

## ИЗМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНОК ВТСП ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С.В. Антоненко, А.И. Головашкин,  
В.Ф. Елесин, И.А. Есин,  
П.Б. Жилин, В.Е. Жучков,  
С.И. Красносвободцев,  
А.С. Молчанов, Е.В. Печень,  
Б.М. Попов, И.А. Руднев

Сверхпроводящие пленки  $YBa_2Cu_3O_7$  были облучены ионами  $He^{++}$  с энергией 3.6 МэВ при температурах 30 и 300 К. При низкотемпературном облучении обнаружено, что деградация  $T_c$  и  $j_c$  происходит медленнее, чем при  $T_{обл} = 300$  К; при небольших флюенсах наблюдается рост  $T_c$ ; нагрев до 300 К сопровождается значительным увеличением  $T_c$  и  $j_c$ .

В настоящее время имеется много экспериментальных фактов, демонстрирующих определяющую роль кислорода и его распределения в элементарной ячейке на сверхпроводящие характеристики ВТСП. Воздействие высокоэнергетичными ионами, нейтронами и электронами позволяют изменять положения атомов (в частности кислорода) в структуре ВТСП. Уже в первых работах была обнаружена необычайная чувствительность критических характеристик ВТСП к ионному [1, 2] и нейтронному [3] облучению. Эта чувствительность оказалась в 4–10 раз выше, чем в сверхпроводниках со структурой  $A15$ . Дальнейшие работы подтвердили эти результаты (см., например, [4, 5]). В упомянутых работах облучение проводилось при сравнительно высоких температурах (80–300 К). В то же время известно, что процесс образования радиационных дефектов может существенно зависеть от температуры.

Целью настоящей работы являлось сравнение влияния температурных условий облучения ( $T_{обл} = 30$  и 300 К) на дозовые зависимости  $T_c$ ,  $j_c$ . Оказалось, что температура облучения сильно влияет на скорость изменения  $T_c$  и  $j_c$ , приводя (в случае низкотемпературного облучения) к ряду необычных эффектов.

Три сверхпроводящие пленки  $YBa_2Cu_3O_7$  были получены методом лазерного напыления на подложки из титаната стронция. Пленки были облучены на циклотронном ускорителе ионами гелия. Интенсивность ионного пучка составляла  $10^{12}$ – $3 \times 10^{12}$   $см^{-2} с^{-1}$ . Основные характеристики образцов и температуры облучения приведены в таблице.

Режим облучения образцов 1 и 2 состоял в следующем. Образец 1 весь цикл облучался при  $T_{обл} = 30$  К. После набора флюенса непосредственно в камере ускорителя измерялись  $T_c$ ,  $\Delta T_c$ ,  $j_c$ . При измерениях образец не нагревался выше 100 К. Образец 2 между циклами низкотемпературного облучения выдерживался 10–

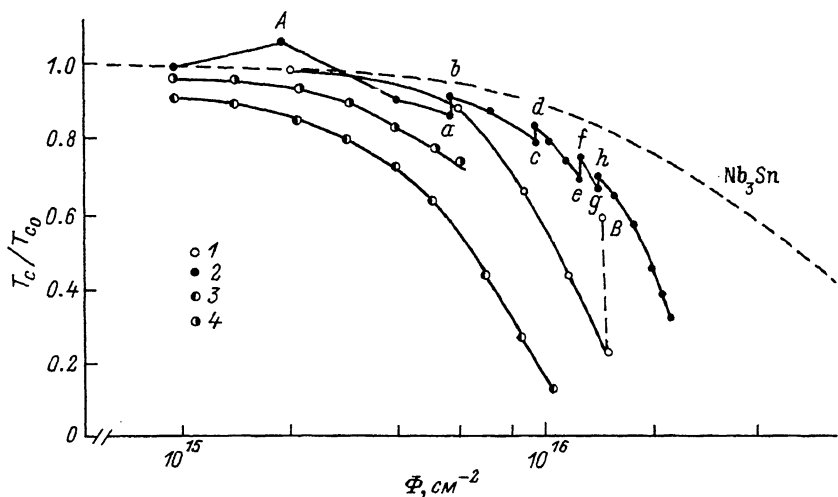


Рис. 1. Зависимость приведенной критической температуры от флюенса ( 1 - образец 1; 2 - образец 2; 3, 4 - образец 3 ( 3 - индукт. метод).

№ обр.	$T_{сн}, K$	$T_c, K$	$T_{ск}, K$	$j_{с77}$ A/cm <sup>2</sup>	Толщина, мкм	Температура облучения, K
1	81.5	75.0	69.8	-	0.110	30
2	89.7	88.8	88.0	$6.7 \times 10^5$	0.075	30
3	91.0	88.0	86.0	-	0.200	300

Примечание.  $T_{сн}$ ,  $T_c$ ,  $T_{ск}$  - температуры, соответствующие уровням 0.9; 0.5; 0.1 изменения электросопротивления при переходе в сверхпроводящее состояние;  $j_{с77}$  - плотность критического тока при  $T = 77$  K.

12 часов в вакууме при температуре 300 K; для этого образца исследовалась температурная зависимость электросопротивления (в диапазоне температур 20-300 K) после различных доз облучения.

Экспериментальные результаты приведены на рис. 1, 2. Анализ показывает, что в целом качественное поведение  $T_c$ ,  $j_c$ , удельного электросопротивления  $\rho$  при низкотемпературном облучении такое же, как и при  $T_{обл} = 300$  K. Действительно, наблюдается падение  $T_c$ ,  $j_c$  ( $j_c$  быстрее, чем  $T_c$ ), рост  $\Delta T_c$ ,  $\rho(T)$  (с изменением знака  $dp/dT$ ). Однако скорость изменения  $T_c$ ,  $j_c$  при

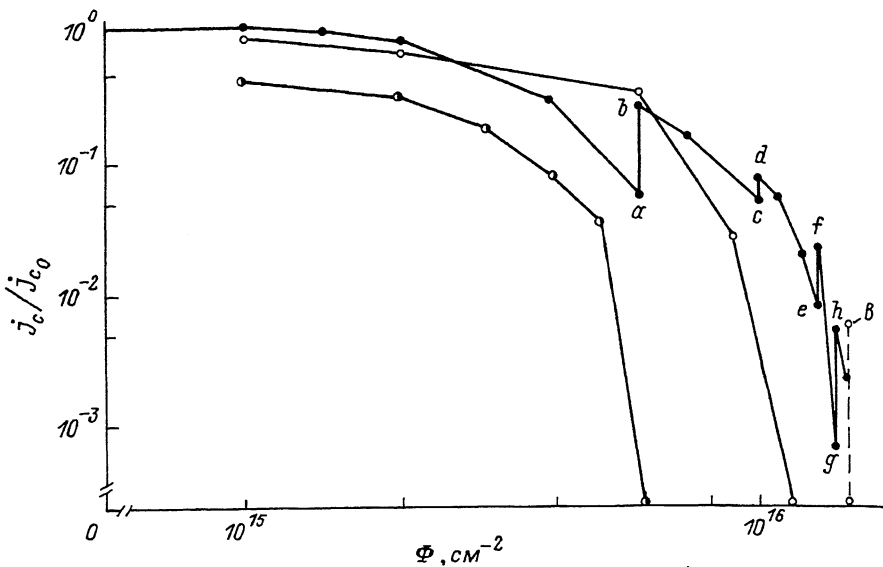


Рис. 2. Зависимость приведенного критического тока ( $T_{изм} = 20$  К) от флюенса (обозначения соответствуют рис. 1).

низкотемпературном облучении примерно в два раза меньше, чем при  $T_{обл} = 300$  К. Одновременно наблюдалось увеличение значения  $\Phi$ , при котором происходила смена знака  $\frac{d\rho}{dT}$  ( $\Phi_{30} = 1.1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> против  $\Phi_{300} = 4 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>). Такое поведение, если связать его с образованием радиационных дефектов, является необычным. Действительно, принято считать, что уменьшение температуры облучения замедляет процессы релаксации и рекомбинации дефектов и, следовательно, увеличивает вероятность дефектообразования. Вместе с тем следует отметить, что похожие явления, но менее выраженные наблюдались при низкотемпературном облучении  $Nb_3Sn$  [6].

Были отмечены также следующие особенности, присущие только низкотемпературному облучению. 1). Для образцов 1 и 2 при малых флюенсах ( $\Phi = 0.5-1 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) было обнаружено повышение  $T_c$  примерно на 1.5 К (точка А на рис. 1), которое сопровождалось уменьшением  $\Delta T_c$ ;  $j_c$  при этом практически не изменялось. 2). Выдержка образца 2 после низкотемпературного облучения в вакууме при 300 К в течение 10-12 часов приводила к частичному восстановлению сверхпроводящих свойств, т.е. к увеличению  $T_c$  и  $j_c$  (см. точки *a, b, c, d, e, f, g, h* на рис. 1, 2) и одновременному уменьшению  $\Delta T_c$  и  $\rho$ . 3). Выдержка облученных образцов на воздухе в течение двух недель при  $T = 300$  К привела к восстановлению  $T_c$  и  $j_c$  для образца 2 (точки В на рис. 1, 2). Значение  $T_c$  составило 49 К. Восстановление  $T_c$  сопровождалось уменьшением  $\Delta T_c$ ,  $\rho$ . Восстановленные значения

$T_c$ ,  $\Delta T_c$ ,  $\rho$  практически полностью совпали с соответствующими значениями, которые имела пленка при  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup>.

Анализ радиационного воздействия на ВТСП показывает, что имеется определенная аналогия с характером воздействия на сверхпроводники типа А15. Действительно, наблюдается падение  $T_c$ ,  $J_c$  с особенностями, присущими низкотемпературному облучению, рост  $\rho$ , смена знака  $d\rho/dT$  при определенных флюенсах, увеличение периода решетки и др. Имеются и отличия. Например, больший масштаб всех наблюдаемых явлений, падение  $T_c$  практически до нуля (в сверхпроводниках А15 выход на насыщение), неограниченный рост  $\rho$ . Оценки показывают, что экспериментальные данные можно интерпретировать, воспользовавшись моделью с пиком в плотности электронных состояний [7]. Однако используемый в модели [7] эффект размывания пика из-за рассеяния на дефектах следует дополнить учетом изменения положения уровня Ферми за счет перераспределения вакансий кислорода в элементарной ячейке. Последний эффект приводит к уменьшению концентрации дырок, и, следовательно, к полупроводниковому типу проводимости и обращению  $T_c$  в нуль.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Антоненко С.В., Евстигнеев В.В., Елесин В.Ф. и др. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Ч. П. Свердловск: УрО АН СССР, июль 1987, с. 207-208.
- [2] Антоненко С.В., Головашкин А.И., Елесин В.Ф. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1988, т. 47, с. 260-263.
- [3] Давыдов С.В., Карькин А.Е., Мирмельштейн А.В. и др. - ФММ, 1987, т. 64, в. 2, с. 399-400.
- [4] Geerk J., Linker G., Meyer O. et al. - Z. Phys. B, 1987, v. 67, p. 507-511.
- [5] Cost J.R., Willis J.O., Thompson J.D. et al. - Phys. Rev. B, 1987, v. 37, p. 1563-1568.
- [6] Дегтяренко Н.Н., Дежурко К.И., Елесин В.Ф. и др. - Препринт МИФИ 009-85, 1985, 24 с.
- [7] Александров А.С., Елесин В.Ф., Казеко М.П. - ФТТ, 1979, т. 21, с. 2062.

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию  
18 августа 1988 г.