

Формирование треков тяжелых ионов в композитных ВТСП: расчет и электронно-микроскопические исследования

Л. Х. Антонова¹⁾, Г. Н. Михайлова, А. В. Троицкий

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

А. Ю. Дидык, Д. З. Музафаров

Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, 141980 Московская обл. Дубна, Россия

Т. Е. Демихов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Е. И. Суворова

Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, 119333 Москва, Россия

Были проведены расчёты по модели термического пика временной зависимости температуры решетки слоя ВТСП и радиального профиля температуры слоя ВТСП при облучении ионами: Хе (167 МэВ), Кг (107 МэВ) и Аг (48 МэВ). С помощью электронной микроскопии было исследовано влияние облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{17+}$ с энергией 107 МэВ и флюенсами 10^{10} , 10^{11} ион/см² на ВТСП ленту SF 12100 на основе YBCO(123) производства SuperPower (США). Были обнаружены дефекты размерами 50–300 нм, которые наблюдаются как в облучённых, так и в исходном образце, а также дефекты размером 3–5 нм, которые могут являться центрами пиннинга для Абрикосовских вихрей.

Поскольку сверхпроводники традиционно используются в мощных установках ядерной физики, например, ускорителях, токамаках и др., представляется необходимым изучить поведение композитных ВТСП материалов под действием ионизирующих частиц. Изучение радиационных эффектов в сверхпроводящих материалах является принципиально важным с двух точек зрения: понимания природы сверхпроводимости и улучшения сверхпроводящих свойств для практических применений.

В последние годы нами были изучено влияние тяжелых ионов на критический ток в композитных сверхпроводниках 2 поколения на основе YBCO(123) [1–3]. Цель исследований – определить радиационную стойкость и диапазон флюенсов облучения, приводящего к повышению критического тока за счет генерации дополнительных дефектов, которые могут являться новыми центрами пиннинга Абрикосовских вихрей. Отличие композитных ВТСП от обычных лабораторных образцов заключается в наличии многослойной структуры, которая обеспечивает высокие механические, прочностные, токнесущие свойства и повышает химическую устойчивость сверхпроводника. Одновременно сложная архитектура композита изменяет эффективные термодинамические параметры, что должно отражаться на картине генерации радиационных дефектов.

¹⁾lpa@kapella.gpi.ru

В работе [3] для описания температурных процессов и физических явлений в многослойных структурах при облучении ионами высоких энергий была сформулирована модель термического пика (МТП) и проведен анализ устойчивости и сходимости развитой численной схемы. На основе данной модели проведены расчеты применительно к ВТСП лентам второго поколения – Ag/YBaCuO/MgO/хастеллой при облучении ионами $^{40}\text{Ar}^{8+}$, $^{84}\text{Kr}^{17+}$ и $^{132}\text{Xe}^{27+}$ с энергиями 1,2 МэВ/а.е.м. и проведено сравнение полученных расчетных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Результаты численных расчетов, полученных на основе МТП, представлены на рис. 1. В качестве объекта исследований использовалась нестабилизированная лента (без медного покрытия) YBCO(123) марки SF 12100 (SuperPower).

Электронная микроскопия.

Образцы YBCO (123) - необлученные и облученные ионами $^{84}\text{Kr}^{17+}$ с энергией 107 МэВ и флюенсами 10^{10} , 10^{11} ион/см² - исследовались методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

Исследование слоя YBCO методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа после удаления защитного покрытия серебра показало, что структура YBCO не является стехиометричной

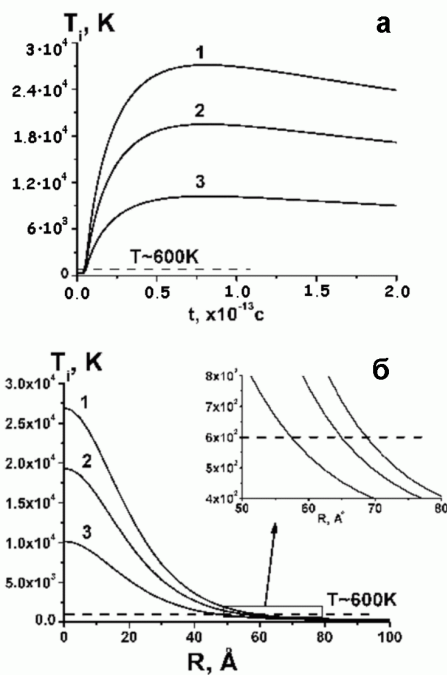


Рис. 1. (а) - временная зависимость температуры решетки слоя ВТСП (б) - радиальный профиль температуры слоя ВТСП при облучении ионами: 1 - Xe (167 МэВ), 2 - Kr (107 МэВ), 3 - Ag (48 МэВ) в момент времени $t = 10^{-13}$ с (штрихованной линией показано значение температуры, при котором начинается выделение кислорода и изменяются свойства ВТСП слоя), глубина $z = 2.5$ мкм.

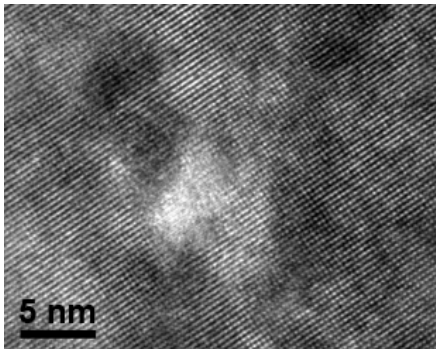


Рис. 2. ВРЭМ изображение дефекта с разупорядоченной структурой.

(Табл.1). Обращает на себя внимание значительный недостаток бария в решетке.

В облученных образцах были обнаружены дефекты, плотность которых достигала $2.2 - 2.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, независимо от дозы облучения. Размер дефектов находится в интервале 50 - 300 нм.

Химический микроанализ показал, что эти дефекты, как правило, обогащены иттрием и обед-

Таблица 1. Соотношение элементов в YBCO в ат %.

	Y	Ba	Cu
Без облучения	1.00	1.68	3.39
10^{11}	1.00	1.78	2.71
10^{10}	1.00	1.59	3.51

нены барием, часть дефектов скорее всего представляет собой выделения оксида меди. Структура данных образцов YBCO является неустойчивой, поскольку в необлученных образцах после удаления серебряного покрытия цвет слоя YBCO менялся со стального блестящего до золотистого в течение суток. Данное обстоятельство свидетельствует о спонтанном образовании дефектов. Действительно, дефекты, наблюдаемые в облученных образцах, примерно через несколько суток появились в необлученных образцах, и плотность их была меньшей, порядка $0.6 - 0.8 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, причем распределение их было крайне неравномерное по поверхности образца. Наблюдались значительные по размеру области, в которых таких дефектов не обнаружено и, как правило, это были свежие полированные области. Кроме того, слой YBCO характеризуется наличием напряжений, что проявляется в растрескивании образцов при их механической полировке. Поскольку растрескивание происходит значительно сильнее в необлученных образцах, то можно сделать вывод, что релаксация напряжения инициируется облучением с образованием дефектов.

Выводы

Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (ВРЭМ) показала в облученных образцах присутствие дефектов (центров пиннинга) диаметром 3 - 5 нм (Рис. 2). Часть таких дефектов имеет кристаллическую структуру, но контраст в области дефекта значительно отличается от контраста недефектной области YBCO, что говорит о начале структурных изменений. Для другой части этих дефектов характерно сильное разупорядочение вплоть до появления аморфного ядра. Подобные дефекты в необлученных образцах не наблюдались.

Список литературы

1. В. П. Аксенов, Л. Х. Антонова, А. Г. Белов и др., ДАН, **428**, №5, 608. (2009).
2. Л. Х. Антонова, А. Г. Белов, В. В. Воронов, А. Ю. Дидык и др., Поверхность, № 5, 92. (2011).
3. И. В. Амирханов, А. Ю. Дидык, Г. Н. Михайлова и др., Письма в ЭЧАЯ, (принято в печать) (2011).