

05.5;06

Разработка подхода формирования эпитаксиальных структур $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ – интерслой – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ с высокой токонесущей способностью

© М.Я. Гараева, И.А. Черных, Т.С. Крылова, Р.И. Шайнуров,
Е.П. Красноперов, М.Л. Занавескин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва
E-mail: igor.chernykh@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 июня 2014 г.

Предложен подход, основанный на формировании многослойных эпитаксиальных структур $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ – интерслой – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Применение интерслоев более простых кубических оксидов SrTiO_3 и CeO_2 позволяет останавливать рост кристаллических дефектов при формировании ВТСП слоя. Обнаружен эффект перетекания тока через интерслои толщиной 10–50 нм. Применение данного подхода позволяет увеличивать токонесущую способность кратно числу ВТСП слоев. Предложенный подход принципиально решает проблему деградации критической плотности тока с толщиной слоя $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.

Одной из первостепенных задач в области разработки ВТСП 2G лент является поиск путей повышения токонесущей способности. Прямое повышение толщины $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) пленок не приводит к желаемому увеличению токонесущей способности в связи с деградацией критической плотности тока (J_c). При увеличении толщины YBCO пленок с 250 до 2000 нм происходит падение J_c в четыре раза, при дальнейшем увеличении толщины пленок J_c практически не увеличивается [1–2]. Эффект деградации J_c связывают с накоплением различного вида дефектов в пленке при увеличении ее толщины: возникновение пор, a -ориентированных кристаллитов (h00), несверхпроводящих включений, ухудшение текстуры, дефицит кислорода в приповерхностных слоях [1–3]. В настоящее время обсуждается вопрос об увеличении токонесущей способности ВТСП лент за счет формирования многослойных эпитаксиальных структур типа YBCO – интерслой – YBCO [4]. Таким образом, изучение токонесущей способности от-

дельных сверхпроводящих слоев и многослойной структуры в целом является актуальной задачей.

Главными требованиями для реализации эпитаксиального роста интерслоя на поверхности YBCO пленки являются соответствие параметров решеток интерслоя и YBCO слоев, коэффициентов температурного расширения, а также отсутствие химического взаимодействия между материалами YBCO и интерслоя. Очевидно, что таким требованиям удовлетворяют материалы буферных слоев для роста эпитаксиальных пленок YBCO, наиболее подходящими из которых являются SrTiO₃ (STO), CeO₂ [5–7].

Подход настоящей работы заключается в использовании интерслоев при формировании пленки YBCO. В такой архитектуре сверхпроводящие слои разделены интерслоями с более простой кристаллической структурой и стехиометрическим составом. Идея использования интерслоев заключается в остановке накопления кристаллических и морфологических дефектов в пленках YBCO. В результате сверхпроводящие слои сохраняют высокую плотность тока, и ток будет аддитивно увеличиваться с числом слоев.

В нашей работе рост сверхпроводящих и буферных слоев осуществлялся методом импульсного лазерного осаждения. Для распыления применено излучение эксимерного лазера на смеси Kr–F, плотность энергии на мишени составляла 2–3 J/cm². В качестве подложек применены текстурированные металлические ленты типа RABiTS, состоящие из сплава Ni, легированного 5 ат.% W. Была применена распространенная буферная архитектура NiW/Y₂O₃/YSZ (ZrO₂+8% Y₂O₃)/CeO₂. В качестве интерслоев были использованы пленки STO и CeO₂, при этом ростовые параметры при переходе от роста YBCO к интерслою оставались неизменными: температура роста — 760°C, давление кислорода — 350 mTorr. Для измерения критического тока (I_c) использовался четырехконтактный метод. Ток подводился через защитное серебряное покрытие, все измерения выполнялись при температуре $T = 77.4$ К. Определение критического тока проводилось по критерию 1 μV/cm (0.4 μV при длине токонесущего мостика 4 mm, ширина токонесущего мостика составляла 1 mm). Контроль морфологии поверхности покрытий осуществлялся с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке Quanta 3D 200i, FEI Co. Дифракционные спектры измерялись с помощью порошкового дифрактометра BRUKER D8 ADVANCE в режиме Θ – 2Θ в геометрии Брегга–Брентано. Более

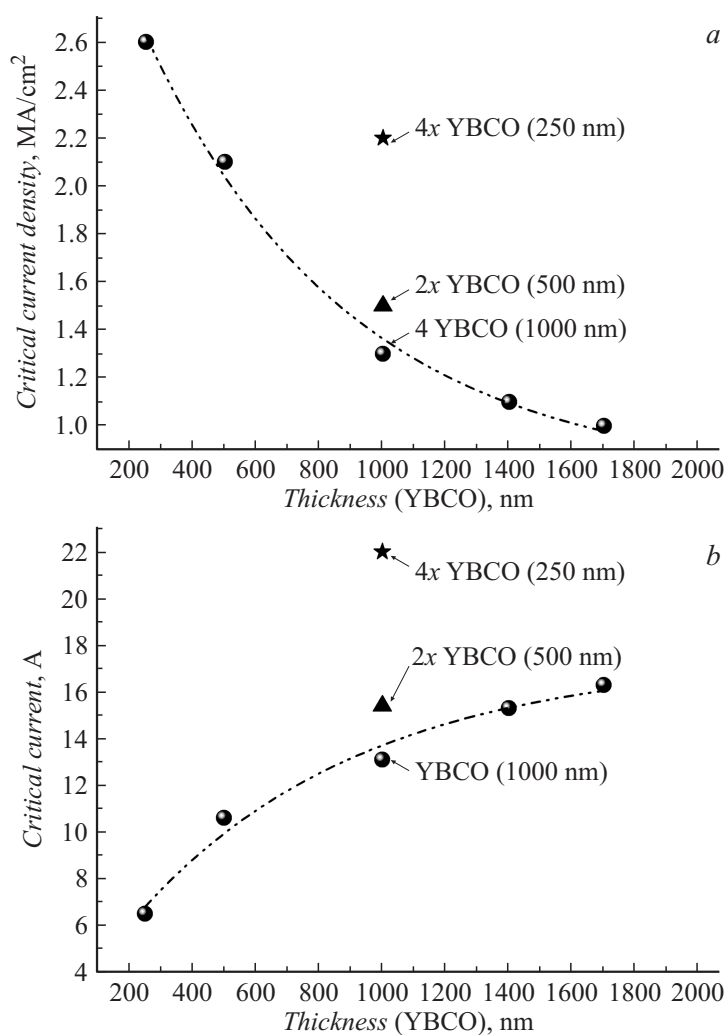


Рис. 1. Зависимость критической плотности тока (а), критического тока от толщины пленок YBCO (b). Значения для многослойных пленок указаны для архитектур с использованием интерслоя STO толщиной 10 nm. ● — 1 слой, ▲ — 2 слоя, ★ — 4 слоя.

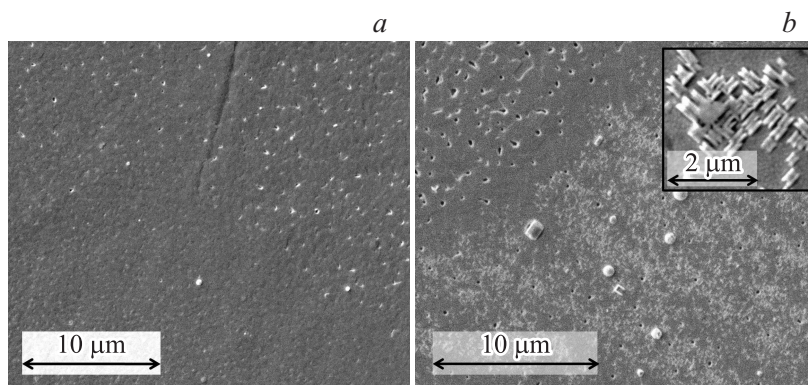


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности ВТСП пленок: *a* — толщиной 250 nm, *b* — толщиной 1 μm. На увеличенной вставке приведено скопление *a*-ориентированных кристаллитов.

детальное описание эксперимента приведено в ранее опубликованных работах [8,9].

На первом этапе работы была изучена зависимость критической плотности тока однослойных YBCO пленок от толщины. Значения I_c и J_c сформированных пленок различной толщины приведены на рис. 1. Показано, что с увеличением толщины YBCO слоя наблюдается рост критического тока, при этом происходит падение критической плотности тока по экспоненциальному закону: при увеличении толщины сверхпроводящей пленки от 250 nm до 1 μm наблюдается уменьшение критической плотности тока на 50%. На рис. 2 приведены РЭМ-изображения поверхности пленок различной толщины. Для пленок толщиной 1 μm и выше наблюдается изменение топографии поверхности: видно большое количество пор, отдельные области покрыты *a*-ориентированными кристаллитами (рис. 2, *b*). Следует отметить, что рост пленки на разных зернах отличается, что может быть связано с разориентацией зерен подложки RABiTS на большие углы. В совокупности эти факторы могут приводить к падению критической плотности тока, что согласуется с работами [1–3].

На втором этапе были сформированы двухслойные ВТСП структуры с использованием интерслоев STO, CeO₂ с толщинами 10 и 50 nm

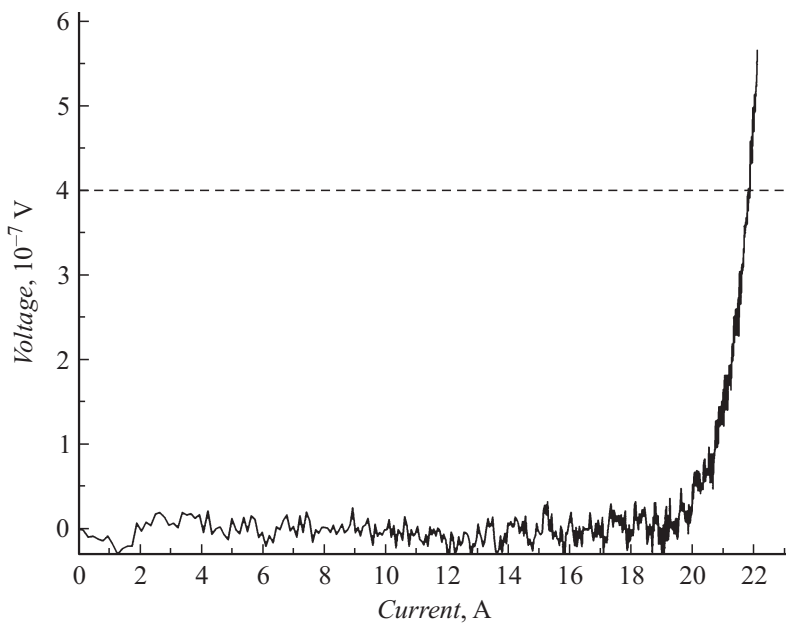


Рис. 3. ВАХ четырехслойной архитектуры с общей толщиной ВТСП 1 μm .

и толщиной слоев YBCO 500 nm. Для структур с использованием промежуточных слоев CeO_2 10 и 50 nm получены следующие значения I_c (и J_c): 13.1 A (1.3 MA/cm²) и 15.9 A (1.6 MA/cm²) соответственно. Значения I_c (и J_c) для структур с использованием промежуточного слоя STO не зависят от толщины интерслоя и составляют 15.4 A (1.5 MA/cm²) (рис. 1). Полученные результаты свидетельствуют о том, что происходит перетекание тока через интерслои толщиной 10–50 nm.

Значительного повышения токонесущей способности в двухслойных структурах не наблюдалось, результаты сравнимы с однослойными пленками YBCO толщиной 1 μm . Возможно, это связано с развитой морфологией пленок YBCO толщиной 500 nm, при которой формирование интерслоя не позволяет получить высокого качества вышележащего слоя YBCO. Образец с интерслоем CeO_2 толщиной 10 nm продемонстрировал более низкие показатели токонесущей способности:

4* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 20

на дифрактограмме сформированного образца обнаружен BaCeO_3 . Этот факт связан с взаимодействием интерслоя и слоя YBCO — на границе раздела происходит образование несверхпроводящей фазы BaCeO_3 . Таким образом, рост верхнего слоя YBCO осуществлялся не на оксиде церия, а частично на CeO_2 , частично на BaCeO_3 .

Заметного увеличения токонесущей способности по сравнению с однослойной пленкой YBCO удалось достичь в многослойных структурах с использованием более тонких ВТСП слоев (250 nm) с общей толщиной слоя YBCO $1 \mu\text{m}$ ($4 \times 250 \text{ nm}$). На рис. 3 представлена ВАХ четырехслойного образца: значение I_c составило 22.0 А ($J_c = 2.2 \text{ MA/cm}^2$). Сравнивая данные рис. 1, легко заметить, что у четырехслойного образца критический ток практически в 2 раза выше, чем для однослойной пленки YBCO толщиной 1000 nm, а критическая плотность тока лишь на 15% ниже, чем у однослойной пленки толщиной 250 nm.

Таким образом, применение многослойной архитектуры YBCO –интерслоя– YBCO позволяет решить проблему деградации критической плотности тока с толщиной слоя YBCO : высокое значение критического тока свидетельствует о перетекании тока через диэлектрические слои с толщинами 10–50 nm и позволяет формировать YBCO пленки без существенной деградации J_c в отдельных слоях. Предложенный метод позволяет достичь значения токонесущей способности YBCO пленок 220 А/см ширины ленты при толщине слоя сверхпроводника всего $1 \mu\text{m}$.

Авторы выражают благодарность Г.Л. Платонову, Е.А. Головковой и В.В. Гурьеву за помощь в проведении измерений.

Список литературы

- [1] *Foltyn S.R., Jia Q.X., Arendt P.N., Kinder L., Fan Y., Smith J.F.* // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75. N 23. P. 3692–3694.
- [2] *Zhang H., Yang J., Wang S., Wu Y., Lv Q., Li S.* // *Physica. C.* 2014. V. 499. P. 54–56.
- [3] *Ohki K., Develos-Bagarinao K., Yamasaki H., Nakagawa Y.* // *Journal of Physics: Conference Series.* 2008. N 97. P. 012142(5 pp).
- [4] *Foltyn S.R., Wang H., Civale L., Ji Q.X., Arendt P.N., Maiorov B., Li Y., Maley M.P., MacManus-Driscoll J.L.* // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. N 16. P. 162505–162505-3.

- [5] *Cheung Y.L., Jones I.P., Abell J.S., Button T.W., Maher E.F.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2007. V. 20. N 3. P. 216–221.
- [6] *Shi D.Q., Ma P., Ko R.K., Kim H.S., Chung J.K., Song K.J., Park C.* // *Chinese Physics.* 2007. V. 16. N 7. P. 2142–2147.
- [7] *Chung J.K., Ko R.K., Shi D.Q., Ha H.S., Kim H., Song K.J., Park C., Moon S.H., Yoo S.I.* // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2005. V. 15. N 2. P. 3020–3023.
- [8] *Черных И.А., Занавескин М.Л., Строев А.М., Клевалина Л.В., Крылова Т.С., Гараева М.Я., Тихомиров С.А., Платонов Г.Л., Никонов А.А., Шавкин С.В., Шиков А.К.* // *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность.* 2013. № 2. С. 7–11.
- [9] *Черных И.А., Строев А.М., Гараева М.Я., Крылова Т.С., Гурьев В.В., Шавкин С.В., Занавескин М.Л., Шиков А.К.* // *Письма в ЖТФ.* 2014. В. 1. С. 58–63.