

## МАГНИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ В ВТСП-УВСО ЛЕНТ, ОБЛУЧЕННЫХ 5 МэВ ЭЛЕКТРОНАМИ И

А.А. Шодиев<sup>1</sup>, Э.М. Ибрагимова<sup>2</sup>, М.А. Муссаева<sup>3</sup>, Д.Б. Элмуротова<sup>4</sup>, Ф.Н. Хаитов<sup>5</sup>

<sup>1-3</sup>Институт Ядерной Физики АН РУз, Ташкент, пос. Улугбек, 100214

<sup>4</sup>Ташкентская медицинская академия, Ташкент, Узбекистан

<sup>5</sup>Термезский филиал Ташкентской медицинской Академии

**Аннотация.** Исследованы дефекты структуры в покрытых металлами микропленках высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на стальной ленте (SuperOx-2), созданные облучением пучком электронов с энергией 5 МэВ при токе 400 нА флюенсом  $10^{14}$  эл/см<sup>2</sup> на воздухе при 273 К. Обнаружено, что пики магнитосопротивления в интервале 100–300 К после облучения снижаются в 10 раз, коррелированно увеличение удельного сопротивления в  $>10^3$  раз и снижение подвижности носителей в  $>10^3$  раз при 120–160 К и 230 К, это свидетельствует об образовании центров пиннинга магнитного потока, о фазовых переходах 2-го рода из нормального металла в смешанное магнитное состояние, а затем в сверхпроводящее состояние.

**Ключевые слова:** *Высокотемпературная сверхпроводимость, УВСО, облучения электронами, дефекты структуры, магнитосопротивление.*

Сверхпроводимость как явление вызывает повышенный интерес более ста лет. В 1986 г. открыта высокотемпературная сверхпроводимость в материалах на основе оксида меди [1]. В 21 веке производят ВТСП провода и ленты уже 2 поколения на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  для силовых кабелей на 200 А и ограничителей тока 500 МВА (77 К) для электросетей, генераторов тока (65 К) для ветряных электростанций,  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  для магнитных катушек на 10–20 Тесла  $\perp$   $c$ -оси (10–20 К) **в ускорительной и медицинской технике** [2–4]. Для достижения таких высоких показателей технологи разрабатывают как химические, так и радиационные способы создания наноразмерных центров пиннинга - захвата магнитного потока. Пленки УВСО применяются в магнитометрии и высокочастотных устройствах, таких как резонаторы, перестраиваемые фильтры, антенны, **приемные катушки медицинских томографов** и т.д. Использование ВТСП позволяет улучшить параметры аппаратуры [5]. Востребованы однородные по толщине пленки, которые получают магнетронным или электронно-лучевым напылением [6], подбирая состав мишени к режиму напыления. В работе [7] были оценены возможности технологий электронной литографии для получения наноструктур с разной шириной линий из ВТСП  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на подложках из титаната стронция после фильтрации и без фильтрации частиц эрозионного факела для получения разных характеристик рельефа

поверхности при импульсном лазерном напылении и измерены некоторые электрические характеристики наноструктур. В работе [8] рентгеновские дифрактограммы для образцов пленок получали в режиме шагового сканирования при комнатной температуре на порошковом дифрактометре Rigaku D/MAX RC (CuK $\alpha$  -излучение, графитовый кристалл-анализатор) в геометрии фокусировки по Брэггу-Брентано. Съемку вели в интервале углов  $2\theta = 5\text{--}85^\circ$  с шагом  $\Delta(2\theta) = 0,02^\circ$ . В ходе рентгенофазового анализа было установлено наличие следующих кристаллических фаз: YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (YBCO), YBa<sub>2</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub>, CeO<sub>2</sub>, кубической фазы примерного состава Zr<sub>0.72</sub> Y<sub>0.28</sub>O<sub>1.862</sub> (YSZ), SiO<sub>2</sub>, Au. Все идентифицированные фазы являются высокоориентированными, о чем свидетельствует наличие отражений, принадлежащих только одной зоне: (001) – YBCO, (001) – YBa<sub>2</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub>, (100) – CeO<sub>2</sub>, (100) – YSZ, (001) – SiO<sub>2</sub>, (111) – Au. Наличие девяти порядков отражения зоны (001), обнаруженных для пленки YBCO, свидетельствует о ее высоком структурном совершенстве.

Образцы ВТСП лент YBaCuO SuperOx-2 получены из ОИЯИ, изготовлены по технологии импульсного лазерного нанесения (PLD) [2,3].

**Объекты.** В качестве объектов исследования были выбраны ВТСП ленты 2-го поколения, где слой толщиной 5–8  $\mu\text{м}$  сверхпроводящего состава YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> наносили на ленту толщиной 40  $\mu\text{м}$  и шириной 4 мм из стали С-276 (Ni-Cr-Fe) и покрывали 3 микрослоями металлов Ag, Cu, PbSn (промышленная марка SuperOx, изготовлено компанией S-Innovations, Russia-Japan, [www.superox.ru](http://www.superox.ru)) [9].

Нами тоже применен этот метод измерения в интервале 80–300 К, включающем сверхпроводящее и нормальное состояние и фазовый переход 2 рода между ними, как адекватно имитирующий условия эксплуатации ВТСП – изделий в энергетике, *медицине и ускорительной технике* [3]. В установке Hall Effect Measurement System (HMS-7000, Escoria, Korea) в приложении магнитного поля  $H = 0,556$  Тесла измеряли магнетосопротивление  $R \perp H$ .

**Метод облучения электронами.** Образцы лент в виде отрезков длиной 5 см крепили параллельно направлению развертки пучка и облучали в ИЯФ АН РУз пучком электронов с энергией 5 МэВ на ускорителе «Электроника У-003» до флюенса  $10^{14}$   $\text{см}^{-2}$ , ток 400 нА.

На рис. 1 (А) приведены полулогарифмические зависимости  $R(T)$  до и после электронного облучения указанными дозами чтобы увидеть резкие магнитные фазовые переходы (диа $\downarrow$  - пара $\uparrow$ ) и значительные уменьшения  $R$  при 220 К, свидетельствующие о конденсации носителей (как и  $< 100$  К). До облучения пик  $R$  при 160 К связан с нанофазой Cu<sub>2</sub>O и YBCO<sub>6.6</sub> (химический пиннинг) [1,2], который подавляется YBCO<sub>7</sub> и радиационным пиннингом нанофазами CuO, Y<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. На рис. 1 (Б) показаны спектры рентгеновской

дифракции YBCO-ленты SuperOx-2: до и после облучения электронами указанными дозами, снятые в режиме отражения на рентгеновском дифрактометре Emprugan.

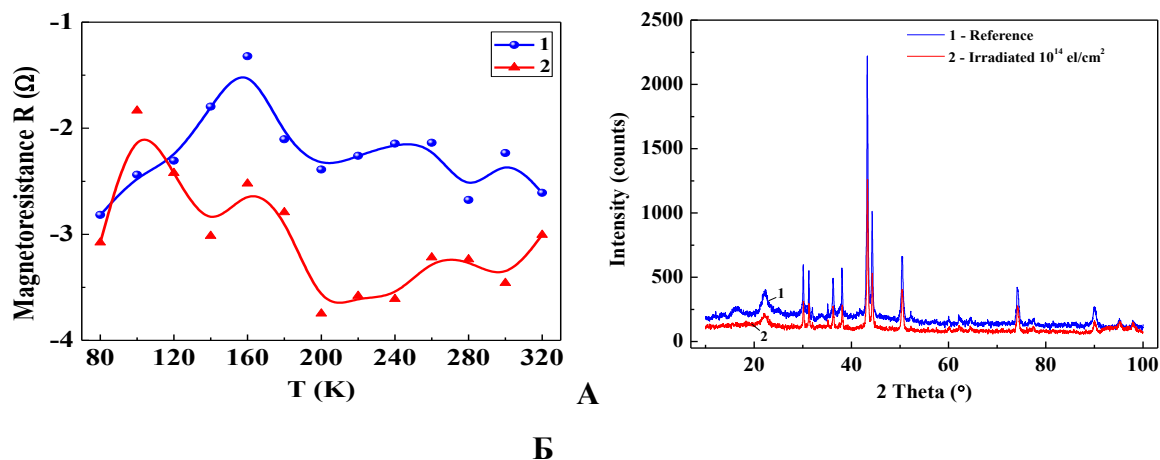


Рис.1. Магнитоопrotивление в приложении поля 0,556 Тесла YBCO-ленты SuperOx-2: 1– до облучения, 2– сразу после облучения электронами 5 МэВ при плотности тока 400 нА/см<sup>2</sup> интегрального потока 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> в воздухе при 273 К (А); Спектры рентгеновской дифракции: 1– до облучения, 2 – сразу после облучения электронами интегральный потока 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> (Б)

Ленты, облученные > 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> приобретают более высокую токнесущую способность при 77 К, чем до облучения, поэтому такая радиационная обработка рекомендуется для ограничителя тока электросети. Результаты структурно-фазового анализа YBCO-ленты SuperOx-2 до и после облучения приведены в Таблицах 1.

Таблица 1. Фазовый состав определен в % из спектров XRD в YBCO-ленты SuperOx-2

Необлуч.	4Pb+4Sn+3Sn <sub>0.049</sub> Pb <sub>0.951</sub> + 60Cu+10CuO +11Ag+3Ba <sub>2</sub> YCu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> +5Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Облучен. 10 <sup>14</sup> см <sup>-2</sup>	3BaPbO <sub>3</sub> +3BaSnO <sub>3</sub> +69Cu+ 8Ag +7Y+10Y <sub>2</sub> Sn <sub>2</sub> O <sub>7</sub>

В необлученном образце обнаружены слабые рефлексы и повышенный малоугловой фон от аморфных фаз и интенсивные рефлексы от кристаллических фаз. Как видно из рентгенограммы (рис.1 Б) и Таблицы 1 после облучения 2θ углы самых интенсивных рефлексов в многослойной структуре ВТСП-ленты (где поверхностный слой 3 мкм PbSn нанесен на Cu) смещаются в сторону повышения углов, а их интенсивность уменьшается в два раза.

Обнаружено, что пики магнитосопротивления в интервале 100–300 К после облучения снижаются в 10 раз, коррелированно увеличение удельного сопротивления в >10<sup>3</sup> раз и

снижение подвижности носителей в  $>10^3$  раз при 120–160 К и 230 К, это свидетельствует об образовании центров пиннинга магнитного потока, о фазовых переходах 2-го рода из нормального металла в смешанное магнитное состояние, а затем в сверхпроводящее состояние.

Работа поддерживается Программой НИР для ИЯФ АН РУз по Постановлению Президента № 4526 от 21.11.2019.

Авторы благодарны сотрудникам Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация, М.С. Новикову и С.И. Тютюнникову за предоставление образцов.

### Литература

1. Bednorz J.G., Muller K.A. Possible high  $T_c$  Superconductivity in the Ba-La-Cu-o system // *Z. Phys. B – Condensed matter*. 1986, Vol. 64, P.189–193. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01303701>.

2. Rupich M.W. Second-generation (2G) coated high-temperature superconducting cables and wires for power grid applications // *Superconductors in the Power Grid*, 2015, p.97. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-029-3.00004-2>.

3. Grigoriance A.G., Kulikov I.V., Shiganov I.N., Bauman N.E. Features of obtaining superconducting layer in second-generation high-temperature superconducting tapes by pulsed laser deposition method // *Photonics* 2017, № 4 /64/, P.22–33. doi:10.22184/1993-7296.2017. 64.4.22.33.

4. Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A., Degtyarenko P., Lee S., Petrykin V., Gaifullin M., Mankevich A., Vavilov A., Sorbom B., Cheng J., Garberg S., Kesler L., Hartwig Z., Gavrilkin S., Tsvetkov A., Okada T., Awaji S., Abraimov D., Francis A., Bradford G., Larbalestier D., Senatore C., Bonura M., Pantoja A. E., Wimbush S. C., Strickland N. M., Vasiliev A. Development and large volume production of extremely high current density  $YBa_2Cu_3O_7$  superconducting wires for fusion // *Scientific Reports* | (2021) 11:2084. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>.

5. Schneider J., Kohlstedt H., Woerdenweber R. Nanobridges of optimized  $YBa_2Cu_3O_7$  thin films for superconducting flux-flow type devices // *Appl. Phys. Lett.* 1993, Vol. 63(17), P. 2426–2428.

6. Sochnikov I., Shaulov A., Yeshurun Y., Logvenov G., Božovic I. Large oscillations of the magnetoresistance in nano-patterned high temperature superconducting films // *Nature Nanotechnology*. 2010, Vol. 5, P. 516–519.

7. Ильин А.И., Иванов А.А., Трофимов О.В., Фирсов А.А., Никулов А.В., Зотов А.В. Изготовление и электрические характеристики ассиметричных колец из ВТСП  $YBCO$  пленок,

полученных методом импульсного лазерного напыления // Микроэлектроника, 2019, Том 48, № 2, С. 147–154. doi:10.1134/S0544126919020042.

8. Порохов Н.В., Калабухов А.С., Чухаркин М.Л., Маресов А.Г., Хрыкин Д.А., Кленов Н.В., Снигирев О.В. Физические основы технологии создания высокотемпературных сверхпроводящих проводов третьего поколения на кварцевых подложках // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015, № 2, С. 56–61.

9. Михайлова Г.Н., Воронов В.В., Троицкий А.В., Дидык А.Ю., Демихов Т.Е., Суворова Е.И. Способ обработки высокотемпературного сверхпроводника // Патент РФ 2013, № 2477900.