

Влияние механических деформаций на критический ток сверхпроводящих пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-b}$

© Э.М. Ибрагимова,¹ М.У. Каланов,¹ М.А. Керк,² С.Р. Фолтин³

¹ Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан,
702132 Ташкент, Республика Узбекистан

² Аргоннская национальная лаборатория,
Иллинойс, США

³ Лос-Аламосская национальная лаборатория,
Нью-Мехико, США

e-mail: eibragim@suninp.tashkent.su;

(Поступило в Редакцию 25 сентября 2003 г.)

Показана возможность использования дозированной локальной механической изгибной деформации в интервале температур 77–300 К покрытых серебром сверхпроводящих $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-b}$ пленок на гибкой металлической подложке для существенного повышения критической плотности транспортного тока J_c при 77 К до уровня фрагментов с высокими значениями $J_c \geq 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, а также снижения критерия напряжения, что свидетельствует об усилении межзеренной проводимости и обеспечивает снижение джоулевых потерь.

В соответствии с требованиями сильноточной энергетики сверхпроводящие моторы, трансформаторы и линии передач должны пропускать ток плотностью $J_c > 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 77 К в магнитном поле 2 Т. Для обеспечения высокой эффективности и низких потерь диэлектрический изоляционный слой должен быть тонким и надежным. В российском проекте сверхпроводящего трансформатора толщина изоляции только в 10^{-6} m обеспечит межвитковое напряжение пробоя 300 В [1]. Японские компании планируют создание 100–1000 м лент толщиной 100 μm со слоем YBaCuO , пропускающим $J_c > 10^4$ – $10^5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 77 К [2]. Нынешнее состояние работ по сильноточной прикладной сверхпроводимости показывает, что Bi-ВТСП ленты пропускают ток плотностью до $0.14 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ в полях 1–8 Т только при 4.2 К, несмотря на $T_c > 77 \text{ K}$ [1], а YBaCuO пленки — даже $> 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 77 К [2–4]. Для этого необходимо получить сильные межзеренные контакты (с малыми $< 7^\circ$ углами разориентации кристаллитов), которые обеспечивают высокие значения транспортного критического тока $I_c \sim 100 \text{ A}$ [5]. Это оказалось возможным при создании биаксиальной текстуры как на поверхности металлической подложки, так и в диэлектрическом буферном слое $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{ZrO}_2\text{CeO}_2$, на который нанесена сверхпроводящая пленка [3,4]. Наиболее подходящие материалы для диэлектрического буферного слоя между YBaCuO и подложкой, такие как MgO , BaZrO_2 , $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{ZrO}_2$ [2–4], $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{CeO}_2$ [6], LaAlO_3 [7], не только максимально соответствуют решеточным параметрам сверхпроводника, но и обладают очень высокой диэлектрической постоянной (~ 1000), особенно при температурах, близких к T_c [8]. Однако проблема достижения однородности текстуры гибкой ВТСП ленты по всей длине провода пока не решена. Даже по длине

порядка 1 м разброс локальных значений $J_c \sim 50\%$ [3] и может достигать 3 раз [2].

Разрабатываются разные способы текстурирования, приводящие к росту J_c , транспортируемого через малоугловые границы зерен в длинных сверхпроводах. Одним из них является периодическое прессование: в случае Bi(2223)–Ag лент удалось достичь 30–40% роста J_c при 77 К [9].

Целью настоящего исследования являлось выяснение возможности использования локальной механической изгибной деформации (выше и ниже предела упругости) в интервале температур 77–300 К сверхпроводящих пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-b}$ на гибкой металлической подложке для повышения критической плотности транспортного тока J_c при 77 К.

Покрытые серебром толстые пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-b}$ ($\sim 10^{-6} \text{ m}$) на стальной ленте-подложке шириной 5 мм и толщиной 0.3 мм были изготовлены в Лос-Аламосской национальной лаборатории США и имели лучшие характеристики $J_c > 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 75 К без приложения магнитного поля [4]. Образцы представляли собой кусочки ленты длиной по 1 см, обозначенные буквами А–F, в каждом из которых был сделан сверхпроводящий мостик длиной 5–6 мм и шириной 250–300 μm . Соответственно площадь сечения мостика в образцах колебалась в пределах 2 – $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-2}$ (данные приведены в таблице).

Вольт-амперные зависимости для образцов снимались в Аргоннской национальной лаборатории на стандартной установке 4-зондовым методом при 77 К с помощью охлаждаемой ячейки с золотыми полосковыми электродами, к которым прижимался образец. Внутреннее расстояние между токовыми контактами было 6 мм, а между V-полосками — 2 мм. Соответственно этой геометрии нормальным критерием напряжения для кри-

Влияние деформации на критическую плотность тока в покрытых Ag пленках YBaCuO на гибкой подложке при 77 К (в собственном поле)

Образец	Сечение, 10^{-6} cm^2	Исходные образцы			Деформированные образцы			Изменение $J_c, \%$
		$I_c, \text{ A}$	$J_c, \text{ MA/cm}^2$	$V_c, 10^{-6} \text{ V}$	$I_c, \text{ A}$	$J_c, \text{ MA/cm}^2$	$V_c, 10^{-6} \text{ V}$	
<i>A</i> *	2.07	1.2	0.58	40.0	2.7	1.3	13.0	+124
<i>B</i>	2.64	2.0	0.76	0.17	1.8	0.68	0.12	-11
<i>C</i>	3.11	1.26	0.4	1.3	1.56	0.5	0.07	+25
<i>D</i>	2.46	2.3	0.93	0.6	2.3	0.93	0.4	0
<i>E</i> *	3.0	1.7	0.57	8.0	3.9	1.3	50.0	+128
<i>F</i> *	2.24	1.0	0.45	0.1	1.8	0.8	0.05	+78

П р и м е ч а н и е. I_c — инженерный критический ток, пропускаемый через образец, J_c — критическая плотность тока, V_c — критерий напряжения при достижении J_c . *A**, *E**, *F** — сильно (пластически) деформированные образцы; *B*, *C*, *D* — слабо (упруго) деформированные образцы.

тической точки излома кривой зависимости в шкалах $\lg I - \lg V$ следует считать $5 \cdot 10^{-7} - 10^{-6} \text{ V}$. Во избежание джоулевого разогрева при пропускании тока до 10 А через мостик указанного выше сечения в схеме использовался генератор импульсов тока $\sim 10^{-6}$ секунд. Исходные значения T_c образцов, измеренные как индуктивным, так и резистивным методами, были порядка 90 К (худшие — 88 К). Величина J_c для исходных образцов *A–F* изменялась в пределах $0.4 - 0.93 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 77 К в своем поле (приведено в таблице). Такая более чем двукратная разница в J_c наблюдалась в двуметровых проводах при локальных измерениях, что и представляет серьезную проблему для их будущего применения в электроэнергетике [2].

Изгибная деформация осуществлялась в криогенной ячейке так, чтобы имитировать возможные условия эксплуатации при изготовлении соленоидов: образец прижимался винтом по центру при 300 К контролируемым числом поворотов, затем охлаждался до 77 К и нагревался по мере выпаривания жидкого азота. Образцы *A**, *E**, *F** с исходно низкими значениями J_c были сильно деформированы (выше предела упругой деформации), а *B*, *C*, *D* — слабо (ниже этого предела). При этом можно было бы сравнивать эффект сильной (пластической) и слабой (упругой) деформации на образцы *C* и *F* с одинаково низкими J_c . Для сравнения только один сильно деформированный *E*-образец был подвергнут кислородному отжигу при 500°C в течение 1 h с медленным охлаждением, чтобы механические напряжения релаксировали. На рисунке, *A–F* показаны вольт-амперные кривые в логарифмических шкалах для всех исследованных образцов до и после механической деформации, а для *E*-образца — также после кислородного отжига. Линии показывают среднеквадратичное усреднение экспериментальных точек (квадраты — исходные кривые, кружки — после деформации). Видно, что в исходных образцах *B*, *E*, *F* вольт-амперные кривые имеют два излома, т.е. два значения J_c для разных сверхпроводящих кластеров, что свидетельствует о неоднородности текстуры пленки.

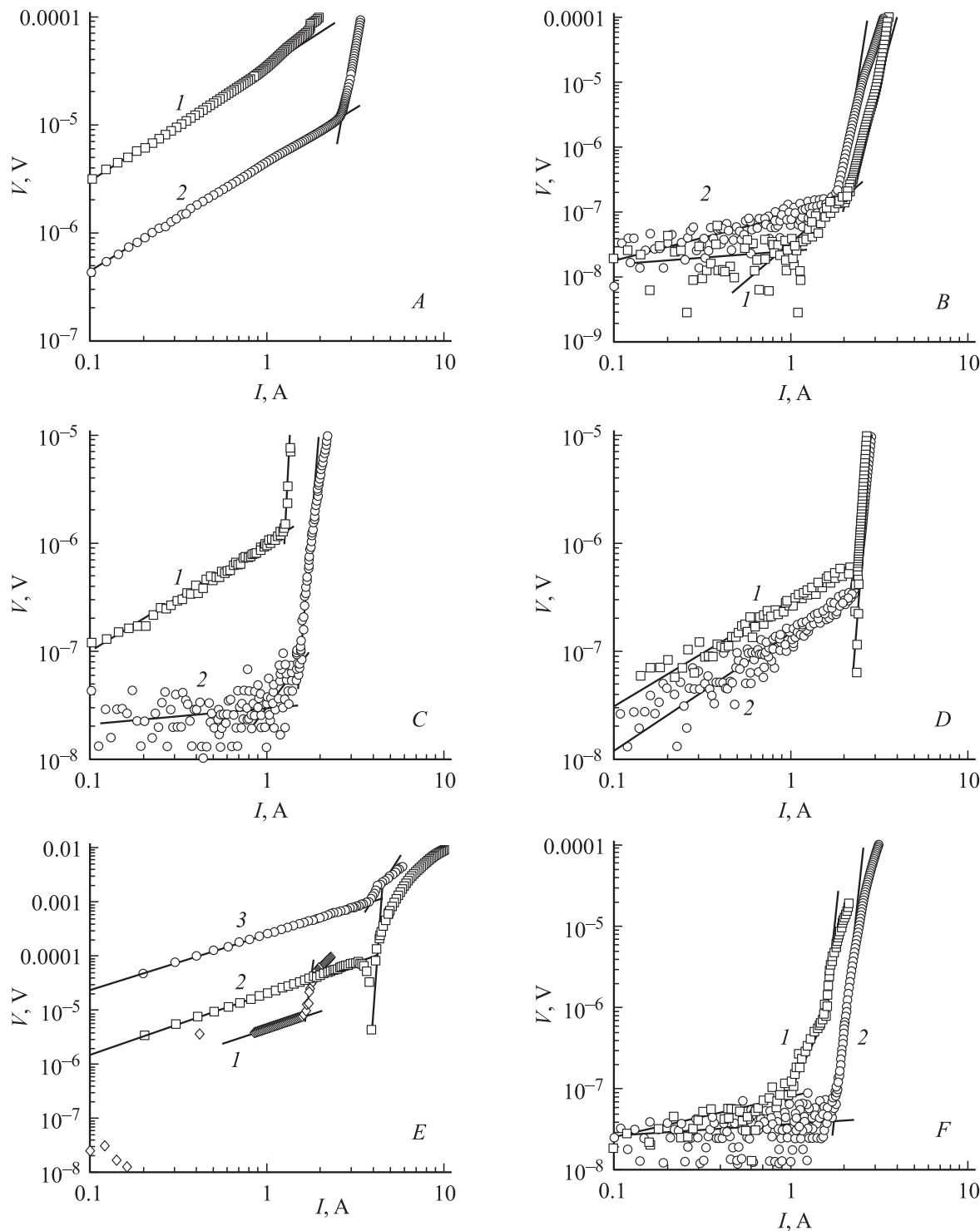
Экспериментально определенные значения критического тока I_c критерия напряжения V_c , а также расчетные значения сечения сверхпроводящего мостика, критической плотности тока J_c и ее изменения в результате деформации приведены в таблице.

Слабо деформированные образцы *B*, *C*, *D* либо не обнаружили изменений исходно высокого значения J_c (*D*-образец), либо они были незначительные. Однако в случае *C*-образца с исходно низким значением J_c следует отметить почти 20-кратное снижение критерия напряжения V_c , хотя при этом величина J_c выросла лишь на 25%, что свидетельствует об усилении межзеренной проводимости и обеспечивает снижение джоулевых потерь.

Образцы *A* и *E*, испытавшие сильную пластическую деформацию, обнаружили более чем двукратное возрастание критического тока, в случае же *F*-образца величина J_c выросла на 78%. Для образцов *A* и *F*, по-видимому, достигнуты оптимальные условия деформации, в результате которой кратный рост J_c сопровождался кратным снижением критерия напряжения. В случае же образца *E* при максимальном росте J_c критерий напряжения, наоборот, ухудшился в 5 раз. Сравнивая эффект пластической и упругой деформации на образцы *C* и *F* с одинаково низкими величинами J_c , можно видеть последовательность преобразования слабых межзеренных контактов в сильные с соответствующим уменьшением напряжения V_c .

Так, тестируя с шагом 1 cm участки ленты с локально низкими исходными значениями $J_c \sim 0.4 - 0.5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ и прикладывая к ним дозированную изгибную деформацию, повышающую J_c до уровня фрагментов с высокими значениями $\geq 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, можно достичь высокой однородности лент по длине и значительно улучшить транспортные характеристики длинных сверхпроводящих лент. Как было отмечено выше [9], метод периодического прессования Bi(2223)–Ag лент обеспечил 30–40% роста J_c .

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования влияния локальной изгибной механиче-



Влияние механической изгибной деформации на вольт-амперные кривые покрытых Ag $YBaCuO$ пленок при 77 К в собственном поле. A^* , E^* , F^* — сильно (пластически) деформированные образцы; B , C , D — слабо (упруго) деформированные образцы. Образец E после деформации отжигался в кислороде при 500°C . Линии — среднеквадратичное усреднение экспериментальных точек, показанных символами. 1 — образцы без дополнительной обработки, 2 — деформированные, 3 — отожженный.

ской деформации на вольт-амперные характеристики при 77 К покрытых серебром сверхпроводящих пленок $YBa_2Cu_3O_{7-b}$ на гибкой стальной подложке убедительно показали возможность значительного (двукратного) уси-

ления критической плотности тока, а также снижения критерия напряжения, что свидетельствует об усилении межзеренной проводимости и обеспечивает снижение джоулевых потерь.

Список литературы

- [1] Черноплеков *H.A.* // УФН. 2002. Т. 172. № 6. С. 716–721.
- [2] Shiohara *Y.*, Izumi *T.* // Mater. Rec. Soc. Symp. Proc. 2001. Vol. 659. P. III.1.1–9.
- [3] Foltyn *S.R.*, Arendt *P.N.*, Dowden *P.C.* et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. Vol. 9. N. 2. P. 1519–1522.
- [4] Jia *Q.X.*, Foltyn *S.R.*, Arendt *P.N.*, Smith *J.F.* // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80. N. 9. P. 1601–1603.
- [5] Watahiki *M.*, Jang *W.J.*, Sakai *N.*, Murakami *M.* // Physica C. 1998. Vol. 296. P. 43.
- [6] Гольман *Е.К.*, Плотин *Д.А.*, Разумов *С.В.*, Тумарин *А.В.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 9. С. 132–136.
- [7] Lebedev *O.I.*, Hamet *J.-F.*, Van Tendeloo *G.* et al. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. N 10. P. 5261–5263.
- [8] Lunkenheimer *P.*, Bobnar *V.*, Pronin *A.V.* et al. // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66. P. 052105 (1–4).
- [9] Marti *F.*, Huang *Y.B.*, Witz *G.* et al. // IEEE Trans Appl. Supercond. 1999. Vol. 9. N 2. P. 2521–2524.