

УДК 621.384.664:666.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КЕРАМИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ ВТСП-2 ЛЕНТ

*М.В. Мальцева, Ю.Н. Белотелова, П.В. Коновалов, В.В. Гурьев, М.В. Поликарпова,  
Д.С. Новосилова, П.А. Лукьянов, И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев*  
*АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт*  
*неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва*  
*MarVIMaltseva@bochvar.ru*

*В статье описано изготовление керамических мишеней дискового типа следующих номинальных составов:  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$ ,  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2O_3$  и  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2BaCuO_5$ , используемых для импульсного лазерного осаждения при изготовлении высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения (ВТСП-2). Исследован гранулометрический состав прекурсоров для изготовления мишеней и показана воспроизводимость среднего размера частиц. Методом рентгенофазового анализа установлено, что все керамические мишени содержат три фазы:  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ,  $Y_2BaCuO_5$  и небольшое количество  $SiO_2$ . Определены оптимальные условия роста сверхпроводящего слоя в процессе распыления мишеней на текстурированную ленту-подложку. Методом холловского сканирования захваченного магнитного потока в среде жидкого азота получено распределение критического тока по длине образцов ВТСП-2 лент. Показано, что сверхпроводящий слой на основе химического состава  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2O_3$  обеспечивает наибольшую величину критического тока по сравнению с другими использованными мишенями.*

Ключевые слова: ВТСП-2 лента, порошковый прекурсор, керамическая мишень, фазовый состав, гранулометрический состав, PLD метод, критический ток.

**OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF A CERAMIC TARGET FOR DEPOSITING A SUPERCONDUCTING LAYER OF HTSC-2 TAPES**

***M.V. Maltseva, Y.N. Belotelova, P.V. Konovalov, V.V. Guryev, M.V. Polikarpova, D.S. Novosilova, P.A. Lukyanov, I.M. Abdyukhanov, M.V. Alekseev***  
***JSC A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow***

*The article describes the fabrication of disk-type ceramic targets of the following nominal compositions:  $YBa_{1.8}Cu_3O_{7-x}$ ,  $YBa_{1.8}Cu_3O_{7-x} + 10 \text{ mol. } \% Y_2O_3$  and  $YBa_{1.8}Cu_3O_{7-x} + 10 \text{ mol. } \% Y_2BaCuO_5$ , used for pulsed laser deposition in the manufacture of second-generation high-temperature superconducting tapes (HTSC-2). The granulometric composition of precursors for the manufacture of targets was studied and it was shown that the average particle size is reproducible for powders of all compositions. Using the X-ray phase analysis method, it was found that all ceramic targets contain three phases:  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ,  $Y_2BaCuO_5$  and a small amount of CuO. Optimum conditions for the growth of the superconducting layer during target sputtering onto a textured substrate tape were determined. The critical current distribution along the length of the samples of HTSC-2 tapes was obtained by the Hall scanning method in a liquid nitrogen. It was shown that the superconducting layer based on the chemical composition of  $YBa_{1.8}Cu_3O_{7-x} + 10 \text{ mol. } \% Y_2O_3$  provides the highest critical current value compared to other targets.*

Keywords: HTSC-2 tape, powder precursor, ceramic target, phase composition, granulometric composition, PLD method, critical current.

**Введение**

В настоящее время высокотемпературные сверхпроводники 2-го поколения (ВТСП-2) представляют большой интерес из-за относительно высокой критической температуры сверхпроводящего перехода ( $T_c \sim 90 \text{ K}$ ) и возможности создания на их основе высокопольных сверхпроводящих магнитных систем с индукцией магнитного поля более 16 Тл, что выше, чем при использовании таких традиционных технических сверхпроводников, как  $Nb_3Sn$  и  $NbTi$ .

ВТСП-2 представляют собой сложные многослойные структуры, состоящие из ленты-подложки, на которую нанесены несколько буферных слоёв толщиной в несколько десятков нанометров каждый, затем слой ВТСП (1-3 мкм), покрытый защитным слоем серебра (1-2 мкм) и шунтирующим слоем меди (50-100 мкм) [1]. Существенный прогресс в развитии технологии изготовления ВТСП-2 лент сделал возможным проектирование электромагнитных систем на их основе для токамака с реакторными технологиями (ТРТ) [2]. Строительство ТРТ - это один из крупнейших отечественных проектов класса мега-сайенс. Отметим, что на сегодняшний день

в мировой практике нет прецедентов использования ВТСП-2 в магнитных системах такого класса. В проекте ТРТ ВТСП-2 должны функционировать при температурах 5-20 К и обеспечивать магнитное поле 8 Тл на оси токамака. Эти требования служат драйвером для дальнейшего развития ВТСП-2 технологии и повышения эксплуатационных характеристик.

Наибольшее распространение для производства ВТСП-лент получил метод импульсного лазерного осаждения (PLD). Исходным материалом для PLD служат керамические мишени из бариевых купратов редкоземельного элемента (РЗЭ) ( $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , где R – РЗЭ). Химический состав мишени определяется техническими требованиями к сверхпроводнику, а именно: рабочими диапазонами магнитных полей и температур.

Известно, что введение мелкодисперсных частиц несверхпроводящей фазы приводит к образованию дополнительных центров пиннинга и повышению токонесущей способности [3-8]. В работе [3] показано, что в диапазоне температур 5-20 К наибольшими значениями  $I_c$  и устойчивостью в магнитных полях обладают ВТСП-ленты на основе барий-иттриевого купрата. Дальнейшее улучшение токонесущей способности сверхпроводящего слоя  $\text{Y}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  может быть обеспечено с помощью внедрения искусственных центров пиннинга, которое можно осуществить как введением добавки в порошок  $\text{Y}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , так и формированием нестехиометрии в исходном соединении [4, 5]. Формированием нестехиометрии можно добиться более равномерного распределения несверхпроводящих включений по объёму материала.

В работах [6, 7] отмечалось, что избыток оксида иттрия способствует повышению токонесущих характеристик проводника. Ситуация несколько неоднозначна, поскольку не только сами нановключения  $\text{Y}_2\text{O}_3$  могут создавать дополнительные центры пиннинга, но и образующаяся наноразмерная фаза  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  в результате взаимодействия  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и  $\text{Y}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Вместе с тем избыток оксидов Ba и Cu оказывает негативное влияние на рост сверхпроводящих пленок [8].

В настоящее время в АО «ВНИИНМ» проводится ряд исследовательских работ, конечной целью которых является разработка технологии изготовления мишеней для последующего формирования из них сверхпроводящего слоя ВТСП-2 проводников для проекта ТРТ. В данной работе мы представляем промежуточные результаты исследования мишеней трех составов с недостатком по Ba и добавками  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ :  $\text{Y}\text{Ba}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $\text{Y}\text{Ba}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}\text{Ba}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10$  мол. %  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ .

### Материалы и методика эксперимента

Для изготовления керамических мишеней соответствующих составов необходимы гомогенные и мелкодисперсные порошковые прекурсоры. Такие свойства порошка обеспечивают равномерное распределение элементов по объёму изделия, а также

позволяют создавать керамику с плотностью 87-92% от максимальной, поскольку это способствует более однородному переносу материала мишени на подложку. При плотности менее 87% от теоретической возможно под воздействием лазерного луча выбивание из керамики крупных частиц или капель материала, что отрицательно сказывается на качестве ВТСП покрытия и, соответственно, на свойствах ВТСП проводников. При слишком большой плотности, более 92% от теоретической (в случае  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  это более  $6,0 \text{ г/см}^3$ ), на напылительных установках фирмы Bruker наблюдалось резкое уменьшение количества испаряемого материала, что негативно влияет на производительность процесса. По ранее разработанной опытной технологии [10] в АО «ВНИИНМ», которая состоит из стадий подготовки индивидуальных азотнокислых растворов Y, Ba, Cu, совместного оксалатного осаждения, термической обработки полученного порошка с последующим его прессованием, были синтезированы следующие порошковые прекурсоры:  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$ ,  $Y_2BaCuO_5$ .

Для получения мишеней с добавками в порошковые прекурсоры  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$  вводили  $Y_2O_3$  и  $Y_2BaCuO_5$  в количество 10 мол. %. Затем проводили смешивание в лабораторной шаровой мельнице «Pulverisette 5», размольные стаканы и шары которой выполнены из  $ZrO_2$ . Далее полученные продукты просеивали через сито с ячейками 200 мкм.

Для изготовления трех мишеней (с добавками и без) в полученные порошки вводили связующее вещество – 5% раствор поливинилового спирта в глицерине.

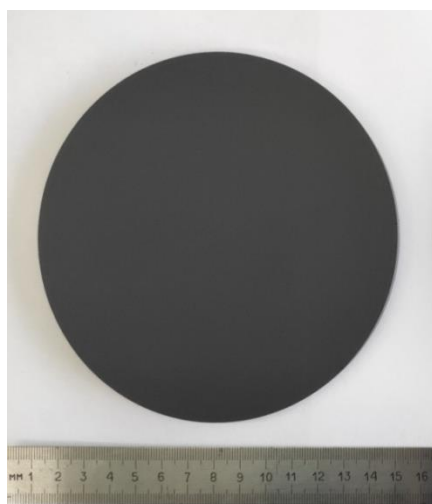


Рис. 1. Внешний вид керамической мишени состава  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$

Из подготовленных пресс-порошков формировали три заготовки мишеней  $\varnothing 145 \text{ мм}$  и высотой 8 мм составов  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } Y_2O_3$ ,  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } Y_2BaCuO_5$  и  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$ , которые затем проходили стадии сушки для выжигания связующего вещества и высокотемпературного отжига при  $900-930 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Исследование фазовых характеристик получаемых материалов проводили с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker Nano GmbH Berlin, Германия. Для

гранулометрического анализа использовали фотоседиментационный анализ на установке «Analizette-20» фирмы Fritch (Германия). Значение плотности определяли расчетным методом из данных, полученных в результате измерений объема (V) и массы (m) мишени по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} \pm 0,01 \text{ г/см}^3 \quad (1)$$

Изготовленные мишени передали в НИЦ «Курчатовский институт» для их последующего распыления методом PLD на заранее подготовленную ленту-подложку шириной 4 мм. Получение сверхпроводящего слоя с различным химическим составом осуществляли с поиском оптимальных условий роста для каждой мишени. Ростовые параметры для всех мишеней Y-Ba-Cu-O вне зависимости от наличия второй фазы были одинаковыми: температура нагревателя – 975 °С; давление O<sub>2</sub> – 100 мТорр; энергия лазерного излучения – 650 мДж; частота следования импульсов – 200 Гц; скорость движения ленты – 36 м/ч.

Исследование однородности сверхпроводящих свойств полученных ВТСП слоев проводили с помощью метода холловского сканирования захваченного магнитного потока в среде жидкого азота (77,4 К). Для этого использовали датчик Холла с чувствительностью 70 мкВ/мТ и размером активной области 0,1×0,2 мм<sup>2</sup>, который позиционировался по осям X-Y: ось Y в направлении ширины ленты, ось X в направлении длины ленты. Система позволяла сканировать область над предварительно намагниченным ВТСП-образцом с шагом сканирования 0,5 мм. Для намагничивания образцов использовали постоянные магниты NdFeB, установленные парой и встречными полюсами. Экспериментальная погрешность измерения магнитного поля ВТСП образца не более 2% от величины измеряемого поля.

Значение критического тока в точке  $I_c(x)$  рассчитывалось по наилучшей аппроксимации экспериментально измеренного профиля  $B_z(x,y)$  к формуле:

$$B_z(x,y) = \frac{I_c(x) \mu_0}{2\Delta} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{h^2 + (y - 2\Delta)^2}{h^2 + (y - \Delta)^2} - \frac{1}{2} \ln \frac{h^2 + (y - \Delta)^2}{h^2 + y^2} \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\Delta=2$  мм полуширина ленты; h – высота над ВТСП слоем, на которой проводится измерение профиля  $B_z(x,y)$ , является подгоночным параметром;  $I_c(x)$  - искомая величина критического тока.

Измерение толщины полученных пленок проводили на сканирующем электронно-ионном микроскопе (СЭИМ) Helios NanoLab 600i (FEI, США). Для измерения толщин слоёв с помощью сфокусированного пучка ионов Ga<sup>+</sup> были получены поперечные сечения образцов.

## Результаты и обсуждение

### *Исследование свойств прекурсоров и керамических мишеней*

На дифрактограмме мишени  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  отсутствовали рефлексы  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , что указывает на то, что соединение  $\text{Y}_2\text{O}_3$  реагирует с  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  с образованием фазы  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ . На рисунке хорошо видны характерные пики фазы  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  в диапазоне углов  $2\Theta=29,8^\circ-31,7^\circ$ . Также заметен небольшой рефлекс оксида меди при  $2\Theta=35,5^\circ$ , содержание которой не превышает 2 вес. %. (рис. 2).

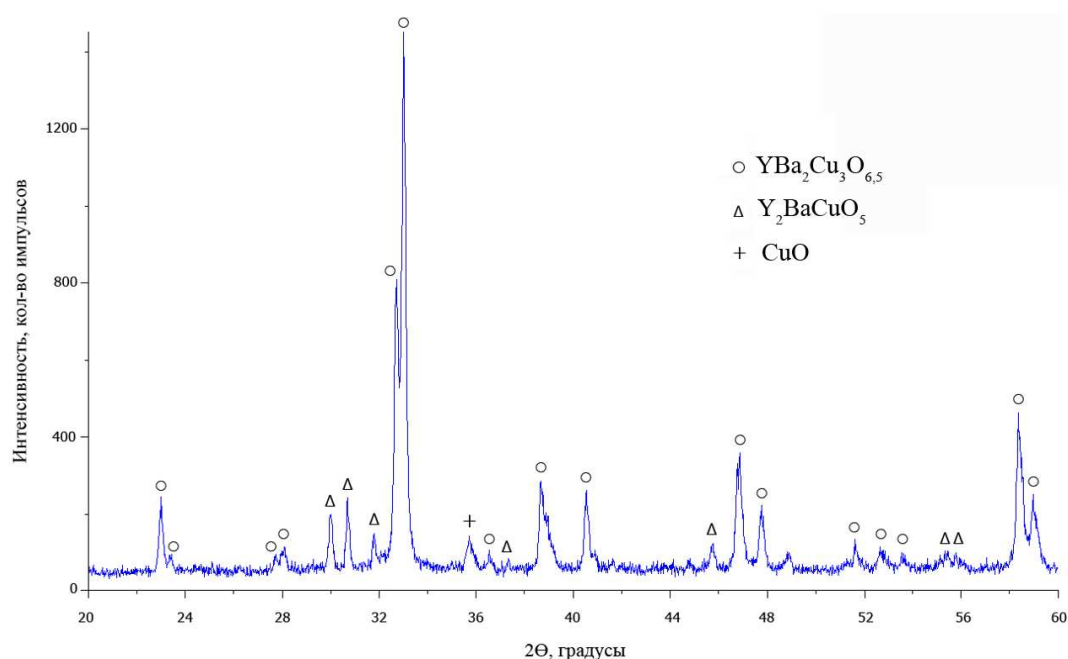


Рис. 2. Дифрактограмма фазового состава керамической мишени  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$

Фазовый состав мишени  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10$  мол. %  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  состоит из следующих фаз:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  и небольшого количества примеси  $\text{CuO}$  (менее 2 вес. %). На дифрактограмме мишени хорошо заметен тройной пик  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  в диапазоне углов  $2\Theta=29,8^\circ-31,7^\circ$  (рис. 3).

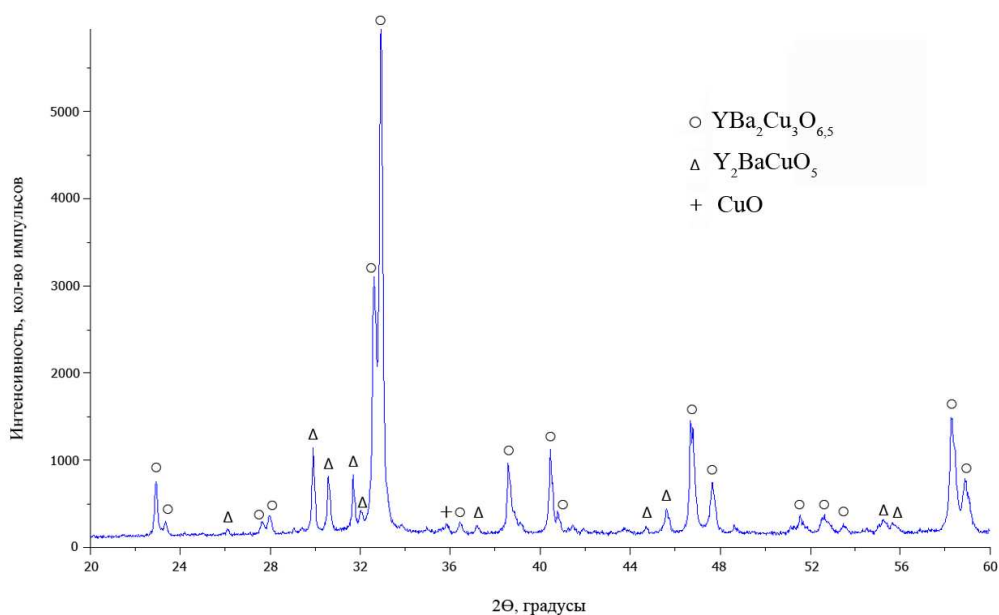


Рис. 3. Дифрактограмма фазового состава керамической мишени  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } Y_2BaCuO_5$

На дифрактограмме керамической мишени  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$  также видны рефлексы трёх соединений (рис. 4). Такой фазовый состав говорит о том, что недостаток Ва приводит к образованию несверхпроводящей фазы  $Y_2BaCuO_5$ , которая может являться дополнительными центрами пиннинга.

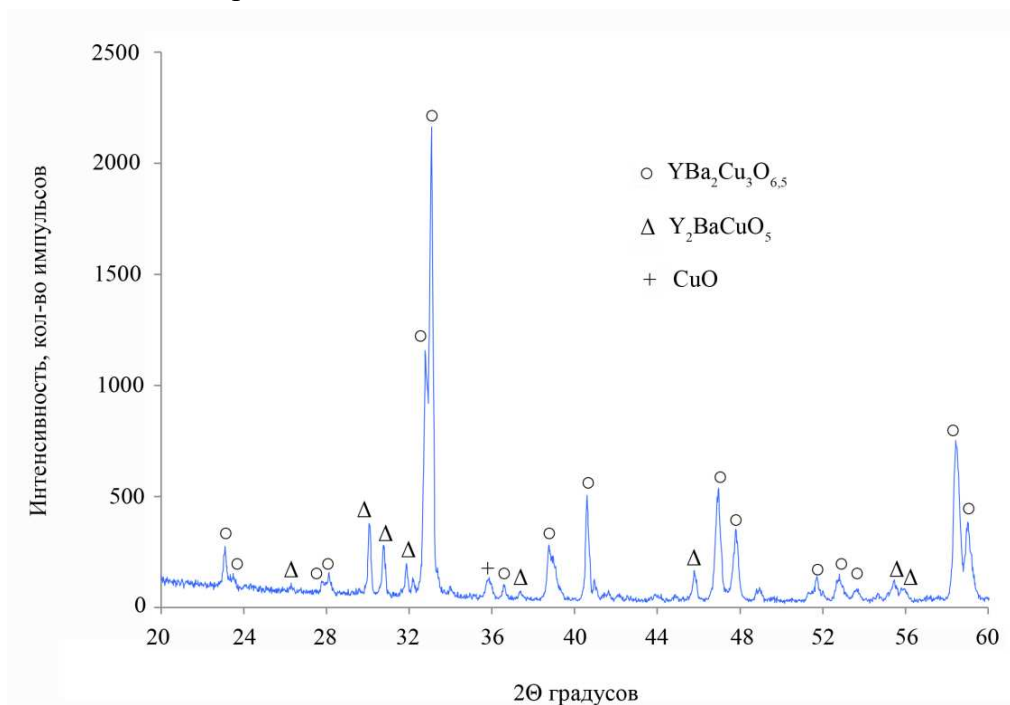


Рис.4. Дифрактограмма фазового состава керамической мишени  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$

На всех трех дифрактограммах присутствуют рефлексы небольшого количества  $\text{CuO}$ , который, вероятно, выпал в осадок в процессе соосаждения из-за избытка в исходном азотнокислом растворе меди. Избыток меди в растворе необходим для предотвращения её больших потерь [10].

Плотности полученных мишеней составили  $5,7 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$ , что соответствует 89% от их максимальных значений. Гранулометрический анализ показал, что медианный диаметр всех трех прекурсоров практически одинаков и находится в диапазоне 4,5-5 мкм, что свидетельствует о том, что используемая технология изготовления позволяет воспроизводить керамические изделия для метода PLD.

*Исследование образцов ВТСП-2 лент, полученных из мишеней разного состава*

На рис. 5 представлены распределения величины критического тока по длине образцов ВТСП-2 лент, изготовленных из мишеней  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ . Для удобства сравнения выбраны представительные участки длиной 130 мм. Открытые символы соответствуют толщине ВТСП слоя 1,2 мкм, закрытые символы толщине 2,4 мкм.

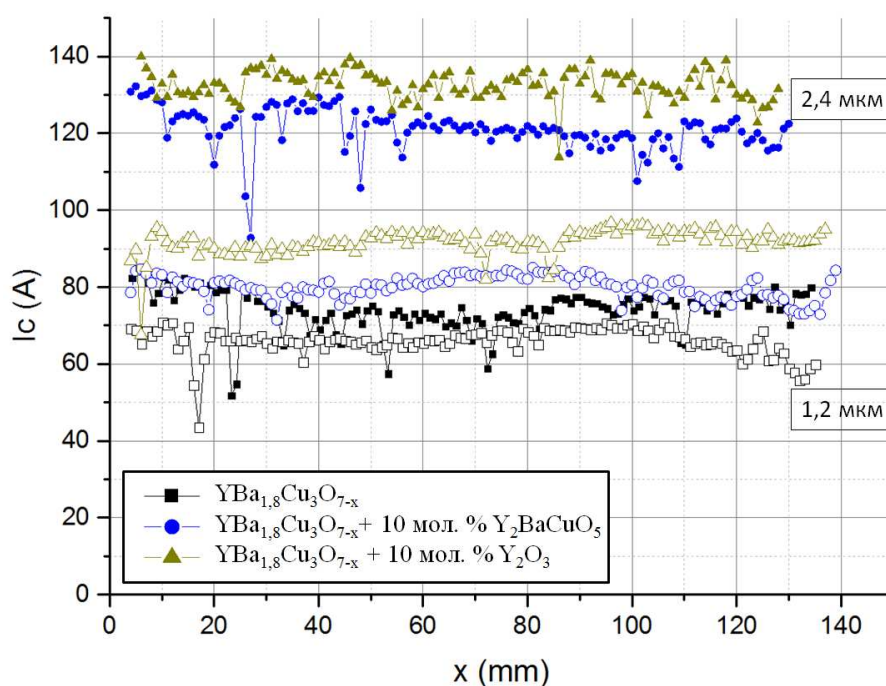


Рис. 5. Распределение критического тока по длине участка ВТСП-2 ленты шириной 4 мм при толщине 1,2 мкм (открытые символы) и 2,4 мкм (закрытые символы)

Для образцов, полученных из мишени  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , не происходит значительного увеличения тока при двукратном увеличении толщины. Это, по-видимому, говорит о формировании «а»-ориентированных кристаллитов при росте ВТСП покрытия из этих мишеней (т.е. ориентированных в плоскости ленты перпендикулярно оси прокатки). Напротив, при использовании мишеней  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{O}_3$

и  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2BaCuO_5$  такого эффекта не происходит. При толщине в 2,4 мкм надежно достигаются токи, превышающие порог в 100 А. Средняя по длине величина критического тока исследованных образцов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Толщина ВТСП слоя и среднее значение критического тока ВТСП лент, изготовленных из мишеней разного химического состава

Мишень	Толщина, мкм	Среднее значение $I_c$ , А	Стандартное отклонение, А
$YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$	1,2	66	4
	2,4	74	5
$YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$ мол. % $Y_2O_3$	1,2	92	3
	2,4	133	4
$YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$ мол. % $Y_2BaCuO_5$	1,2	80	3
	2,4	121	5

Из проведенных исследований видно, что ВТСП-2 ленты с толщиной сверхпроводящего слоя 2,4 мкм и шириной 4 мм, полученные из мишени с составом  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2O_3$ , позволяют достигать стабильного значения критического тока на уровне 133 А. Эта величина хорошо коррелирует с уровнем критического тока, полученного на ВТСП-2 лентах шириной 12 мм аналогичного состава фирмой SuperOx [11], измеренного по аналогичной методике в европейских лабораториях на длинномерных лентах (до 500 м). Дальнейшее повышение токовых характеристик ленты требует продолжения оптимизации фазового состава мишеней.

### Выводы

В работе описана технология изготовления керамических мишеней и приведены промежуточные результаты поиска оптимального состава для изготовления ВТСП-2 лент. Показано, что в описанной технологии средний размер частиц прекурсоров воспроизводится для всех порошков и находится в диапазоне 4,5-5 мкм. Проведена апробация трех номинальных химических составов мишеней:  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x}$ ,  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2O_3$  и  $YBa_{1,8}Cu_3O_{7-x} + 10$  мол. %  $Y_2BaCuO_5$ . Полученные мишени имели достаточно высокую плотность 5,7 г/см<sup>3</sup>, что предпочтительно при использовании методов физического распыления, такого как импульсное лазерное осаждение. Несмотря на различный номинальный состав, мишени имели аналогичный фазовый состав с наиболее интенсивными пиками от  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и  $Y_2BaCuO_5$  и следами CuO.

По дифрактограммам керамических мишеней видно, что недостаток по барии приводит к образованию несверхпроводящего соединения  $Y_2BaCuO_5$ , которое служит дополнительными центрами пиннинга. Показано, что введение добавок влияет на содержание  $Y_2BaCuO_5$ , при этом интенсивность пиков уменьшается от состава с добавкой 10 мол.%  $Y_2O_3$  к составу, в который её не вводили.

Показано, что достигнутый уровень критического тока соответствует мировым аналогам на коммерческих длиномерных ВТСП-2 лентах. Наилучшими характеристиками при 77 К в собственном магнитном поле обладают ленты со сверхпроводящим слоем на основе мишени  $\text{YBa}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 10 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{O}_3$ .

Работа проведена в рамках государственного контракта №Н. 4к.241.09.23.1069 от 26.04.2023 и выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

### Список литературы

1. Дергунова Е.А., Раков Д.Н., Борисов А.В., Цаплева А.С. *Материаловедение сверхпроводников на основе ВТСП, дигорида магния и пниктидов*. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. 100 с.
2. Красильников А. В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. №11. С. 970-985. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>.
3. Гурьев В.В., Куликов И.В., Абдюханов И.М., Алексеев М.В., Белотелова Ю.Н., Волков П.В., Коновалов П.В., Круглов В.С., Крылов В.Е., Лазарев Д.В., Никонов А.А., Овчаров А.В., Раков Д.Н., Шавкин С.В. Влияние редкоземельного элемента на скорость роста и критический ток ленточного высокотемпературного сверхпроводника // *Физика твердого тела*. 2023 г., Т. 65, №12. С. 2071-2073. DOI: <https://doi.org/10.61011/FTT.2023.12.56725.5015k>.
4. Salluzzo M., de Luca G.M., Marrè D., Putti M., Tropeano M., Scotti di Uccio U, and Vaglio R. Thickness effect on the structure and superconductivity of  $\text{Nd}_{1,2}\text{Ba}_{1,8}\text{Cu}_3\text{O}_z$  epitaxial films. *Physical Review*. 2005. Vol. 72. №13. P. 1-12.
5. Куликов И.В., Черных М.Я. Технология создания ВТСП лент второго поколения в НИЦ «Курчатовский институт». // *Вестник ВИТ «ЭРА»*. 2021. Т. 2. №2. С. 107-109.
6. Samoylenkov S.V., Gorbenko O.Y., Graboy I.E., Kaul A.R., Zandbergen H.W., Connolly E. Secondary phases in  $(001)\text{RBA}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  epitaxial thin films // *Chemistry of Materials*. 1999. Vol. 11. №9. P. 2417-2428. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm991016v>.
7. Mele P., Matsumoto K., Horide T., Ichinose A., Mukaida M., Yoshida Y. and Horii S. Insertion of nanoparticulate artificial pinning centres in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  films by laser ablation of a  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -surface modified target // *Materials Science, Physics Superconductor Science and Technology*. 2007. Vol. 20. №7. P. 616-620. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/7/006>.
8. Щукин А.Е., Кауль А.Р., Васильев А.Л., Руднев И.А. Синтез, структура и сверхпроводящие свойства тонкопленочных слоистых композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{Y}_2\text{O}_3$  как компонентов ВТСП-лент второго поколения // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021. Т. 23. №.1. С. 122-139. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3313>.
9. Effects of Yb on the electrical and microstructural properties of  $(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $x = 0 - 1.0$ ) superconductor. A. N. Jannah, S. G. Thang, C. Kong, A. B. P. Ilhamsyah, S.K. Chen, R. Abd-Shukur. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 16 (2021) 150903, doi: 10.20964/2021.01.38.

10. Ю.Н. Белотелова, Д.Н. Раков, П.В. Коновалов. Получение порошковых прекурсоров и керамических мишеней для производства высокотемпературных сверхпроводников / [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2022. – №5(116). – С. 20-26.

11. A. Molodyk\*, S. Samoilenkov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abraimov, A. Francis, G. Bradford, D. Larbalestier, C. Senatore, M. Bonura, A. E. Pantoja, S. C. Wimbush, N. M. Strickland, A. Vasiliev Development and large volume production of extremely high current density  $YBa_2Cu_3O_7$  superconducting wires for fusion// [www.nature.com/scientificreports](http://www.nature.com/scientificreports) Scientific Reports; (2021)  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>[www.nature.com/scientificreports](http://www.nature.com/scientificreports)