

Влияние протонного облучения на критические параметры композитных высокотемпературных сверхпроводящих лент

Л. Х. Антонова, Т. Е. Демихов, А. В. Троицкий, А. Д. Юрасов,
С. В. Самойленков, А. Ю. Дидык, А. П. Кобзев, М. Кулик,
В. С. Куликаускас, Г. Н. Михайлова

Исследовано влияние облучения протонами с энергией 2,5 МэВ на композитные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) второго поколения на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) и $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO). ВТСП-ленты имеют сложную многослойную архитектуру, в которой сверхпроводящий слой занимает всего 1 % толщины. Температура образцов во время облучения не превышала 100°C. Флюенсы протонов варьировали в интервале от $6,1 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Измерения критического тока ВТСП-лент I_c проводили резистивным методом. Определен порог радиационной стойкости для ВТСП-лент на основе GdBCO и для лент на основе YBCO. Эксперименты показали, что устойчивость сверхпроводника GdBCO к протонному излучению выше, чем у YBCO.

Ключевые слова: композитные ВТСП 2-G, радиационные дефекты, протоны.

Proton irradiation with energy of 2.5 MeV was carried out on the 2G composite high temperature superconductors (HTSC) based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) and $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO) compounds. The HTSC tapes have complex multilayer architecture, wherein the superconducting layer takes only 1% of the cross-section. The sample temperature did not exceed 100°C during the experiments. The fluence range was from $6.1 \cdot 10^{14}$ to $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Measurements of T_c and I_c of the samples were carried out by the four-probe resistive method. A radiation resistance threshold was defined for the HTSC tape based on GdBCO and was compared with HTSC tapes based on YBCO. Experiments have shown that the stability of the GdBCO tapes to the proton irradiation was significantly higher than that of YBCO.

Keywords: composite 2G HTS tapes, radiation defects, protons.

Введение

В настоящее время производство проводов 2-го поколения (2G) на основе сверхпроводников $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (REBCO, RE — редкоземельный элемент) для использования в электроэнергетических и магнитных технологиях налажено в опытно-промышленных масштабах. Эти провода выпускают в виде лент длиной в сотни метров с плотностью тока J_c до 3–5 МА/см² при $T = 77\text{K}$ в собственном поле. Их планируют применять в магнитных системах для физики высоких энергий (большом адронном коллайдере, проекте международного экспериментального термоядерного реактора и др.), в кабелях,

ограничителях тока, моторах, трансформаторах, генераторах, соленоидах, системах магнитно-резонансной томографии и других различных проектах. Тем не менее, область применения ВТСП проводов ограничена быстрым уменьшением плотности критического тока в магнитных полях. В связи с этим, улучшение свойств уже сформированных ВТСП проводов — приоритетное направление в развитии технологий таких проводов. В работе [1] показано, что протонное облучение ВТСП лент на основе YBCO, легированных оксидами металлов в процессе синтеза, приводит к сильному повышению критического тока при температурах ниже 30 К и в полях порядка 6 Тл. При этом стоит подчеркнуть, что и ранее протонное

облучение применяли для улучшения пиннинга в лабораторных ВТСП образцах [2, 3].

В 2013 г. в России разработаны первые длинномерные ленты-провода на основе сложных оксидов меди производства отечественной компании СуперОкс [4].

Цель настоящей работы — исследование радиационной стойкости ВТСП лент на основе YBCO производства компании SuperPower и GdBCO производства компании СуперОкс-Япония при облучении протонами с энергией 2,5 МэВ в диапазоне флюенсов от $6,1 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{17}$ см⁻², определение зависимости критических параметров от флюенсов излучения.

Образцы

Образцы на основе GdBCO представляли собой отрезки композитной ВТСП ленты 2-го поколения размером $\sim 0,1 \times 4 \times 30$ мм³. Структура такой ленты представлена на рис. 1. ВТСП ленты изготовлены по технологии IBAD/PLD (Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)/Pulsed Laser Deposition (PLD)), то есть в качестве металлической основы были выбраны ленты из сплава хастеллой, а в качестве способа нанесения слоя ВТСП был выбран метод импульсного лазерного осаждения [5]. Критический ток ленты составил $I_c \geq 75$ А (77 К), а критическая температура — 93 К.

Исследованы также образцы 4-мм ленты на основе YBCO компании SuperPower марки SCS 4050, которые имели следующие критические параметры: $I_c \geq 100$ А, $T_c = 92$ К.

Эксперимент

Измерения величины критического тока проводили на постоянном токе четырехзондовым методом по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) сверхпроводника при температуре жидкого азота. Использованы прижимные токовые контакты с индиевой

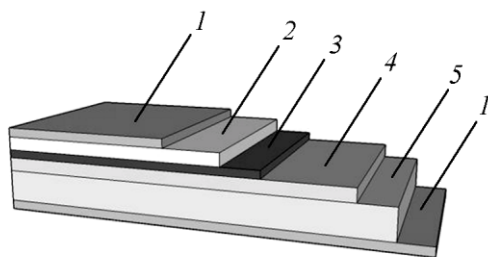


Рис. 1. Структура ВТСП-ленты производства компании СуперОкс-Япония, ширина 4 мм, $I_c = 75$ А при 77 К. 1 — слой меди 20 мкм, 2 — слой серебра 1 мкм, 3 — ВТСП — $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 1 мкм, 4 — буферные оксидные слои, 5 — хастеллой 60 мкм.

прослойкой. Измерения критической температуры на образцах было также проведено четырехзондовым методом на постоянном токе по зависимости $R(T)$ в диапазоне температур 77 – 300 К.

Облучение

Энергия протонов была выбрана такой, чтобы частицы достигали ВТСП слоя в многослойной ленте. С этой целью был проведен расчет с помощью программы SRIM (The Stopping Range of Ions in Matter) [7]. На рис. 2а, б представлены значения удельных ионизационных потерь энергии как функции глубины z в слоях Cu – Ag – ВТСП-хастеллой для протонов с энергией 2,5 МэВ. Пороговые значения энергии смещения E_d^j взяты равными 30 эВ. Плотность сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ считалась равной 5,51 г/см³, $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ — 6,00 г/см³. Пробег протонов при данной энергии превышает глубину

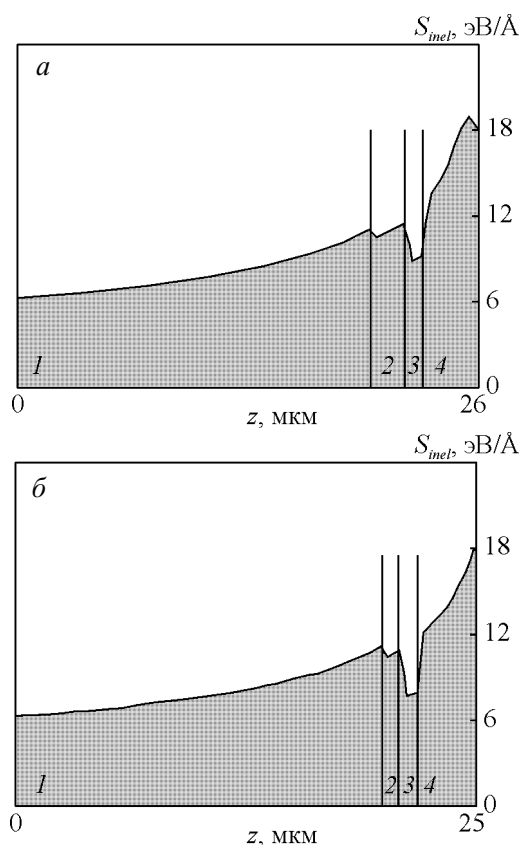


Рис. 2. Ионизационные потери энергии по глубине Z ленты: а — YBCO – SuperPower для протонов p с энергией 2,5 МэВ (1 — слой меди 20 мкм, 2 — слой серебра 2 мкм, 3 — ВТСП 1 мкм, 4 — хастеллой 3 мкм); б — GdBCO – СуперОкс-Япония для протонов p с энергией 2,5 МэВ (1 — слой меди 20 мкм, 2 — слой серебра 1 мкм, 3 — ВТСП 1 мкм, 4 — хастеллой 3 мкм).

залегания слоя ВТСП. Облучение образцов GdBCO протонами с энергией 2,5 МэВ проводили на ускорителе Ван-де-Граафа в ОИЯИ в диапазоне флюенсов $6,1 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Температура образцов во время облучения не превышала 100°C . Образцы YBCO облучали в НИИЯФ МГУ в диапазоне флюенсов $2 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Результаты

После облучения протонами до различных флюенсов для каждого образца снимали кривую перехода в сверхпроводящее состояние $R(T)$, по которой определяли критическую температуру T_c и ВАХ, дающая значение критического тока при 77 К. На рис. 3 представлены $R(T)$ -кривые сверхпроводящего перехода образцов ВТСП ленты GdBCO после облучения до различных флюенсов. Известно, что форма этой кривой и ширина перехода чувствительна к дефектообразованию и к количеству кислорода в кристаллической решетке сверхпроводника. Обращает на себя внимание кривая со “ступенькой” для флюенса $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, которая свидетельствует о появлении второй сверхпроводящей фазы с более низкой критической температурой, образованной под действием протонного облучения. Вплоть до флюенса $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, критическая температура образцов снизилась не более, чем на 10 К.

Зависимость критического тока от флюенсов кардинально отличается от зависимости критической температуры от флюенсов. Начиная с флюенса $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдается резкое падение критического тока. На рис. 4а представлены зависимости $I_c/I_{c0}(\Phi)$ и $T_c(\Phi)$ для ВТСП-ленты СуперОкс после облучения протонами. Заметим, что такое же резкое

падение критического тока при практически неизменной критической температуре в определенном диапазоне флюенсов ранее было замечено и при

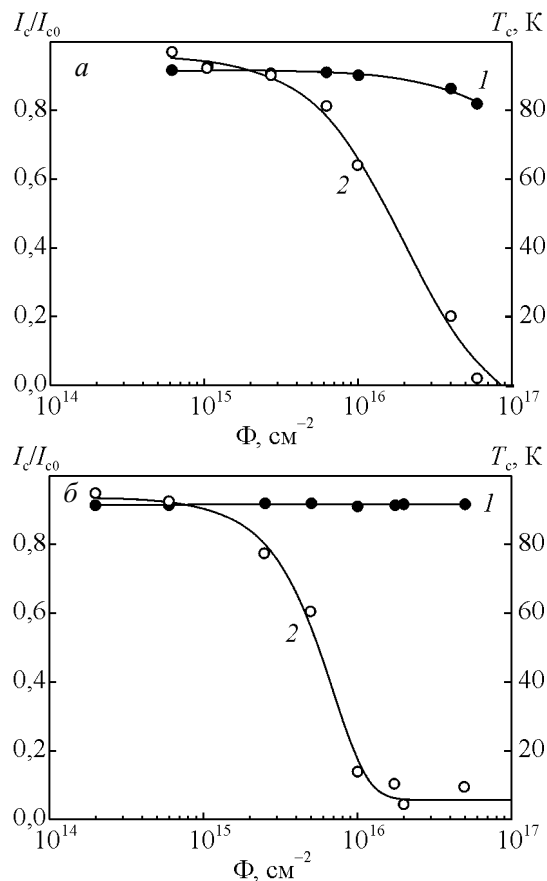


Рис. 4. Зависимости $I_c/I_{c0}(\Phi)$ и $T_c(\Phi)$ для ВТСП-ленты: а — GdBCO, б — YBCO, после облучения протонами: 1 — T_c ; 2 — I_c/I_{c0} .

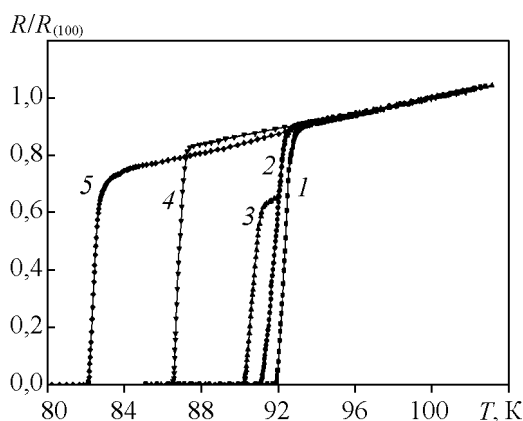


Рис. 3. $R(T)$ -кривые перехода в сверхпроводящее состояние для образцов GdBCO после облучения протонами до различных флюенсов, см^{-2} : 1 — $6,1 \cdot 10^{14}$; 2 — $6,2 \cdot 10^{15}$; 3 — $1 \cdot 10^{16}$; 4 — $4 \cdot 10^{16}$; 5 — $6 \cdot 10^{16}$.

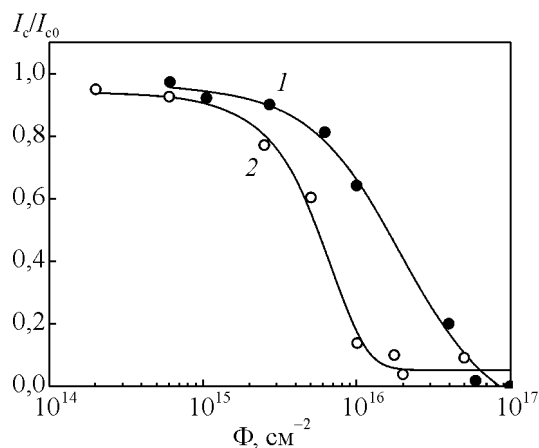


Рис. 5. Зависимости $I_c/I_{c0}(\Phi)$ для ВТСП-лент: 1 — GdBCO — СуперОкс-Япония, 2 — YBCO — SuperPower, после облучения протонами при $T = 77 \text{ K}$ в собственном поле.

облучении быстрыми тяжелыми ионами [6]. Отсюда следует, что радиационную стойкость необходимо определять по падению критического тока.

Аналогичные зависимости для ВТСП-ленты на основе YBCO производства компании SuperPower приведены на рис. 4б.

Сравнение характеристик 4-мм образцов ВТСП-лент 2-го поколения производства компаний СуперОкс-Япония и SuperPower показали, что образцы компании СуперОкс более устойчивы к облучению, чем образцы производства SuperPower (рис. 5). Критический ток падает не более чем на 20% для лент СуперОкс при облучении протонами до $\Phi = 6,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, в то время как для образцов SuperPower такое же падение наблюдается при облучении до $\Phi = 2,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований влияния протонного облучения с энергией 2,5 МэВ на критический ток и критическую температуру композитных ВТСП лент 2-го поколения получены следующие данные по радиационной стойкости: критический ток падает больше, чем на порядок при $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для лент на основе YBCO и $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для лент на основе GdBCO. Эти значения получены при исследовании деградации критического тока, в то время как критическая температура падает незначительно. Увеличения критического тока при $T = 77 \text{ К}$ в собственном магнитном поле не обнаружено ни в одной, ни в другой ВТСП ленте после облучения протонами с энергией 2,5 МэВ в диапазоне флюенсов от $6,1 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. В то же время, в [1] сообщалось, что протонное облучение ВТСП лент на основе YBCO приводит к повышению критического тока при температурах ниже 30 К и в полях порядка 6 Тл.

Известно, что тяжелые ионы высоких энергий создают в сверхпроводниках так называемые дефекты колончатой формы, которые по существу являются треками ионов. Детальные расчеты тепловых процессов при облучении высокоэнергетичными ионами в композитных сверхпроводящих лентах 2-го поколения проведены в [7]. Такие дефекты имеют размеры порядка 5 нм и были обнаружены с помощью просвечивающей электронной микроскопии [8]. Протоны же не образуют треков в твердом теле, поэтому процессы дефектообразования здесь идут по другому механизму. Вероятно, этим обусловлено отличие обнаруженных результатов от данных, опубликованных другими исследователями. Второй возможной причиной является то, что измерения в

настоящей работе проводили в собственном магнитном поле при температуре 77 К. Хорошо известно, что зависимость критического тока от магнитного поля и температуры является нелинейной величиной и может значительно изменяться в зависимости от количества и типа дефектов в ВТСП материале.

Выводы

Обнаружено сильное влияние излучения на критический ток при $T = 77 \text{ К}$ в собственном поле для проводов-лент обоих составов. Изменение критической температуры от флюенсов протонного излучения происходит гораздо слабее.

Показано, что радиационная стойкость лент GdBCO компании СуперОкс-Япония превосходит стойкость лент YBCO компании SuperPower более чем в два раза. В условиях данного эксперимента (при $T = 77 \text{ К}$) повышение критического тока под действием протонного облучения не обнаружено.

Авторы выражают благодарность сотрудникам компании СуперОкс-Япония С.Р.Ли, В.В.Петрыкину и А.А.Молодыку (СуперОкс) за предоставленные образцы ВТСП ленты GdBCO.

Литература

1. Jia Y., LeRoux M., Miller D.J., Wen J.G., Kwok W.K., Welp U., Rupich M.W., Li X., Sathyamurthy S., Fleshler S., Malozemoff A.P., Kayani A., Ayala-Valenzuela O. Doubling the critical current density of high temperature superconducting coated conductors through proton irradiation. Appl. Phys. Lett., 2013, v. 103, p. 122601-1 – 122601-5.
2. Paulius L.M., Shamu R.E., Ferguson S., de Andrade M.S., Maple M.B. Effects of proton irradiation on the high-temperature superconducting system $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Appl. Phys. Lett. 1997, v. 71, no. 23, p. 3415 – 3417.
3. Civalle L., Marwick A.D., McElfresh M.W., Worthington T.K., Malozemoff A.P., Holtzberg F.H., Thompson J.R., Kirk M.A. Defect Independence of the Irreversibility Line in Proton-Irradiated Y – Ba – Cu – O Crystals. Phys. Rev.Lett., 1990, v. 65, p. 1164 – 1167.
4. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilencov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. Supercond. Sci. Tech., 2014, v. 27, no. 044022.
5. Biersack J.P., Haggmark L.G. A monte carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets. Nucl. Instr. Meth. B, 1980, v. 74, p. 257 – 269; www.srim.org.
6. Антонова Л.Х., Белов А.Г., Воронов В.В., Дидык А.Ю., Демихов Е.И., Иванов Л.И., Мальгинов В.А., Михайлова Г.Н., Троицкий А.В. Зависимость крити-

- ческих параметров ВТСП ленты от флуенсов при облучении тяжелыми ионами и электронами высоких энергий. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011, № 5, с. 84 – 91.
7. Дидык А.Ю., Сёмина В.К., Хофман А., Михайлова Г.Н., Троицкий А.В., Антонова Л.Х. Тепловые процессы в многослойных ВТСП 2-го поколения при облучении тяжелыми ионами высоких энергий. Письма в ЭЧАЯ, 2013, т. 10, № 5, (182) с. 739 – 744.
8. Mikhailova G., Antonova L., Troitskii A., Didyk A., Malginov V., Demikhov T., Suvorova E. Radiation resistance and generation of pinning centers in composite HTSC under heavy ion irradiation. Phys. Status Solidi C, 2013, v. 10, no. 4, p. 677 – 680.

Статья поступила в редакцию 18.02.2014 г.

Антонова Ландыш Халяфовна — Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, (г. Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики полупроводников, сверхпроводимости, радиационных дефектов. E-mail: lraa@kapella.gpi.ru.

Демихов Тимофей Евгеньевич — Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (г. Москва), научный сотрудник, специалист в области сверхпроводимости, физики и техники низких температур. E-mail: tdemikh@lebedev.ru.

Троицкий Алексей Владимирович — Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, (г. Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости, радиационных дефектов. E-mail: at@kapella.gpi.ru.

Юрасов Александр Дмитриевич — МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, студент 5 курса, специализируется в области физики низких температур. E-mail: yurasov.aleksandr@physics.msu.ru.

Самойленков Сергей Владимирович — Компания СуперОкс, кандидат химических наук, Генеральный директор, специалист в области синтеза сверхпроводников. E-mail: ssv@superox.ru.

Дидык Александр Юрьевич — Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: didyk@jinr.ru.

Кобзев Александр Павлович — Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка Объединённого Института Ядерных исследований (г. Дубна, Московской области), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики твёрдого тела. E-mail: kobzev@nf.jinr.ru.

Кулик Мирослав — Университет Марии Склодовской-Кюри, факультет математики, физики и информатики (г. Люблин, Польша), Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна), доктор, специалист в области спектроскопии. E-mail: tkulik@nf.jinr.ru.

Куликаускас Вацлав Станиславович — НИИЯФ МГУ им. Д.В.Скобельцына (г. Москва), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: vaclav@anna19.sinp.msu.ru.

Михайлова Галина Николаевна — Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (г. Москва), доктор физико-математических наук, профессор, заведующая лабораторией, специалист в области сверхпроводимости, физики низких температур, взаимодействия лазерного излучения с полупроводниками. E-mail: galina@kapella.gpi.ru.