

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ Хе (167 МЭВ) НА СТРУКТУРУ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛЕНТ YBCO

И.А. Свито¹⁾, П.Н. Дегтяренко²⁾, О.В. Королик¹⁾, А.В. Кухлевская¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, ivansvito184@gmail.com

²⁾Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская 13/2, Москва 125412, Россия, degtyarenkopn@inbox.ru

В работе исследованы структура, фазовый состав и электрофизические характеристики лент $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, подвергшихся облучению ионами ^{123}Xe (167 МэВ). Анализ дифрактограмм и спектров комбинационного рассеяния света показал, что в результате облучения помимо формирования в структуре слоя $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ протяженных аморфизованных областей диаметром 5 нм происходит отклонение от стехиометрии в сторону дефицита кислорода, что приводит к снижению температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Ключевые слова: тонкопленочные высокотемпературные сверхпроводники; радиационные дефекты; критическая температура; рентгеноструктурный анализ; спектроскопия комбинационного рассеяния света.

INFLUENCE OF Xe IONS (167 MeV) ON THE STRUCTURE AND CRITICAL PARAMETERS OF YBCO TAPES

I.A. Svito¹⁾, P.N. Degtyarenko²⁾, O.V. Korolik¹⁾, A.V. Kuhlevskaja¹⁾

¹⁾Belarusian State University,
4 Nezavisimosty Ave., 220030 Minsk, Belarus, ivansvito184@gmail.com

²⁾Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences,
13/2 Izhorskaya Str., 125412 Moscow, Russia, degtyarenkopn@inbox.ru

The paper presents studies of the structure, phase composition and electrophysical characteristics of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ tapes irradiated with ^{123}Xe ions (167 MeV). Analysis of the diffraction patterns and Raman spectra showed that, as a result of irradiation, in addition to the formation of extended amorphized regions with a diameter of 5 nm in the structure of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ layer, a deviation from stoichiometry towards oxygen deficiency occurs, which leads to a decrease in the transition temperature to the superconducting state.

Keywords: thin-film high-temperature superconductors; radiation defects; critical temperature; X-ray diffraction analysis; Raman spectroscopy.

Введение

В настоящее время в области энергетических приложений идет активная разработка различных устройств на основе сверхпроводящих материалов. Наиболее перспективными из них являются гибкие многослойные ленты, содержащие тонкую пленку (1-2 мкм) высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) состава $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Re – редкоземельный элемент), плотность критического тока J_c которых достигает при температуре жидкого азота 1 MA/cm^2 в собственном магнитном поле [1]. Поскольку указанные материалы имеют сильную анизотропию токонесущих свойств, значительное уменьшение плотности критического тока J_c в магнит-

ных полях ставит ограничения для широкого применения лент ВТСП. Одним из возможных путей модификации структуры пленок ВТСП с целью увеличения значений тока J_c является формирование дефектов (в виде нанокolon), которые могут служить центрами закрепления магнитного потока [2, 3].

Проведенные структурные исследования облученных высокоэнергетическими ионами Хе лент показали формирование в структуре слоя $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ протяженных аморфизованных областей диаметром около 5 нм, наличие которых при флюенсе $F_c \approx 3 \cdot 10^{10}$ ион/см² приводит к увеличению критического тока в магнитном поле примерно в 1.5-2 раза [3, 4]. Однако наря-

ду с формированием центров закрепления вихрей Абрикосова интерес представляет влияние ионного облучения на структуру, фазовый состав и критическую температуру T_c сверхпроводника.

Материалы и методы исследования

Исследовались коммерческие ленты ВТСП 2-го поколения (S-Innovations, Россия) на основе пленки $Y_{1+x}Ba_{1-y}Cu_3O_{7-\delta}$ толщиной 1 мкм. Ленты получены импульсным лазерным осаждением пленки YBCO на текстурированных буферных слоях $LaMnO_3/MgO/Y_2O_3/Al_2O_3$, осажденных на подложке хастелля С276 (60 мкм) [1]. Облучение лент осуществлялось пучком высокоэнергетических ионов $^{123}Xe^{27+}$ (167 МэВ) на ускорителе IC-100 (ОИЯИ, Дубна) [3]. Флюенсы ионов составляли 3, 10, 30 и $100 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Покрывающая пленка Ag при облучении отсутствовала.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) выполнялся на излучении $CuK\alpha$ ($\lambda=0.154178 \text{ нм}$) на дифрактометре Ultima IV (Rigaku, Япония). Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) измерялись с помощью конфокального спектрометра Nanofinder HE (LOTIS TII, Беларусь–Япония) при возбуждении лазером с длиной волны $\lambda=532 \text{ нм}$. Спектральное разрешение составляло 0.7 см^{-1} . Сопротивление определялось четырехзондовым потенциометрическим методом с помощью измерительной системы CFMS (Cryogenic Limited, Великобритания) в диапазоне температур 77–300 К.

Результаты и их обсуждение

На дифрактограммах пленок (рис. 1) обнаруживаются интенсивные рефлексы (003), (004), (005), (006), (007), характерные для орторомбической сверхпроводящей фазы $YBa_2Cu_3O_7$ (Pmmm) с преимущественной c -ориентацией зерен вдоль направления [001]. Облучение лент ионами Xe приводит к незначительному уширению и смещению рефлексов в сторону меньших углов дифракции.

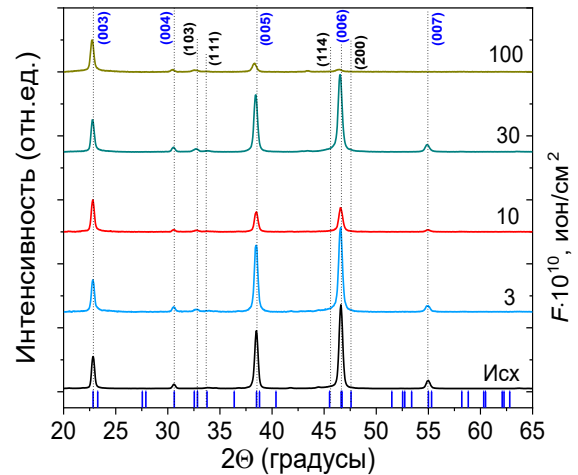


Рис. 1. Дифрактограммы исходной и облученных лент ВТСП. Интенсивность приведена к интенсивности пика (003) исходной ленты

Рассчитанный параметр решетки c исходной ленты составил 1.169 нм (рис. 2), что является типичным для этого материала. Он связан с дефицитом кислорода δ эмпирическим соотношением [5]:

$$7-\delta = 7.525 - 5.856 \cdot c \quad (1)$$

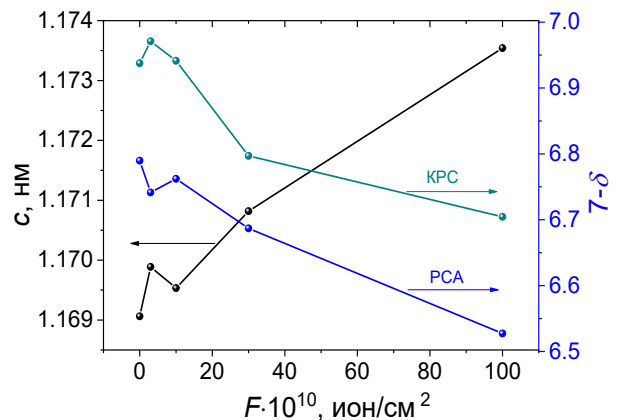


Рис. 2. Зависимости параметра кристаллической решетки c и содержания кислорода от флюенса ионов Xe

Как можно заметить, с ростом флюенса ионов Xe параметр решетки c и, соответственно, рост дефицита кислорода увеличиваются (рис. 2).

В спектрах КРС исходной ленты можно выделить характерные для YBCO пики 113, 150, 336, 500 см^{-1} (рис. 3).

Согласно литературным источникам пик 113 см^{-1} приписывается колебательной моде бария (Ba) [6, 7]. Его высокая интенсивность относительно пика 150 см^{-1}

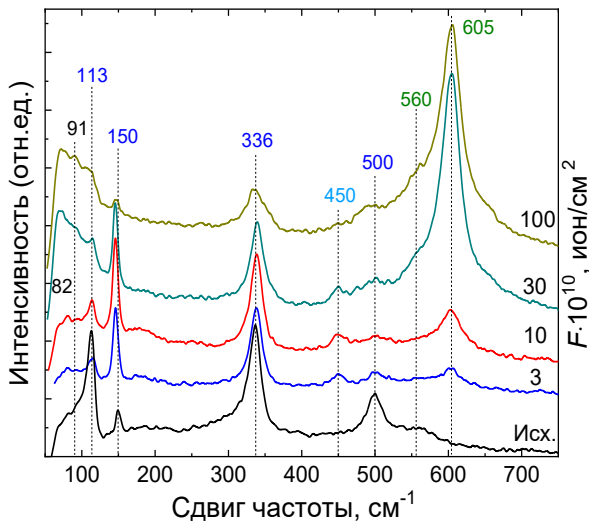


Рис. 3. Спектры КРС исходной и облученных ионами ксенона лент YBCO

($I_{113}/I_{150}=3,2$) для исходной ленты характерна для орторомбической решетки YBCO (рис. 4). Пик 150 см^{-1} приписывается колебательной моде меди (Cu2). Высокоинтенсивный пик с центром около 336 см^{-1} (противофазная centrosymmetric мода $O2^+/O3^-$) связывают с колебаниями атомов кислорода в плоскостях CuO_2 , которые считаются ответственными за сверхпроводящий ток. Пик около 500 см^{-1} (мода O4) относят к валентному колебанию связи Cu-O вдоль оси c кристалла. Положение пиков 150 и 500 см^{-1} зависит от содержания кислорода.

Присутствие в спектрах облученных ионами Хе лент пиков, характерных для исходной ленты, указывает на сохранение фазового состава. Наблюдаемое уширение пиков указывает на уменьшение длины свободного пробега фононов ввиду повышения дефектности кристаллитов и наличия аморфизованных областей. С увеличением флюенса до $30 \cdot 10^{10}$ ион/см² интенсивность моды Ba (113 см^{-1}) значительно уменьшается, а интенсивность моды Cu2 (150 см^{-1}) возрастает примерно в 3 раза, что характерно для формирования дефицитных по кислороду доменов. На их формирование указывает также появление пика 450 см^{-1} (синфазная centrosymmetric мода $O2^+/O3^+$), характерного для тетрагональной структуры t-YBCO.

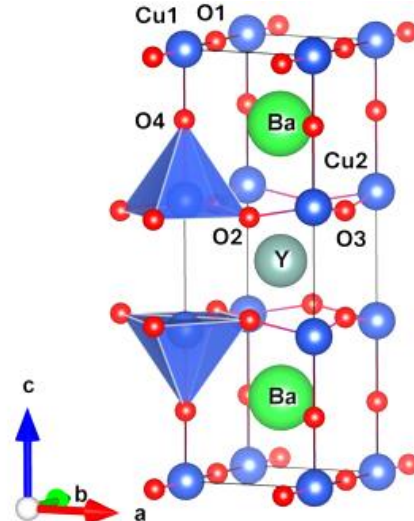


Рис. 4. Схема элементарной ячейки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

В то же время, интенсивность и положение пика 336 см^{-1} изменяются слабо, что говорит о достаточной стойкости токонесущих плоскостей CuO_2 к ионному воздействию. Появление пиков 560 и 605 см^{-1} в спектрах КРС облученных лент может быть связано с нарушением инверсионной симметрии кристалла, что делает некоторые ИК колебания активными в спектрах КРС [8]. Пики 82 и 91 см^{-1} могут указывать на разупорядочение в окружении бария [7].

Увеличение флюенса до 10^{12} ион/см² приводит к значительному падению интенсивности всех пиков, в том числе и 336 см^{-1} , что указывает на разупорядочение и аморфизацию лент ввиду высокой плотности ионных треков.

Положение пика 500 см^{-1} $\omega(\text{O4})$ наиболее чувствительно к содержанию кислорода в решетке и связано с ним эмпирическим соотношением [7]:

$$7 - \delta = 0,037 \cdot \omega(\text{O4}) - 11,555. \quad (2)$$

Расчет показал, что увеличение флюенса ионов Хе с $3 \cdot 10^{10}$ до $100 \cdot 10^{10}$ ион/см² приводит к росту дефицита кислорода на $\delta \approx 0,26$ (рис. 2). Различие в содержании кислорода, определенном методами РСА и КРС, может быть обусловлено как погрешностью аппроксимации слабого пика 500 см^{-1} , так и различной глубиной анализа данных методов.

Анализ температурных зависимостей сопротивления показал, что облучение приводит к монотонному уменьшению критической температуры (рис. 5), что может быть обусловлено ростом дефицита кислорода в решетке.

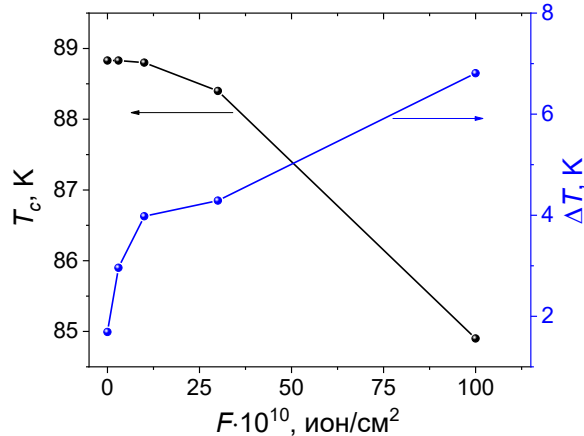


Рис. 5. Зависимость критической температуры сверхпроводника и ширины перехода от флюенса ионов Хе

При этом ширина перехода ΔT возрастает с ростом флюенса ионов, что логично связать с ростом структурного разупорядочения сверхпроводника.

Заключение

Методами РСА и спектроскопии КРС исследованы структура, фазовый состав коммерческих лент $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, подвергшихся облучению высокоэнергетическими ионами ^{123}Xe (167 МэВ). Показано, что в результате ионного облучения, помимо формирования протяженных аморфизованных областей диаметром в несколько нанометров, происходит увеличение параметра решетки c , сдвиг положения рамановских пиков 150 и 500 см^{-1} в сторону меньших частот, а также появление пиков 450 и 605 см^{-1} в спектрах КРС. Указанные особенности обусловлены отклонением от стехиометрии в сторону де-

фицита кислорода, что приводит к снижению температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Скуратову В.А. за проведение облучения образцов и Злоцкому С.В. за измерения дифрактограмм.

Библиографические ссылки

1. Molodyk A., Samoilencov S., Markelov A., Degtyarenko P., Lee S., Petrykin V., et al. Development and large volume production of extremely high current density $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting wires for fusion. *Scientific Reports* 2021; 11(1).
2. Obradors X., Puig T., Palau A., Pomar A., Sandiumenge F., Mele P., et al. Nanostructured Superconductors with Efficient Vortex Pinning. *Elsevier: Academic Press*; 2011. 303-349.
3. Suvorova E.I., Degtyarenko P.N., Karateev I.A., Ovcharov A.V., Vasiliev, A. L., Skuratov, V.A., Buffat, P. A.. Energy dependent structure of Xe ion tracks in YBCO and the effect on the superconductive properties in magnetic fields. *Journal of Applied Physics* 2019; 126(14): 145106.
4. Суворова Е.И., Дегтяренко П.Н., Овчаров А.В., Васильев А.Л. Влияние структуры ионных треков в YBCO на сверхпроводящие свойства композитных проводов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* 2022; (2): 26-32.
5. Benzia P., Bottizzoa E., Rizzi N. Oxygen determination from cell dimensions in YBCO superconductors. *Journal of Crystal Growth* 2004; 269: 625-629.
6. Maroni V.A., Reeves J.L., Schwab G. On-line characterization of YBCO coated conductors using Raman spectroscopy methods. *Applied Spectroscopy* 2007; 61: 359-366.
7. Li Y.B., Shelley C., Cohen L.F., Caplin A.D., Stradling R.A., Kula W. Raman studies of laser-written patterns in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ films. *Journal of Applied Physics* 1996; 80(5): 2929-2934.
8. Burns G., Dacol F.H., Feild C., Holtzberg F. Raman modes of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ with variable oxygen content. *Physica C* 1991; 181: 37-44.