\text{Pr}} Y_{\text{YMg}} + C_Y Y_{\text{YPr}}, \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{C_Y \lambda_2 + Y_{\text{YPr}} + Y_{\text{YMg}}}{(\lambda_2 - \lambda_1) C_Y} T_0, \quad A_2 = T_0 - A_1. \quad (11)$$

Далее, варьируя Y_{YPr} методом наименьших квадратов для наилучшего согласования с экспериментальными кривыми для разных образцов, мы получили $R_{YPr} = 1/Y_{YPr} = (0.3 \div 1.3) \cdot 10^{-3} \text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$, что составляет величину $(0.5 \div 2.4)R_{YMs}$.

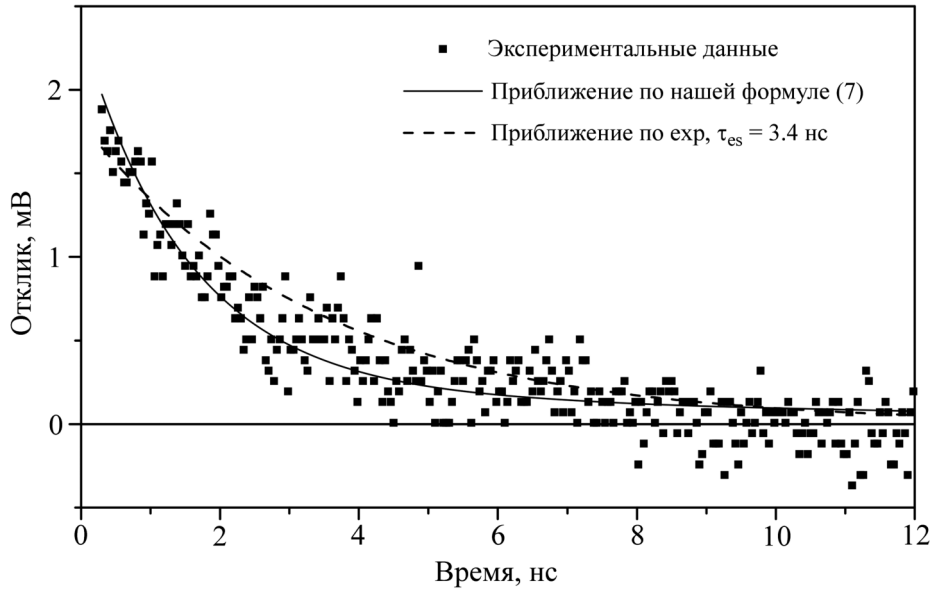


Рис. 2: Экспериментальные данные и расчетная кривая охлаждения пленки для образца 606-2 при $T = 82 \text{ K}$.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные ($T = 82 \text{ K}$) и кривая аппроксимации для отклика образца 606-2. Для сравнения пунктиром приведена кривая аппроксимации формулой $\exp(-t/\tau_{es})$ ($\tau_{es} = 3.4 \text{ нс}$, см. табл. 1). Видно, что в начальный момент времени сплошная кривая опускается круче за счет передачи тепла защитному слою, затем их температуры сравниваются и охлаждение замедляется. С точки зрения частотной характеристики это означает, что за счет влияния защитного слоя отклик на высоких частотах возрастет, а на более низких ($\sim 1/(2\pi\tau_{\Sigma})$, где τ_{Σ} соответствует уходу фононов из пленки толщиной $d = d_Y + d_{Pr}$) – уменьшится, что в некоторых случаях может быть полезно.

Следует также отметить, что относительно высокий уровень шума в наших измерениях затрудняет выбор в пользу того или иного способа описания.

В заключение отметим, что нами определено время выбега фононов для ВТСП микроболометра с защитным слоем и его зависимость от толщин пленок. Показано, что влияние толщины защитного слоя на время выбега фононов может быть описано в терминах эффективной толщины. Впервые получена количественная оценка теп-

лового сопротивления на эпитаксиальной границе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}\text{-PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$: $R_{\text{YPr}} = (0.3 \div 1.3) \cdot 10^{-3} \text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$, которая оказалась значительной, $(0.5 \div 2.4)$ от теплового сопротивления на эпитаксиальной границе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с подложкой MgO .

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Probst, A. Scheuring, M. Hofherr, et al., *Appl. Phys. Lett.* **98**, 043504 (2011).
- [2] Т. В. Samoilova, *Supercond. Sci. Technol.* **8**, 259 (1995).
- [3] I. Vendik, O. Vendik, V. Pleskachev, et al., in *International Microwave Symposium Digest IEEE MTT-S, Phoenix, 2001* (IEEE, 2001), p. 1461; <https://ieeexplore.ieee.org/document/967178>.
- [4] L. T. Wang, Y. Xiong, Y. H. Xiao, et al., *J. Supercond. Nov. Magn.* (2019); <https://doi.org/10.1007/s10948-019-5070-z>.
- [5] E. V. Pechen, A. V. Varlashkin, S. I. Krasnosvobodtsev, et al., *Appl. Phys. Lett.* **66**, 2292 (1995).
- [6] Yu. P. Gousev, A. D. Semenov, R. S. Nebosis, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 779 (1996).
- [7] A. V. Sergeev, A. D. Semenov, P. Kouminov, et al., *Phys. Rev. B* **49**, 9091 (1994).
- [8] F. M. Araujo-Moreira, P. N. Lisboa-Filho, A. J. C. Lanfredi, et al., *Phys. C* **341-348**, 413 (2000).

Поступила в редакцию 10 октября 2018 г.

После доработки 31 мая 2019 г.

Принята к публикации 7 июня 2019 г.