УДК 538.945

Статья

Исследование электрофизических свойств и структуры, подвергнутых более чем 10-летней выдержке ВТСП лент на основе гадолиния

Н. Н. Балашов[1], Е. А. Головкова[1,*], П. Н. Дегтяренко[1,2]

1 Объединённый институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13 стр. 2, 125412, Москва, Россия
2 ООО «С-Инновации», научный проезд, д. 20, стр. 2, 117246, Москва, Россия
* e-mail: eagolovkova@gmail.com

Поступила в редакцию 30.05.25, после переработки 04.06.25, принята к публикации 04.07.25.

Для проверки пригодности ВТСП ленты второго поколения к применению охлаждаемого жидким азотом магнита постоянного тока для исследования свойств ВТСП материалов в полях 1–2 Тл, были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) на постоянном токе ВТСП лент на основе гадолиния. Измерения показали отсутствие деградации критического тока образцов за 10 лет.

Ключевые слова: старение; критический ток; вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-7-2-30-39

1. Введение

Повышение параметров высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент 2-го поколения, как правило, осуществляется благодаря созданию в материале искусственных центров пиннинга (ИЦП) [1, 2] путем облучения ионами [3–5] или изменения состава по редкоземельному элементу или его замене [6, 7]. Все методы получения ИЦП направлены на создание однородного распределения дефектов, которые являются центрами закрепления вихрей Абрикосова [4, 8]. Оптимальная концентрация дефектов позволяет распределяться вихрям таким образом, чтобы в сверхпроводнике образовывалась вихревая решетка, способствующая повышению плотности критического тока I_c.

Метод облучения ВТСП лент тяжёлыми ионами различных элементов с образованием искусственных центров пиннинга оказался весьма эффективным, но трудоемким и требующим специального научно-исследовательского оборудования [9]. Однако, как показано в настоящей работе, существуют и намного более простые и совершенно не затратные методы обработки ВТСП материалов 2-го поколения, вообще не требующие никакого специального технологического оборудования, кроме, разумеется, уже имеющихся электрофизических установок для измерения I_c и аппаратуры для структурно-физических исследований.

На рис. 1 представлена диаграмма равновесия для тонких плёнок [10] для температур 850–920 °C температурного интервала, в котором обычно проводят осаждение пленок REBCO [11]. Из диаграммы равновесия видно, что стехиометричная область образования сверхпроводящей фазы $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (заштрихованная область) достаточно узкая и любое небольшое отклонение от стехиометричности (голубая область) будет приводить к образованию вторичных фаз. Область 1 — $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ + CuO + Gd_2CuO_4, область 2 — $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ + + Gd_2CuO_4 + Gd_2O_3 + BaO, область 3 — $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ + $BaCu_3O_4$ + Ba_2CuO_3 и область 4 — $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ + Ba_2CuO_3 + CuO.

Вторичные фазы по-разному влияют на I_c ВТСП лент. Из литературы известно [10], что присутствие купратов бария при избытке BaO в пленке характеризуется ухудшением свойств ВТСП плёнок, так как эти фазы являются несверхпроводящими и легко деградируют под дей-

ствием CO_2 и влаги воздуха.

Избыток меди в свою очередь приводит к образованию частиц CuO, которые сегрегируют на поверхность пленки и растут до размеров в несколько микрон, однако их почти нет в толще плёнки REBCO [12]. В то же время их присутствие благоприятно сказывается на I_c плёнок [13].

При избытке гадолиния в пленке образуются частицы Gd_2O_3, а при избытке гадолиния и меди Gd_2CuO_4, которые равномерно распределяются в матрице сверхпроводника в виде ориентированных частиц [14, 15]. Образование когерентных границ Gd_2O_3–Gd_2CuO_4–GdBCO, и размер частиц порядка нескольких длин когерентности делает эти наночастицы эффективными центрами пиннинга, их присутствие в ограниченном количестве может способствовать увеличению I_c.

Таким образом, регулирую стехиометрию, можно получать ленты с различными вторичными фазами в оптимальном количестве, которые могут быть ИЦП, повышая характеристики лент.

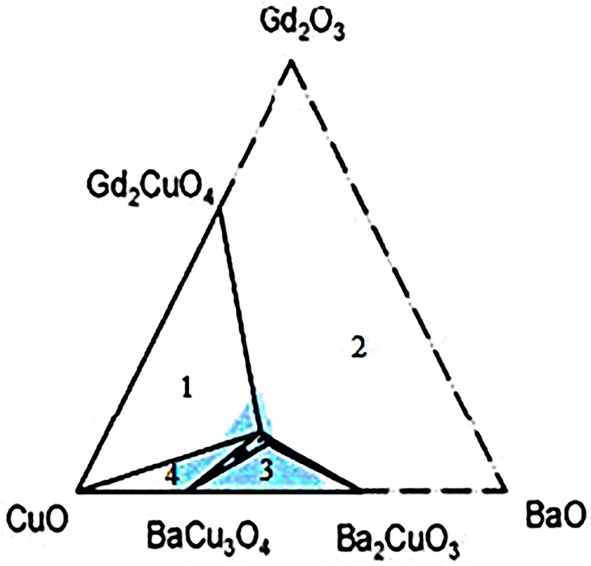


Рис. 1. Диаграмма равновесия в тонкоплёночных образцах GdBCO [10].

2. Использованные материалы и методы

Для исследований использовалась стабилизированные медью 4 мм ВТСП ленты 2-го поколения ЗАО «СуперОкс» на основе $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (GdBCO) с номинальным критическим током $I_c \sim 90$ А. Сверхпроводящая пленка напылялась на подложку из сплава хастеллой С-276 с буферными подслоями $LaMnO_3$, IBAD-MgO, *a*-$Y2O_3$ и *a*-Al_2O_3. Для нанесения плёнки использовался метод импульсного лазерного осаждения с применением Xe-Cl эксимерного лазера с длиной волны 308 нм и энергией импульса около 700 мДж и температурой подложки порядка 800 °C.

Все измерения критического тока ВТСП лент до и после старения проведены 4-х контактным методом путем регистрации соответствующих ВАХ. Кроме того, бесконтактным методом на лентопротяжной установке тестировалась вся лента, от которой были отрезаны образцы. Полученная бесконтактным методом величина критического тока калибруется при помощи 4-х контактных измерений.

Ленты (Gd^{3+} = 0.105 нм) в сравнении с лентой YBCO (Y^{3+} = 0.102 нм) имеют более высокую температуру сверхпроводящего перехода $T_c \sim 93$ K, для YBCO $T_c \sim 88{-}89$ K, а также демонстрируют оптимальные характеристики при азотной температуре $T = 77.3$ K, $I_c \sim 90$ А в

нулевом внешнем поле [16].

2.1. Методика и схема измерений ВАХ ВТСП ленты

Измерение ВАХ 9 образцов ленты производилось 4-контакным методом. По критерию 1 мкВ/см на ВАХ при длине измерительного участка образца 100 мм проводилось определение I_c, то есть для гарантированного получения сигнала необходимо было снимать напряжение не ниже 10 мкВ. Заметим также, что в данном случае свойства ленты измерялись только на постоянном токе, так как задача состояла в проверке пригодности ленты именно для ВТСП магнита постоянного тока. Измерение свойств этой ленты и других проводников в новой, модернизированной схеме на переменном токе, возможно, будет описано в других наших статьях. Здесь же, так как разрабатываемый магнит будет предназначен в первую очередь для измерения свойств ленты на постоянном токе в магнитном поле, задача по исследованию воздействия на него поля образца ленты, питаемой переменным током (то есть, воспроизведение упрощенной модели реакции якоря электрической машины на систему её возбуждения) пока не ставится. Схема измерений приведена на рис. 2.

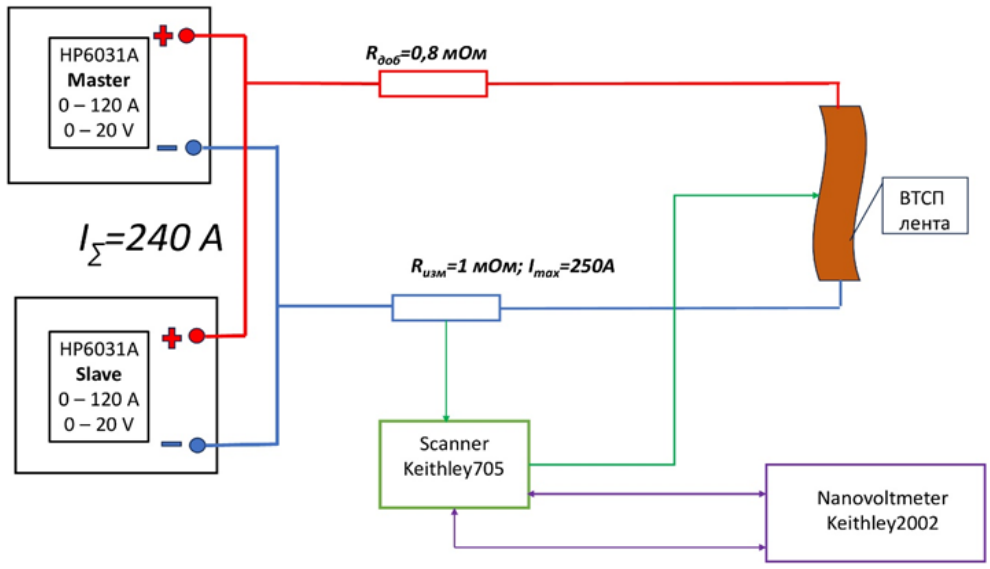


Рис. 2. Упрощенная схема измерения свойств ВТСП ленты на постоянном токе. Все измерительные линии и соединения вольтметра со сканером показаны однопроводными линиями. Криостат, в который помещается ВТСП лента, и интерфейсы к персональному компьютеру с программой LabView, которые есть у каждого прибора, опущены для простоты. Добавочное сопротивление – 100 мм шпилька из нержавеющей стали диаметром 10 мм создает нагрузку на источники и обеспечивает надежную регулировку тока.

Представленная на рисунке схема измерений полностью автоматизирована, и все основные приборы управляются программой LabView [17].

Пайка концов измерительных линий к ВТСП ленте осуществлялась оловянно-свинцово-кадмиевым припоем ПОСК с температурой плавления 145 °С, что, как показано в многочисленных работах, например, [18], и многократно проверено в наших экспериментах, исключает какое-либо негативное термическое воздействие на ВТСП материал. Дополнительно отметим, что использование при пайке ВТСП лент кислотных флюсов недопустимо, и тем более оно должно быть исключено при пайке токовводов ВТСП обмоток, как, впрочем, и прежних НТСП [19].

2.2 Новый непроводящий криостат для экспериментов

Измерения проводились в новом цилиндрическом непроводящем криостате (рис. 3) из пенопласта ПС1-150 с внутренним диаметром 265 мм, глубиной 205 мм и наружным диаме-

тром 325 мм, то есть толщина стенок — 30 мм. Перед изготовлением описываемого криостата для продолжения работ по ВТСП предохранителю [20], был изготовлен прямоугольный двухкамерный криостат, в котором для противодействия ударной волне, образующейся при сгорании ВТСП ленты под действием напряжения 1 кВ, дно и стенки были усилены 10 мм текстолитом. За счёт этого механическая и электрическая прочность криостата возросли, но, одновременно, за счёт большой массы и наличия разнородных материалов с разным коэффициентом теплового расширения, расход жидкого азота также вырос, и, несмотря на наличие крышки с вытеснителем, происходило кипение азота по всему объёму с тепловыми помехами. В новом же цилиндрическом криостате такие помехи почти полностью устранены, за счет использования одних и тех же материалов с высокими теплоизолирующими свойствами.

Уровень жидкого азота в криостате измерялся уровнемером компании L'Air Liquide с угольными резисторами Allen-Bradley в качестве датчиков и светодиодной индикацией, которой мы заменили устаревшие 24 В индикаторные лампы этой компании.

Рис. 3. Новый криостат в процессе подготовки к экспериментам. Видны штуцеры токовводов, выведены провода датчиков для подключения к уровнемеру L'Air Liquide, через центральное отверстие производится заливка жидким азотом, а через ближайшее к читателю — измерительные провода. Во время работы эти отверстия закрываются резиновыми коническими химическими пробками. Время работы на одной заливке жидкого азота составляет ~ 3 часа, что более чем достаточно для измерения ВАХ со сколь угодно низкой скоростью ввода тока, а, значит, с и низким уровнем электромагнитных помех.

Для оценки структурных изменений, которые могли бы произойти в течение 10-летней выдержки с лентой ВТСП и привести к более высоким значениям критического тока, был проведен рентгеноструктурный анализ. Результаты исследований сравнивались с аналогичными исследованиями для этой же ленты, проведенные непосредственно после её напыления. Измерения проводились на дифрактометре Rigaku Smartlab с вращающимся медным анодом, с излучением CuK_{α} = 1.54178 Å в ООО «С-Инновации».

Полнопрофильный анализ для уточнения структуры и расчёта характеристик проводились с помощью программы FullProf Suite. Для описания текстуры использовалась модель

Марша-Доллеа в методе Ритвельда. Данные по структурам с их табличными параметрами решётки были взяты из базы данных фаз программы SPECTRUM кафедры физического материаловедения НИТУ МИСиС [21].

3. Результаты экспериментов

В Таблице 1 приведены результаты всех девяти экспериментов. Как видно из Таблицы 1, критический ток I_c всех 9 образцов выше номинала — у 3-х образцов с прижимным присоединением к токовводам I_c лежит в пределах 93–96 А, а ещё у одного из этих образцов даже 111 А. У всех остальных 5 образцов, присоединение было паяным, а I_c ~ 101–113 А, за счет лучших условий охлаждения паяного контакта с уменьшением теплопритока от токовводов. То есть, даже после 10 лет хранения, отсутствует ухудшение свойств ленты, что указывает на их исключительно высокую стабильность. При проведении экспериментов с проводниками на основе иттрия для ВТСП предохранителя мы также подвергали их выдержке до 2 месяцев, и у большинства из них, всё же имело место некоторое снижение I_c – в пределах 0.1–0.5%, пусть это и очень немного, но снижение есть. Совсем недавно потеря свойств со временем была серьёзнейшей проблемой создания ВТСП материалов, и очень многим специалистам в области технической сверхпроводимости приходилось постоянно с ней сталкиваться [22], при самом тщательном соблюдении технологических режимов. Компании же «СуперОкс» удалось создать ВТСП материал очень высокого качества, который в самом прямом и буквальном смысле слова выдержал проверку временем, причем 10-летний срок выдержки, скорее всего максимальный. Если у иных ВТСП лент из той же партии и других, сделанных в то же время и предоставленных ЗАО «Суперокс» кафедре ЭМЭЭА НИУ МЭИ, будет наблюдаться тот же самый эффект сохранения и даже улучшения свойств ВТСП ленты со временем, то шансы на успешное создание ВТСП магнита могут существенно возрасти. Разумеется, и другие ленты также будут испытаны, а результаты представлены в наших последующих статьях.

Таблица 1 — Условия эксперимента по измерению ВАХ критический ток образцов.

Номер образца	**Присоединение к токовводам вставки**	**Критический ток, I_c, А**	**В каком криостате испытывался**
1	прижимное	111.7	Прямоугольный
2	прижимное	93.6	Цилиндрический
3	прижимное	96.8	Цилиндрический
4	прижимное	94.8	Цилиндрический
5	паяное	113.05	Цилиндрический
6	паяное	113.06	Цилиндрический
7	паяное	111.7	Цилиндрический
8	паяное	101.55	Цилиндрический
9	паяное	104.18	Цилиндрический

На рис. 4 ВАХ одного из образцов ленты №6 с паяным контактом I_c=113.05 А, измерен в новом цилиндрическом криостате по критерию 1 мкВ на 1 см (то есть, длина измерительного участка 100 мм, а напряжение, соответствующее I_c — 10 мкВ) длины ленты при подъеме и снижении тока. Совпадение полученных в обоих этих режимах значений I_c указывает на высокое качество ленты даже после столь длительного 10-летнего хранения. Низкие значения напряжения на горизонтальном участке кривой указывают на малую величину тепловых и электромагнитных помех.

На рис. 5 ВАХ образца № 1, испытанного в прямоугольном криостате для высоковольтных экспериментов. Высокие значения напряжения на горизонтальном участке кривой указывают на значительную величину тепловых помех. При повторных испытаниях в цилин-

дрическом криостате эти напряжения стали примерно такими же, как и у образца № 6 на предыдущем рисунке, то есть, тепловые помехи были в существенной мере устранены. I_c при подъеме и снижении тока также совпадает.

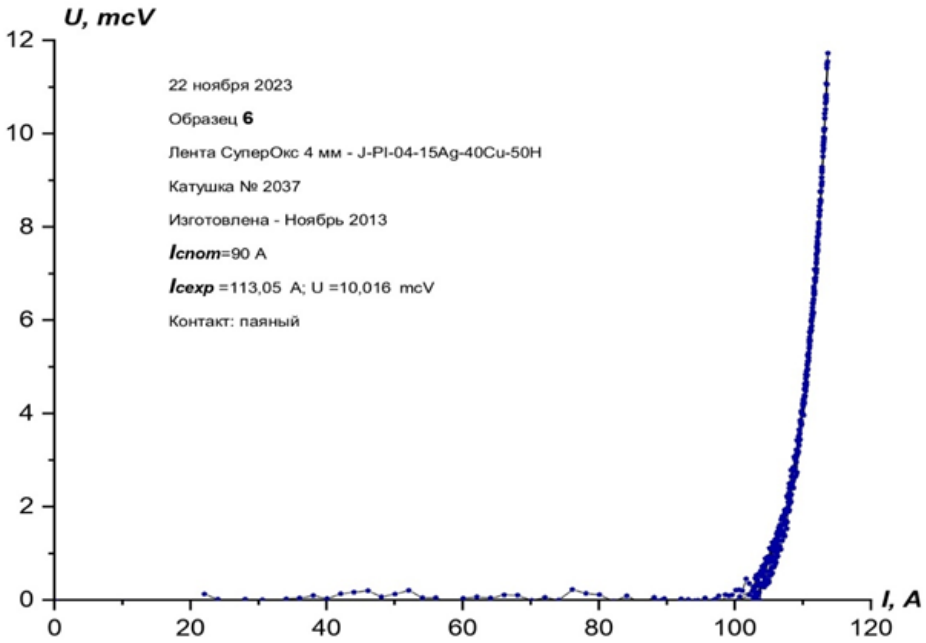


Рис. 4. ВАХ одного из образцов ленты №6 с паяным контактом. I_c = 113.05А, измерен в новом цилиндрическом криостате по критерию 1 мкВ на 1 см (то есть, длина измерительного участка 100 мм, а напряжение, соответствующее I_c — 10 мкВ) длины ленты при подъеме и снижении тока.

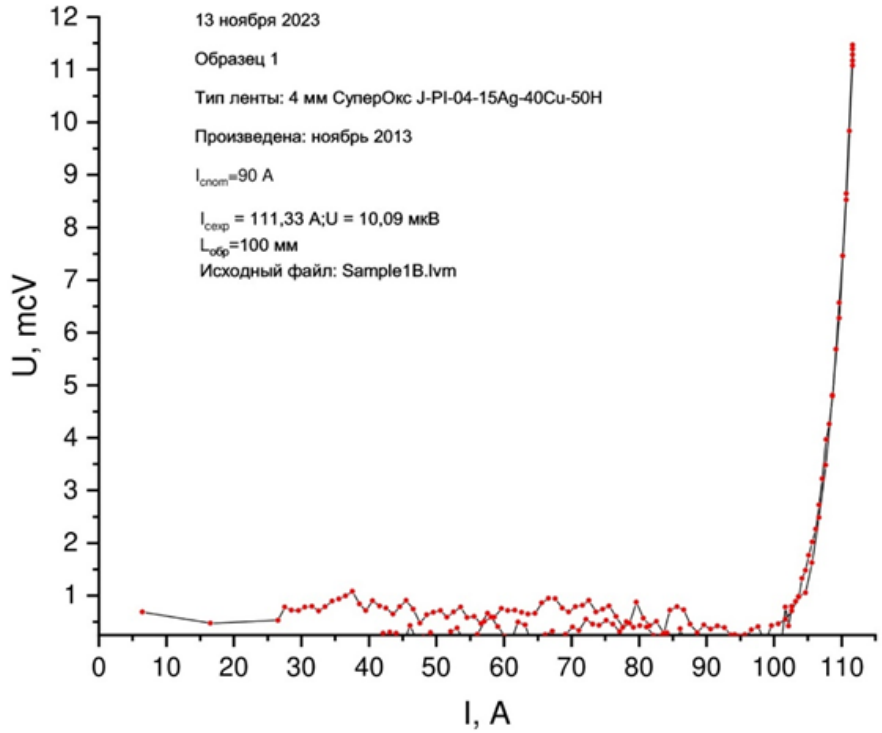
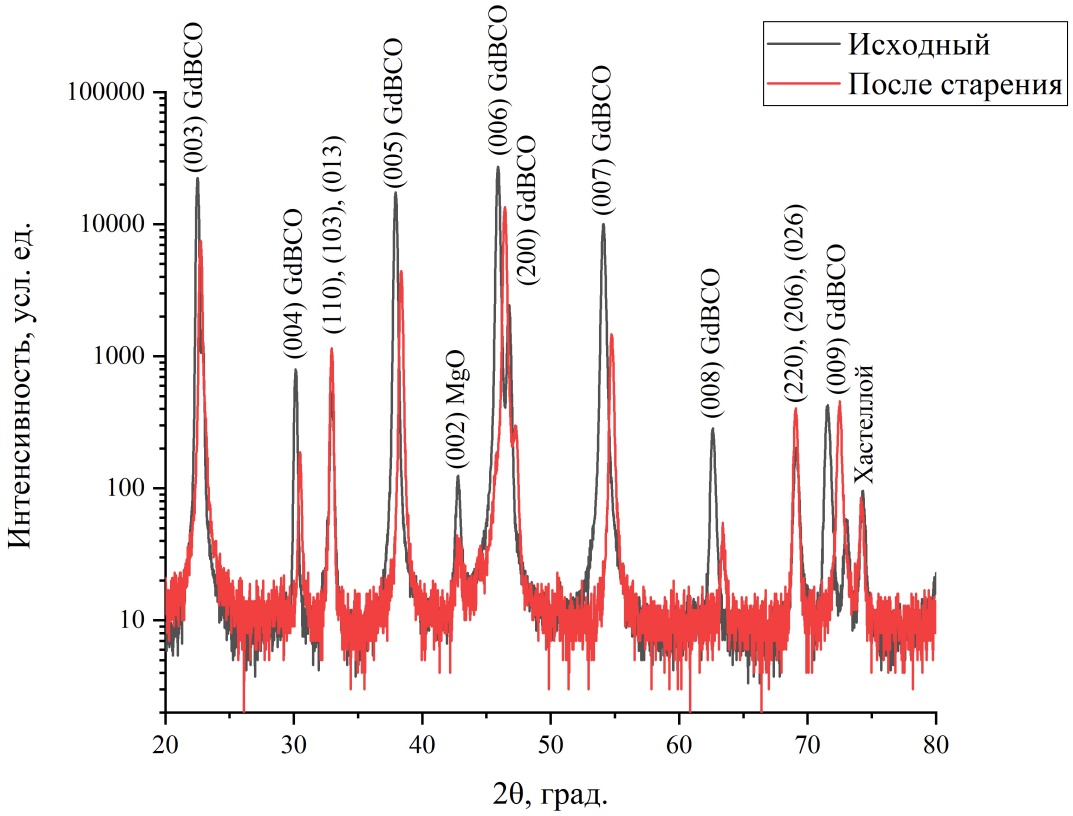


Рис. 5. ВАХ образца № 1, испытанного в прямоугольном криостате для высоковольтных экспериментов. Видно, что уровень тепловых помех существенно выше, чем в цилиндрическом криостате.

Для оценки структурных изменений, которые могли бы произойти при старении ВТСП лент, был проведен рентгеноструктурный анализ.

Положение каждого образца настраивалось таким образом, что плоскость (00*l*) находилось в отражающем положении: проводился φ-скан (поворот в плоскости образца), затем — ω-скан (кривая качания, шаг 0.02) для пика (005) основной фазы. После этого проводилась симметричная съёмка $2\theta/\omega$ (режим дифрактометра при котором съёмка симметрична относительно кристаллографических плоскостей (00*l*) и асимметрична относительно горизонтальной плоскости поверхности образца, данный режим аналогичен симметричной съёмке при наклоне образца на угол ω, ($\omega \sim 0.15$).

На рис. 6 приведены дифрактограмма одного из образцов после старения, у которого стравливались медное и серебряное покрытия, и исходного образца до оксигенационного отжига и нанесения серебряного покрытия, снятого в 2013 году. Дифрактограммы образцов, вырезанных из разных частей ленты не приводятся, так как они совпадают, что свидетельствует об однородности структуры ленты по длине после старения. Дифрактограмма исходного образца была отнормирована на пик подложки (хастеллой) образца после старения для наглядности. Помимо линий, характерных для сверхпроводящего слоя, видна линия подложки — хастеллоя, буферного слоя MgO.



Рентгеновские линии (00*l*) и (*h*00) от исходного образца сдвинуты влево, что говорит о том, что параметры решётки *a* и *c* исходного образца больше, чем в образцах после старения. Соотношение интенсивностей линий исходного образца отличается от образца после старения. Основная текстура (00*l*), присутствуют отдельные зёрна других ориентаций.

В статьях [14, 15] проводили ПРЭМ-исследование структуры исходного образца, где были обнаружены наночастицы смешанного оксида Gd_2CuO_4, который образуется при избытке гадолиния и меди, и служат эффективными центрами пиннинга.

На дифрактограммах образцов его не видно, так как его линии имеют малую интенсивность и перекрываются с пиками от ориентаций (013), (103), (110).

Был проведен полнопрофильный анализ дифрактограмм образцов. Расчёт проводился с учётом структурных линий (00*l*) и (*h*oo) основной фазы, интервалы углов с линией хастеллоя, буферного слоя и линией, на которой перекрываются отражения (103), (013) и (110), исключались из расчёта.

Оба образца являются фазой $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, у исходного образца до отжига $\delta = 0.36 \pm \pm 0.07$, у образца после отжига и старения $\delta = 0.132 \pm 0.002$.

В таблице 2 представлены рассчитанные параметры решётки и табличные значения для фазы при $\delta = 0$.

Видно, что параметры решётки в состаренном образце приближаются к табличным значениям. Соотношения линий и изменение параметров решётки хорошо описывается изменением стехиометрии кислорода в основной фазе. Следовательно, основные изменения структуры произошли во время отжига, и видимых изменений структуры после старения нет.

Таблица 2. Параметры фаз ВТСП ленты.

Табличные параметры решётки для $GdBa_2Cu_3O_7$	**Экспериментальные параметры решётки**
$a = 3.84$ Å $b = 3.914$ Å $c = 11.743$ Å	**Исходный образец:** $a = 3.8859 \pm 0.0002$ Å $c = 11.8605 \pm 0.0001$ Å
	После старения: $a = 3.8445 \pm 0.0005$ Å $c = 11.7328 \pm 0.0002$ Å

4. Выводы

Показана предпочтительность паяного, а не прижимного контакта ленты с токовводами измерительной вставки и, как и прежде, предпочтительность использования припоя ПОСК с температурой плавления 145 °С.

Результаты экспериментов показали исключительно высокое качество ВТСП ленты ЗАО «СуперОкс» на основе гадолиния, свойства которой не деградировали после столь длительного 10-летнего хранения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В. Д. Жеркину за усовершенствование модификации программы LabView, что позволяет полностью автоматизировать эксперимент по измерению ВАХ, Е.П. Курбатовой (ЭМЭЭА МЭИ) за непосредственное участие в экспериментах, а также В. Н. Захарову за выполнение работ по изготовлению криостатов и измерительной вставки.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

Литература

[1] V. Chepikov, N. Mineev, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, A. Ovcharov, A. Vasiliev, A. Kaul, V. Amelichev, A. Kamenev, A. Molodyk, S. Samoilenkov, Supercond. Sci. Technol. **30**, 124001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6668/aa9412

[2] S.-M. Choi, G.M. Shin, S.I. Yoo, Phys. C. Supercond. **485**, 154 (2013). DOI: 10.1016/j.physc.2012.12.007
[3] K. Nakashima, N. Chikumoto, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, T. Kubo, A. Suzuki, and T. Terai, Phys. C. Supercond. **463**, 665 (2007). DOI: 10.1016/j.physc.2007.04.263
[4] E. Mezzetti, B. Minetti, D. Andreone, R. Cherubini, L. Gherardi, and P. Metra, J. Supercond. **5**, 185 (1992). DOI: 10.1557/PROC-209-753
[5] D. Huang, H. Gu, H. Shang, T. Li, B. Xie, Q. Zou, D. Chen, W. Chu, and F. Ding, Supercond. Sci. Technol. **34**, 045001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/abe35f
[6] T. Matsunami, Y. Ichino, Y. Yoshida, A. Ichinose, and K. Matsumoto. Phys. Proc. **27**, 236 (2012).
[7] M. Miura, M. Yoshizumi, Y. Sutoh, K. Nakaoka, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Goto, A. Yoshinaka, and A. Yajima, Phys. C: Supercond. **468**, 1643 (2008). DOI:m10.1016/j.physc.2008.05.160
[8] A. A. Abrikosov, Sov. Phys. JETP. **5**, 1174 (1957).
[9] П.Н. Дегтяренко, В.А. Скуратов, А.Л. Васильев, А.В. Овчаров, А.М. Петржик, В.К. Семина, С.Ю. Гаврилкин, М.С. Новиков, А.Ю. Малявина, В.А. Амеличев, ЖЭТФ **165**, 827 (2024). DOI: 10.31857/S0044451024060099
[10] А.Е. Щукин, Синтез, структура и сверхпроводящие свойства тонкопленочных слоистых композитов YBaCuO /Y_2O_3 как компонентов ВТСП-лент второго поколения: дис. канд. хим. наук: 02.00.21 / А. Е. Щукин. — М., 2022. — 144 стр.
[11] A.R. Kaul, O.Yu. Gorbenko, I.F. Graboy, S.V. Samoilenkov, Crystal Growth in Thin Solid Films: Control of Epitaxy // Epitaxial stabilization of oxide phases in thin film growth — Kerala, India: Research Signpost Trivandrum, 2002.
[12] I.M. Watson, M.P. Atwood, T.J. Cumberbatch, Thin Solid Films **251**, 51 (1994). DOI: https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)90840-0
[13] O.Yu. Gorbenko, V.N. Fuflyigin, Yu.Yu. Erokhin, I.E. Graboy, A.R. Kaul, Yu.D. Tretyakov, G. Wahl, L. Klippe, J. Mater. Chem. **4**, 1585 (1994). DOI: 10.1039/jm9940401585
[14] П. Н. Дегтяренко, А. В. Садаков, А. В. Овчаров, А. Ю. Дегтяренко, С. Ю. Гаврилкин, О. А. Соболевский, А. Ю. Цветков, Б. И. Массалимов, Письма в ЖЭТФ **118**, 590 (2023). DOI: 10.31857/S1234567823200077
[15] P.N. Degtyarenko, A.V. Ovcharov, A.Yu. Tsvetkov, I.A. Karateev, A.L. Vasiliev, V.A. Amelichev, B.I. Massalimov, E.A. Golovkova, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **35**, 6604208 (2025). DOI: 10.1109/TASC.2025.3564716
[16] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov et al. (Collaboration), Sci. Rep. **11**, 2084 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z
[17] Ю.С. Магда, LabVIEW. Практический курс для инженеров и разработчиков. М.: ДМК Пресс, 2014.
[18] N.N. Balashov, P.N. Degtyarenko, S.S. Ivanov, Progress in Superconductivity and Cryogenics **17**, 25, (2015). DOI: 10.9714/psac.2015.17.1.025
[19] Е.Ю. Клименко, А.С. Веселовский, В.Г. Данько, В.А. Круглин, С.И. Новиков, А.М. Рубинраут, А.А. Фридман, Электротехника **7**, 69 (1983).
[20] P.N. Degtyarenko, V.V. Zheltov, N.N. Balashov , A.Yu. Arkhangelsky, A.Yu. Degtyarenko, K.L. Kovalev, Materials **15**, 8754 (2022). DOI: 10.3390/ma15248754
[21] E. V. Shelekhov, T. A. Sviridova, Metal Science and Heal Trealmem **42**, 309 (2000). DOI: 10.1007/BF02471306
[22] О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский, М.А. Сысоев, Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение» **3**, 59 (2011).

Investigation of electrophysical properties and structure of gadolinium-based HTSP tapes subjected to more than 10 years of ageing

N. N. Balashov[1], E. A. Golovkova[1,*], P. N. Degtyarenko[1,2]

1 Joint Institute for High Temperature of the Russian Academy of Sciences, ul. Izhorska, 13-2, 125412, Moscow, Russia
2 S-Innovations LLC, Nauchny proezd, 20-2, 117246, Moscow, Russia
* e-mail: eagolovkova@gmail.com

To verify the suitability of gadolinium based 2G HTS tapes for future making a liquid nitrogen-cooled DC magnet designed for the investigation of the properties of HTS materials in fields of 1–2 T, the current-voltage characteristics (CVC) of them were measured. The measurements showed no degradation of the critical current of all the samples after storage within 10 years and even an increase of it by ca. 10 %. The approximate physico-chemical explanation of this phenomenon based on the X-ray investigation of the samples is also given.

Keywords: aging; critical current; volt-ampere characteristics; structure; non-stoichiometricity.

Николай Николаевич Балашов — научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН.

Nikolay Balashov — research fellow Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

Екатерина Анатольевна Головкова — научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН.

Ekaterina Golovkova — research fellow Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

Павел Николаевич Дегтяренко — к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук

Dr. Pavel Degtyarenko — Senior Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences