

- [1] Li Baiqin, Wang Yening, Xu Ziran J. Phys. C: Sol. Stat. Phys. **21**, 9, 1251 (1988).  
 [2] Halstead T.K. J. Chem. Phys. **53**, 9, 3427 (1970).  
 [3] Яценко А.В., Сергеев Н.А. УФЖ **30**, 1, 118 (1985).  
 [4] Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса. М. (1981). 448 с.  
 [5] Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М. (1987). 264 с.  
 [6] Gallagher P.K., O'Bryan H.M., Gyorgy E.M., Krause J.T. Ferroelectrics. **75**, 1-2, 71 (1987).

УДК 538.945

© Физика твердого тела, том 37, № 7, 1995  
Solid State Physics, vol. 37, N 7, 1995

## АНАЛИЗ $I-V$ -ХАРАКТЕРИСТИК МОНОКРИСТАЛЛОВ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ВБЛИЗИ $T_c$ С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЯЦИОННОЙ МЕТОДИКИ

*Н.Д.Кузьмичев, М.А.Васютин, А.И.Головашкин, И.С.Левченко*

Мордовский государственный университет,  
430000, Саранск, Россия  
(Поступило в Редакцию 11 ноября 1994 г.)

Известно, что вблизи  $T_c$  монокристаллы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  обладают нелинейными  $I-V$ -характеристиками, для объяснения которых привлекается, например, модель Костерлица-Таулеса [1], приводящая к степенной зависимости  $V(I)$ . Эта модель используется многими авторами для описания  $I-V$ -характеристик как моно-, так и поликристаллических ВТСП разного состава [2-5].

В статьях [6,7] нами показано, что степенная зависимость  $I-V$ -характеристик не описывает поведения керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при токах до 200 мА. В настоящей статье мы приводим результаты исследований влияния температуры, тока и магнитного поля на  $I-V$ -характеристики монокристаллов  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  вблизи  $T_c$ .

Для изучения  $I-V$ -характеристик применялась модуляционная методика, суть которой изложена в [6,7]. Эксперимент проводился на монокристаллических образцах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  размером  $1 \times 0.5 \times 0.03$  мм, приготовленных по технологии [8], с помощью обычного четырехконтактного метода. Образцы имели критическую температуру перехода  $T_c = 92.0$  К. Сопротивление индиевых контактов  $R < 0.3 \Omega$ . В нашем случае через образец пропускался переменный ток амплитудой  $I_a \leq 26$  мА, частотой  $f = 1$  кГц и постоянный ток  $I_d$  до 150 мА. Исследовались модули напряжений гармоник  $U_n$  ( $n$  — номер гармоники) сигнала отклика, появляющихся на потенциальных контактах.<sup>1</sup>

При измерениях использовался генератор НЧ-сигналов ГЗ-118 с низким коэффициентом гармоник ( $k = 2 \cdot 10^{-3}\%$ ). Для обеспечения хорошего теплоотвода образцы крепились к сафировой подложке. Темпе-

<sup>1</sup> Здесь  $U_n = \sqrt{(U_n^I)^2 + (U_n^{II})^2}$ ,  $U_n^I$  и  $U_n^{II}$  — синфазная и квадратурная составляющие  $U_n$  соответственно.

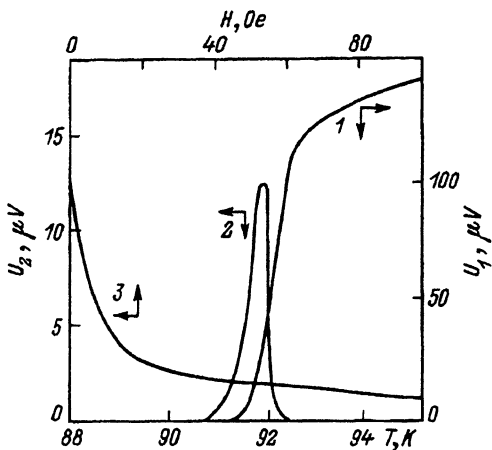


Рис. 1. Температурные зависимости напряжений первой  $U_1$  (1) и второй  $U_2$  ( $I_d = 20$  мА) (2) гармоник сигнала отклика; магнитополевая зависимость напряжения второй гармоники  $U_2$  ( $I_d = 20$  мА) (3).  $I_a = 26$  мА,  $f = 1$  кГц.

ратура измерялась платиновым термометром в режиме отогрева. Скорость изменения температуры составляла  $\Delta T/\Delta t = 0.2$  К/мин. Точность температурных измерений —  $\delta T = 0.05$  К. Постоянное магнитное поле  $H$ , прикладываемое параллельно оси с монокристалла, изменялось в пределах  $0 < H < 200$  Ое.

В эксперименте исследовались напряжения гармоник  $U_n$ , которые уменьшаются по величине с ростом их номера. В отсутствие постоянного тока наблюдались только нечетные гармоники.

Температурные зависимости гармоник  $U_n(T)$  ( $n > 1$ ) имеют вид резких максимумов вблизи  $T_c$ . Температуры максимумов гармоник  $T_n^*$  совпадают между собой в пределах точности измерений.

На рис. 1 показаны зависимости  $U_1(T)$  ( $I_d = 0$ ),  $U_2(T)$  ( $I_d = 20$  мА) и  $U_2(H)$  ( $T = T_2^* = 91.8$  К,  $I_d = 20$  мА);  $I_a = 26$  мА. Зависимость  $U_2(T)$  можно описать выражением

$$U_2(T) = U_2^* \exp \left\{ -[(T - T_2^*)/\delta T_2] \right\}, \quad (1)$$

где  $T_2^* = 91.8$  К,  $\delta T_2 = 0.3$  К,  $U_2^* = 12.74$   $\mu$ V. Для  $n \geq 3$  такое описание непригодно из-за явной асимметрии кривой  $U_n(T)$ .

Зависимости  $U_n$  от постоянного магнитного поля  $H$  при  $T = T_n^*$  имеют одинаковый вид для всех  $n$ . Напряжения  $U_n$  быстро и монотонно уменьшаются с ростом  $H$ , причем изменение направления поля на противоположное не влияет на вид зависимостей. Кривая  $U_2(H)$  (рис. 1)

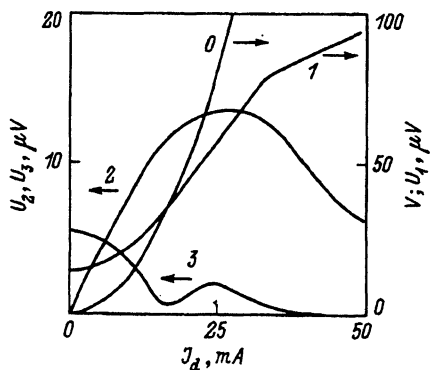


Рис. 2.  $I$ - $V$ -характеристика (0) и токовые зависимости напряжений первой  $U_1$  (1), второй  $U_2$  (2) и третьей  $U_3$  (3) гармоник сигнала отклика при температуре  $T = T_n^* = 91.8$  К,  $I_a = 26$  мА,  $f = 1$  кГц.

описывается функцией

$$U_2(H) = U_2[1 + |H/H_0|]^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $H_0 = 1$  Ое. Измерения  $U_n(T)$  в постоянном магнитном поле показали, что оно незначительно сдвигает температуру максимума гармоники  $T_n^*$  в сторону низких температур, уменьшая амплитуду  $U_n^*$  и ненамного по сравнению с керамикой [7] увеличивая его ширину.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости  $I$ - $V$ -характеристики  $V$  (кривая 0) и напряжений гармоник  $U_1$  (кривая 1),  $U_2$  (кривая 2) и  $U_3$  (кривая 3). Кривые  $V$  и  $U_1$  монотонно увеличиваются с ростом тока.  $U_2$  резко увеличивается от нуля и, пройдя максимум при  $I_d = 25$  мА, быстро уменьшается.  $U_3$  при увеличении тока уменьшается, проходит через минимум при  $I_d = 17$  мА, потом через максимум при  $I_d = 24$  мА и далее уменьшается до нуля. Высшие гармоники ( $n > 3$ ) характеризуются увеличением числа максимумов и минимумов в соответствии с ростом  $n$ .

Аппроксимация экспериментальной  $I$ - $V$ -характеристики степенной зависимостью при  $T = T_2^*$  в нашем случае дает показатель степени  $k = 2$ . Однако она не описывает  $U_n(I_d)$  и поэтому будет некорректной. Учитывая, что при  $I_d = 0$  нет нечетных гармоник и наблюдается одиннадцать и более гармоник, следуя работам [6,7,9], можно заключить, что  $V(I)$  является нечетной и трансцендентной функцией. Магнитополовая зависимость (2) аналогична, по-видимому, зависимости критической плотности тока  $j_c(H)$ , а температурная зависимость (1) определяет разброс  $j_c$ . Таким образом, для описания  $I$ - $V$ -характеристик монокристаллов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  модель Костерлица-Таулеса (по крайней мере в ее традиционном варианте) неприменима.

Выражаем благодарность Т.Г.Уваровой за предоставление монокристаллов.

#### Список литературы

- [1] Stamp P.C.E., Forro L., Ayache C. Phys. Rev. **B38**, 4, 2847 (1988).
- [2] Artemenko S.N., Gorlova I.S., Latyshev Yu.I. Phys. Lett. **A138**, 8, 428 (1989).
- [3] Горлова И.С., Латышев Ю.И. Письма в ЖЭТФ **51**, 4, 197 (1990).
- [4] Kardiawarman S., Masatsugu Suzuki, Burr Ch.R. J. Phys.: Cond. Matter. **1**, 8491 (1989).
- [5] Bowley R.M., Iwama S., King P.J. Misra D.S., Roys W.B. Physica **C159**, 51 (1989).
- [6] Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д. Письма в ЖТФ **18**, 23, 5 (1992).
- [7] Кузьмичев Н.Д., Васютин М.А. СФХТ **7**, 1, 93 (1994).
- [8] Bykov A.B., Demianets L.N., Zibrov I.P., Kanunnikov G.V., Melnikov O.K., Stishov S.M. J. Cryst. Growth. **B91**, 302 (1988).
- [9] Кузьмичев Н.Д. Письма в ЖТФ **17**, 7, 56 (1991).