

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 538.945, 538.911

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

© 2021 г. И.В. Куликов*, М.Я. Черных

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Kulikovivan1990@gmail.com

В статье представлена разработанная в НИЦ «Курчатовский институт» технология создания высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения, продемонстрированы их электрофизические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Токонесущие ленты на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) перспективны для изготовления токоограничителей, высокопотенциальных магнитов, генераторов, трансформаторов, накопителей энергии, двигателей, систем размагничивания корпусов судов и прочих устройств, применение которых приводит к существенной экономии, связанной с низкими энергопотерями в сверхпроводниках. Лента второго поколения на основе ВТСП представляет собой многослойную структуру, состоящую из гибкой металлической подложки, буферных и сверхпроводящего слоев [1]. В качестве сверхпроводящего чаще всего используются редкоземельные ВТСП-материалы типа $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (ReBCO), демонстрирующие высокую плотность критического тока и ее устойчивость в магнитных полях. Материалы типа ReBCO являются анизотропными: для достижения высоких критических характеристик ВТСП пленки должны обладать острой биаксиальной текстурой [2].

Самыми распространенными подходами формирования текстурированного буферного слоя на поликристаллической ленте являются технологии Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) и Alternative Beam Assisted Deposition (ABAD), в которых осаждение оксидного слоя проводится с ассистированием ионным пучком [3, 4]. В качестве подложки используются ленты из нержавеющей стали или сплава Hastelloy, обладающие высокой прочностью на разрыв и не являющиеся магнитными.

Формирование буферных слоев высокого кристаллического качества, обеспечение наследования текстуры в эпитаксиальном сверхпроводящем слое, оптимизация и поддержание ростовых условий для ВТСП материала на длинных лентах – все это является сложной технологической задачей. На данный момент в НИЦ «Курчатовский институт» реализован полный цикл создания ВТСП лент 2-го поколения. Достигнутые результаты находятся на мировом уровне и представлены в настоящей статье.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реализованный технологический процесс создания ВТСП лент 2-го поколения на основе ReBCO состоит из 5 основных этапов:

1. Подготовка поверхности ленты к росту;
2. Нанесение текстурированного буферного слоя;
3. Эпитаксиальный рост завершающего буферного слоя и сверхпроводящего слоя;
4. Нанесение защитного слоя серебра;
5. Нанесение шунтирующего слоя меди.

На первом этапе осуществляется подготовка ленты к последующему росту. Для этого она механически полируется с применением суспензии оксида алюминия с уменьшением размеров частиц от 1.0 до 0.3 мкм. Далее осуществляется ультразвуковая мойка полированной ленты в моющем растворе, промывка деионизованной водой и сушка. После чего осуществляется оптический контроль качества полировки.

На втором этапе осуществляется нанесение текстурированного буферного слоя YSZ. Для этого

чистую полированную ленту наматывают на барабан большого диаметра и помещают в установку. Затем производится откачка камеры до давления 10^{-5} Торр и осуществляется ионная чистка поверхности ленты в течении 10 минут. Затем производится напыление буферного слоя YSZ толщиной около 2 мкм методом ABAD, после чего производится контроль толщины и кристаллического качества осажденного слоя. Острота текстуры осажденного слоя YSZ составляет 9° .

На третьем этапе осуществляется рост завершающего буферного (CeO_2) и сверхпроводящего слоев методом импульсного лазерного осаждения. Все мишени предоставлены ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. На данном этапе важно получить оптимизировать толщину и получить хорошую текстуру буферного слоя: с увеличением толщины CeO_2 возрастает острота текстуры, однако ухудшаются механические свойства ленты [5]. При толщине CeO_2 150–200 нм удается достичь остроты текстуры 4° (рис. 1).

Эпитаксия сверхпроводящего слоя является сложной технологической задачей, так как *c*-ориентированный ReBCO растет в очень узком диапазоне ростовых параметров, а поддерживать их необходимо длительное время. Для увеличения производительности установки в ней используются 2 подхода: поверхность сканируется несколькими лазерными пучками и лента при перемотке с катушки на катушку несколько раз заходит в ростовую зону. Это позволяет в несколько раз увеличить скорость осаждения по сравнению со стандартной лентоперемоточной установкой. Толщина осажденного ВТСП слоя составляет до 4.0 мкм.

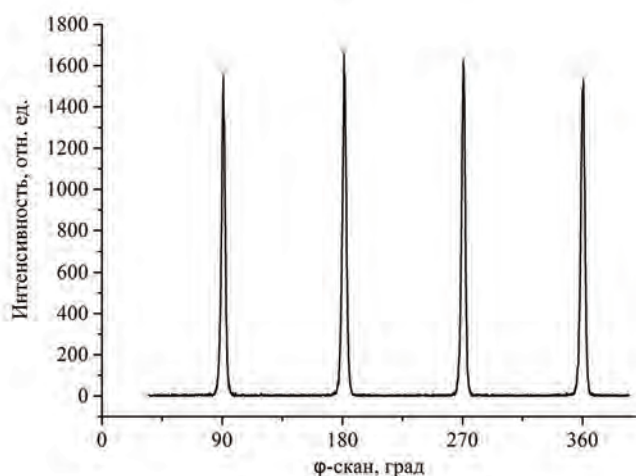


Рис. 1. Полюсные фигуры буферного слоя CeO_2 , осажденного на 4 мм ленте-подложке с текстурированным слоем YSZ

На четвертом этапе лента с нанесенным ВТСП слоем покрывается с двух сторон защитным слоем серебра методом термического испарения в вакууме толщиной около 2 мкм. Для лучшей адгезии серебра перед процессом напыления поверхность активируют тлеющим разрядом плазмы в среде кислорода. После нанесения защитного слоя серебра лента подвергается наислораживающему отжигу в течение 2 часов.

На последнем этапе, в зависимости от конечного назначения ленты, возможно нанесение шунтирующего слоя меди. Для нанесения меди толщиной до 20 мкм лента последовательно проходит через 9 гальванических ячеек со скоростью до 10 м/ч.

Технологическое оборудование позволяет производить ВТСП ленты длиной до 100 м шириной 4 мм, а установка импульсного лазерного осаждения позволяет осаждать на ленты подложки до 1 км шириной до 40 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Критический ток ВТСП лент, полностью сформированных в НИЦ «Курчатовский институт», составляет до 240 А/4 мм ширины ленты при температуре жидкого азота в собственном поле для лент из $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Такие ленты подходят для устройств, работающих при температурах выше 65 К и полях до 0.1 Тл. Для устройств, в которых требуются большие поля при низких температурах, лучше всего подходят ленты из нестехиометрического $\text{YBa}_{1.8}\text{Cu}_3\text{O}_x$ (рис. 2).

У авторов имеется опыт создания ВТСП лент на различных типах подложек. Ранее была разрабо-

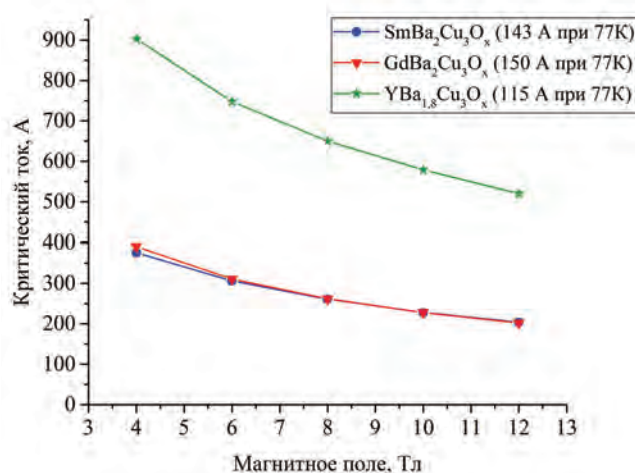


Рис. 2. Полевая зависимость в перпендикулярном внешнем магнитном поле для ВТСП лент 2-го поколения шириной 4 мм при 4.2 К

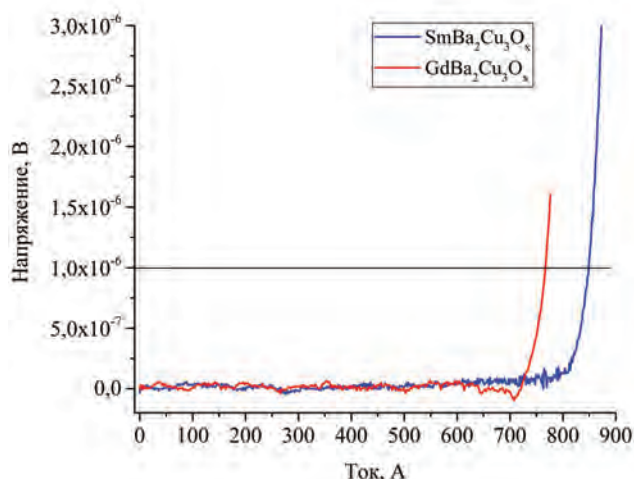


Рис. 3. ВАХ ВТСП лент 2-го поколения шириной 12 мм при 77 К

тана технология формирования функциональных и сверхпроводящих слоев на текстурированных лентах NiW [6, 7], в настоящее время проводятся работы на подложках из хастеллоя с текстурированным слоем MgO. На данных подложках выращены сверхпроводящие пленки, критический ток достигает 850 А/12 мм ширины для SmBa₂Cu₃O_x и 770 А/12 мм ширины для GdBa₂Cu₃O_x (рис. 3). Данные ленты хорошо подходят для использования в устройствах, работающих при температурах выше 65 К и в магнитных полях до 0,1 Тл. Полученные результаты находятся на мировом уровне.

ВЫВОДЫ

В статье представлена технология создания ВТСП лент 2-го поколения, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт». В НИЦ «Курчатовский институт» имеется все необходимое оборудование для производства ВТСП лент 2-го поколения длиной до 100 м. Характеристики получаемых сверхпроводящих лент находятся на мировом уровне. Разработанная технология позволяет производить ВТСП ленты для широкого круга задач с

использованием различных материалов в качестве сверхпроводящего слоя. Развитие собственной технологии создания ВТСП лент из отечественных материалов позволит снизить зависимость от импорта технологий в важном для обороноспособности страны направлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xiong X., Lenseth K.P., Reeves J.L. et al. High throughput processing of long-length IBAD MgO and epi-buffer templates at SuperPower // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007, m. 17, №2, c. 3375–3378.
2. Durrell J.H., Rutter N.A. Importance of low-angle grain boundaries in YBa₂Cu₃O₇ – δ coated conductors // *Superconductor Science and Technology*. 2008, m. 22, №1, c. 013001.
3. A. Ibi, T. Izumi, S. Miyata et al. Surface roughness of MgO thin film and its critical thickness for optimal biaxial texturing by ion-beam-assisted deposition // *J. Appl. Phys.* №109, 2011, c. 113992.
4. L. Kirchhoff, J. Knoke, B. Prause et al. Processing of Long-Length YBCO Coated Conductors Based on Stainless Steel Tapes // *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*. №17, в. 2, 2007, c. 3235–3238.
5. Fuji H., Honjo T., Nakamura Y. et al. Deposition of CeO₂/YSZ buffer layer on Hastelloy substrates for MOD process of YBa₂Cu₃O_{7-x} film // *Physica C: Superconductivity*. 2001, m. 357, c. 1011–1014.
6. Krylova T.S., Chernykh I.A., Chernykh M.Y. et al. YBa₂Cu₃O_x/SrTiO₃ multilayer approach on textured Ni-W tapes: Morphology, structure and critical current density improvement // *Thin Solid Films*, 2016, m. 598, c. 289–292.
7. Куликов И.В., Крылова Т.С., Черных М.Я. и др. Ступенчатый подъем температуры в процессе формирования сплошных эпитаксиальных пленок сверхпроводников YBa₂Cu₃O_{7-x} для повышения токонесящей способности ВТСП лент второго поколения // *Научные технологии в машиностроении*, 2017, №11, с. 3–9.