

УДК 538.945

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВТСП КОМПОЗИТОВ

© 2023 г. Д. А. Абин<sup>а, \*</sup>, М. А. Осипов<sup>а</sup>, А. С. Стариковский<sup>а</sup>,  
И. А. Руднев<sup>а</sup>, В. С. Столбунов<sup>б</sup>, Т. В. Кулевой<sup>б</sup>, П. А. Федин<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

<sup>б</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: dima\_abin@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2022 г.

После доработки 23.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) композитные ленты второго поколения – перспективные материалы для разработки источников высоких магнитных полей, в том числе для ускорителей и токамаков, где сверхпроводники могут подвергаться длительному воздействию радиационного излучения. Такое воздействие приводит к появлению дефектов в сверхпроводниках, наличие которых может приводить как к снижению токонесущей способности ВТСП вследствие деградации сверхпроводящего слоя, так и к увеличению, вследствие образования дополнительных центров пиннинга для вихрей магнитного поля. В данной работе было проведено моделирование процессов дефектообразования при облучении протонами с энергией  $E = 6–20$  МэВ как одиночной ленты, так и стопки из 10 ВТСП лент. Полученные результаты были проверены экспериментально при облучении стопки из 10 ВТСП лент протонами с энергией  $E = 6$  МэВ и флюенсом до  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Для экспериментальных исследований использовалась промышленная ВТСП лента SuperOx с двусторонним медным покрытием толщиной 20 мкм. Показано, что для облучения протонами с энергией  $E = 6$  МэВ, излучение практически не проходит сквозь одиночную ленту, что подтверждается тем фактом, что критический ток сверхпроводника падает только в первом слое стопки ВТСП-лент, а величина критической температуры для этого слоя отличается менее чем на 0.5% по сравнению с необлученной лентой. Сделан вывод, что в реальных системах ВТСП-ленты могут быть легко защищены от излучения с энергией  $E = 6$  МэВ, но при увеличении энергии требуется более сложная конструкция защиты. Перспективные конструкционные материалы

*Ключевые слова:* ВТСП лента, облучение протонами, критический ток, критическая температура, сверхпроводимость, радиационная стойкость ВТСП-лент

DOI: 10.56304/S2079562922050013

### ВВЕДЕНИЕ

Современные композитные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), в частности, ВТСП-ленты второго поколения на основе соединений редких земель (REBaCuO, где RE – редкая земля) обладают высокими значениями критического тока, благодаря чему они на данный момент широко используются в первую очередь в области электроэнергетики, позволяя создавать высокоэффективные линии электропередачи, моторы и генераторы. В силу того, что ВТСП-композиты также обладают высокими значениями плотности критического тока в сильных магнитных полях, это делает их крайне перспективным материалом для использования в ускорителях и токамаках, где сверхпроводники могут подвергаться длительному воздействию радиационного излучения. Для реализации этих систем необходимы экспериментальные

исследования воздействия радиационного излучения на сверхпроводящие свойства ВТСП-лент.

Воздействие различных типов радиации на низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) было широко изучено еще в 70-е гг. [1, 2]. С появлением ВТСП необходимо было повторить все исследования на новых сверхпроводниках. Результаты исследований показали, что воздействие радиации на ВТСП оказывает большее влияние на их характеристики, чем в случае с НТСП [3, 4]. Эти исследования были проведены на тонких монокристаллических пленках, где воздействие радиации создавало новые центры пиннинга, на которых могли закрепляться вихри Абрикосова, что приводило к улучшению токопроводящих характеристик тонких кристаллических ВТСП-пленок. Однако современные ВТСП-композиты представляют собой многослойную сложную струк-

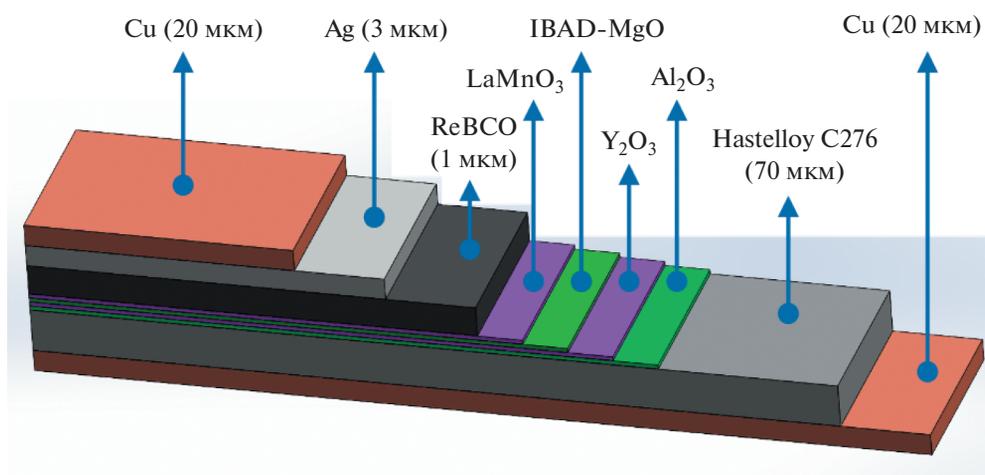


Рис. 1. Схематическое изображение структуры ВТСП ленты.

туру, а в ВТСП-слое уже присутствуют центры пиннига, поэтому радиационное воздействие на ВТСП-композиции приводит к сложно прогнозируемым изменениям в их токонесущей способности.

Кроме того, был проведен ряд исследований по изменению характеристик ВТСП-лент после облучения протонами и тяжелыми ионами [5]. Облучение протонами приводит к возникновению точечных дефектов, в то время как облучение тяжелыми ионами приводит к созданию колончатых дефектов [6, 7]. При правильно подобранных дозах облучения данные дефекты могут выступать в качестве центров пиннига, улучшая токонесущие способности ВТСП-лент.

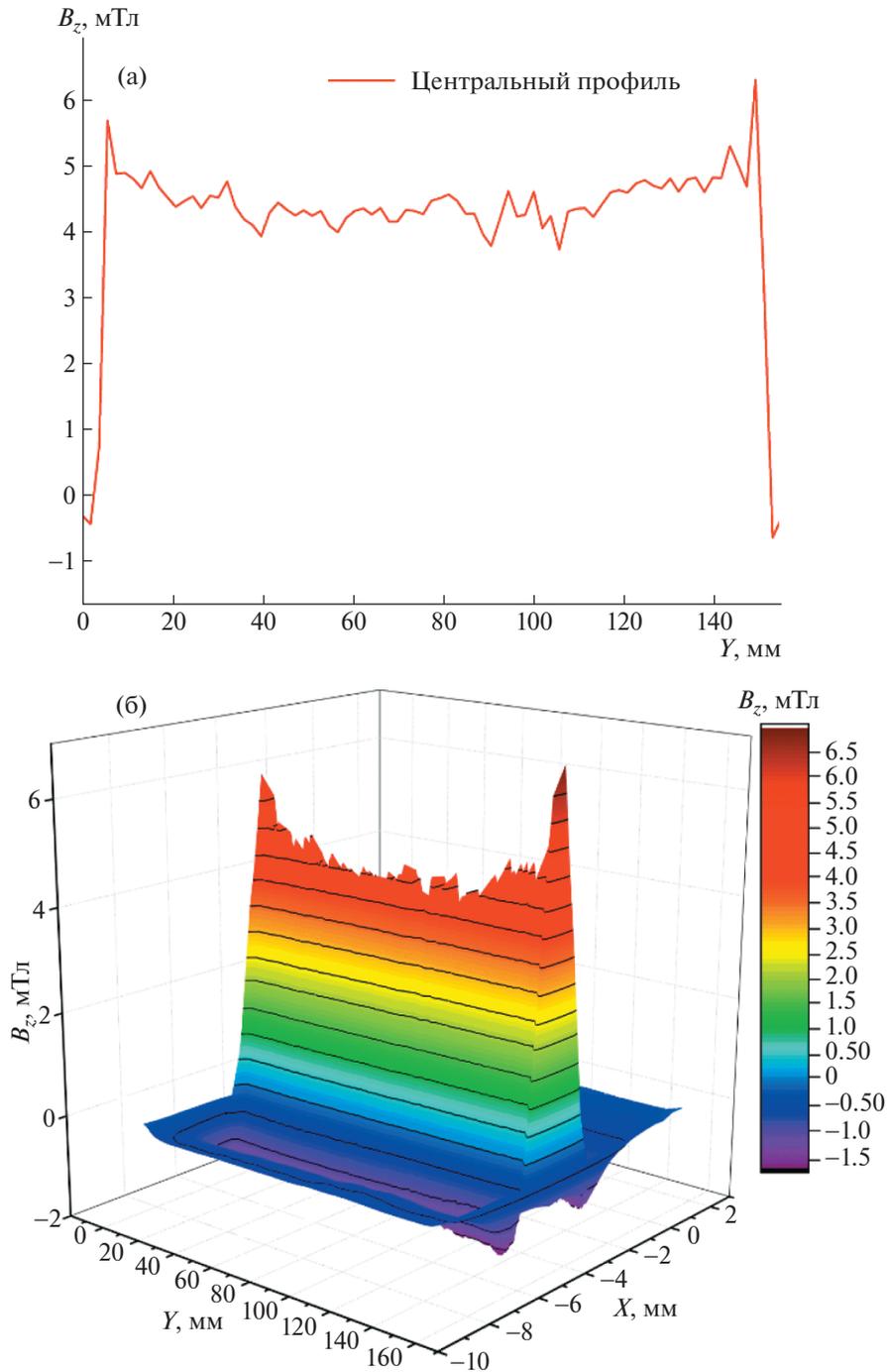
Были проведены исследования по изучению воздействия протонов на ВТСП-ленты, использующие различные редкоземельные элементы при производстве: иттрий [8], гадолиний [9], самарий [10]. Результаты экспериментов показывают улучшение критического тока лент в высоких и средних магнитных полях и при температурах менее 40 К. В то же время происходит снижение токонесущей способности при низких полях и значительное снижение при температурах, близких к критической. Данный эффект проявляется при сравнительно низких флюенсах (порядка  $10^{15}$ – $10^{16}$  см<sup>-2</sup>). В силу того, что исследования были сосредоточены на возможности улучшения токонесущих характеристик лент, исследования влияния более высоких флюенсов проведены не были, радиационная стойкость ВТСП-лент по отношению к облучению пучками протонов изучена не была. Исследования были сосредоточены в первую очередь на влиянии излучения протонов на критический ток лент; методичного исследования влияния протонного излучения на другие критические параметры (второе критическое поле, критическая температура) проведено не было.

Целью данной работы является проведение исследований влияния потоков заряженных частиц на токонесущие характеристики промышленного сверхпроводника: критический ток и критическую температуру.

#### ДЕТАЛИ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве излучения заряженных частиц рассмотрено облучение пучком протонов с энергией  $E = 6$ – $20$  МэВ. В качестве образцов для исследования использовалась ВТСП-лента производства фирмы СуперОкс, шириной 4 мм, с медным покрытием. Структура ленты приведена на рис. 1. Промышленная сверхпроводящая лента состоит из следующих слоев: подложки Hastelloy C276 (30–100 мкм), буферных слоев  $Al_2O_3$  (30–50 нм),  $Y_2O_3$  (5–10 нм),  $MgO$  (55–157 нм),  $LaMnO_3$  (30–50 нм), сверхпроводящего слоя  $ReBa_2Cu_3O_{7-x}$  (1–3 мкм), защитных слоев Ag (1–3 мкм) и Cu (20–40 мкм). Моделирование пролета пучка протонов в направлении перпендикулярном слоям ВТСП ленты на параметры ВТСП лент было проведено в программном пакете SRIM/TRIM, который позволяет методами Монте Карло рассчитать параметры взаимодействия ионов различных энергий со структурой вещества. Были получены траектории пролета и картины распределения протонов в веществе, картина распределения образовавшихся дефектов. Суммарная толщина буферных слоев не превышает сотен нанометров, поэтому при моделировании данные слои не учитываются.

Для эксперимента промышленная ВТСП-лента была разрезана на 10 образцов размерами  $4 \times 20$  мм и уложена в блок следующим образом: подложка одного образца на сверхпроводящий слой другого. Блок завернут в один слой алюминиевой фольги толщиной 50 мкм и закреплен на алюминиевую пластину-мишень. Облучение проводилось на воз-

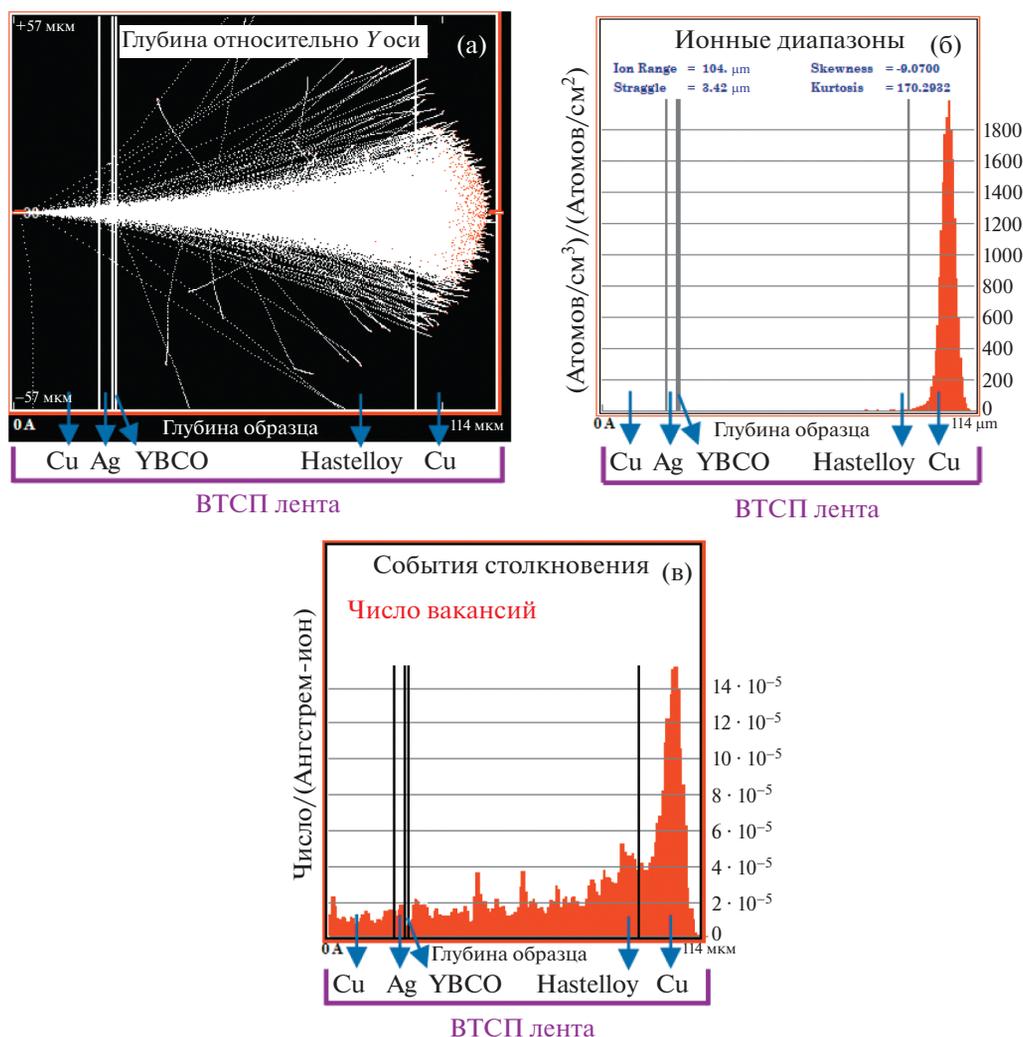


**Рис. 2.** Результаты сканирования длинного куска ленты методом сканирующей холловской магнетометрии. (а) Распределение захваченного потока вдоль средней линии ленты, (б) трехмерное распределение захваченного магнитного потока.

духе при комнатной температуре. Блок подвергался облучению протонами с энергией  $E = 6$  МэВ до флюенса  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Перед облучением было проведено измерение исходных токонесущих характеристик ВТСП-ленты – критического тока и критической темпера-

туры. Критическая температура определялась по зависимости электросопротивления на образце от температуры, измеренной контактным методом при медленном охлаждении и отогреве в парах азота и составляла порядка 92.9 К. Критический ток определялся из вольтамперной характери-

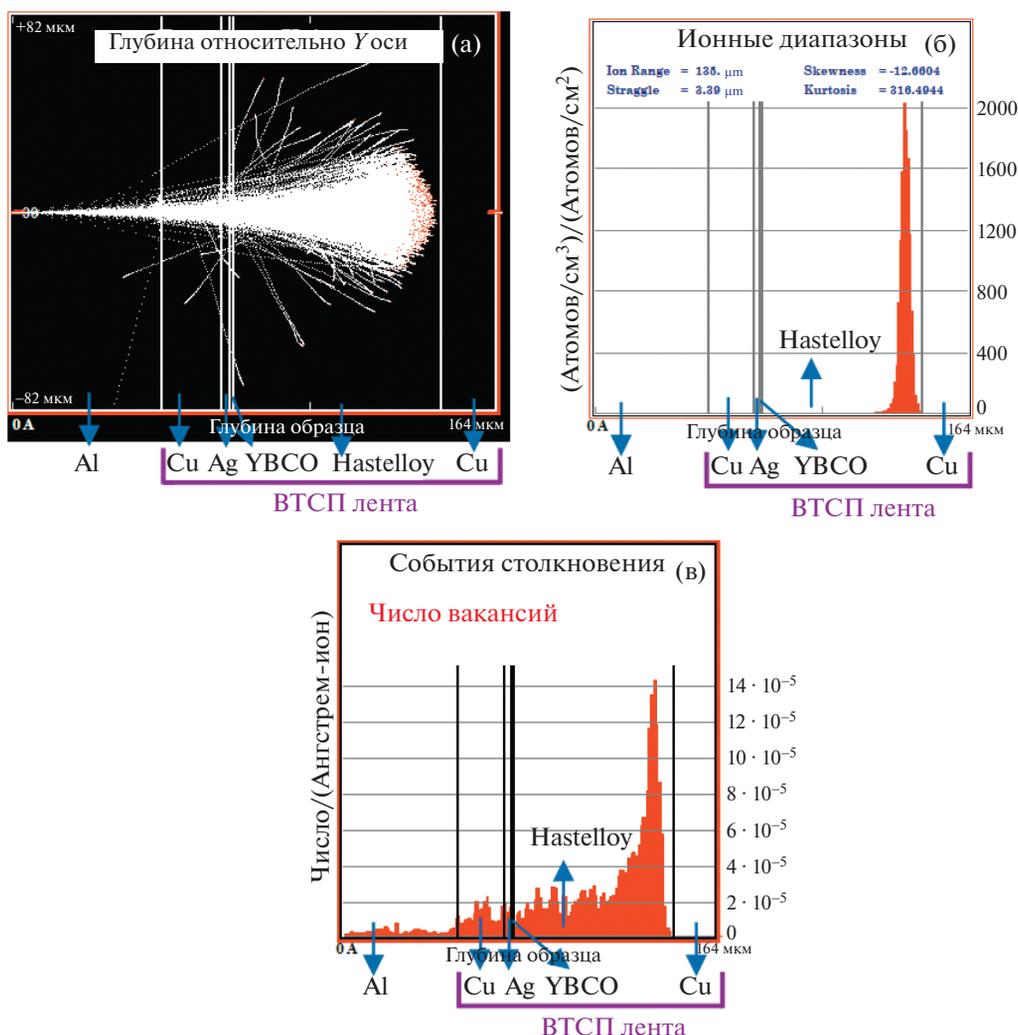


**Рис. 3.** Облучение ВТСП ленты пучком протонов с энергией 6 МэВ (а) схема пролетов протонов через материал, (б) распределение нейтронов, остающихся в материале, (в) распределение событий столкновения протонов с атомами вещества.

стики (ВАХ), измеренной четырех контактным методом при температуре кипения жидкого азота ( $T = 77 \text{ K}$ ), по критерию появления напряжения на образце 1 мкВ/см. В отсутствии внешнего магнитного поля средний критический ток ленты составлял порядка 150 А. Однако существует некоторая вариация критического тока вдоль исходной промышленной ленты, а измерить критический ток каждого кусочка предварительно вызывает затруднения в силу того, что для этого требуется припаивать токовые и потенциальные контакты, а нанесенный припой может нарушить чистоту эксперимента и повлиять на результаты облучения. Для решения этой проблемы и оценки локального распределения критического тока, было проведено исследование лент методом сканирующей холловской магнитометрии. Суть метода заключа-

ется в том, что лента охлаждается жидким азотом и намагничивается постоянным магнитом, после чего распределение поля над лентой измеряется при помощи датчика Холла. Захваченное магнитное поле пропорционально критическому току ленты, что позволяет оценить локальное распределение критического тока вдоль ленты и выкинуть участки с низкой величиной критического тока.

Промышленная лента была разрезана на кусочки длиной 15 см, после чего на каждом куске была проверена однородность критического тока методом сканирующей холловской магнитометрии. Пример сканирования куска ленты приведен на рис. 2. Наличие неоднородности критического тока говорит о присутствии локальных дефектов в сверхпроводящем слое, такие куски ленты



**Рис. 4.** Облучение ВТСП ленты, завернутой в алюминиевую фольгу, пучком протонов с энергией 6 МэВ (а) схема пролетов нейтронов через материал, (б) распределение протонов, остающихся в материале, (в) распределение событий столкновения протонов с атомами вещества.

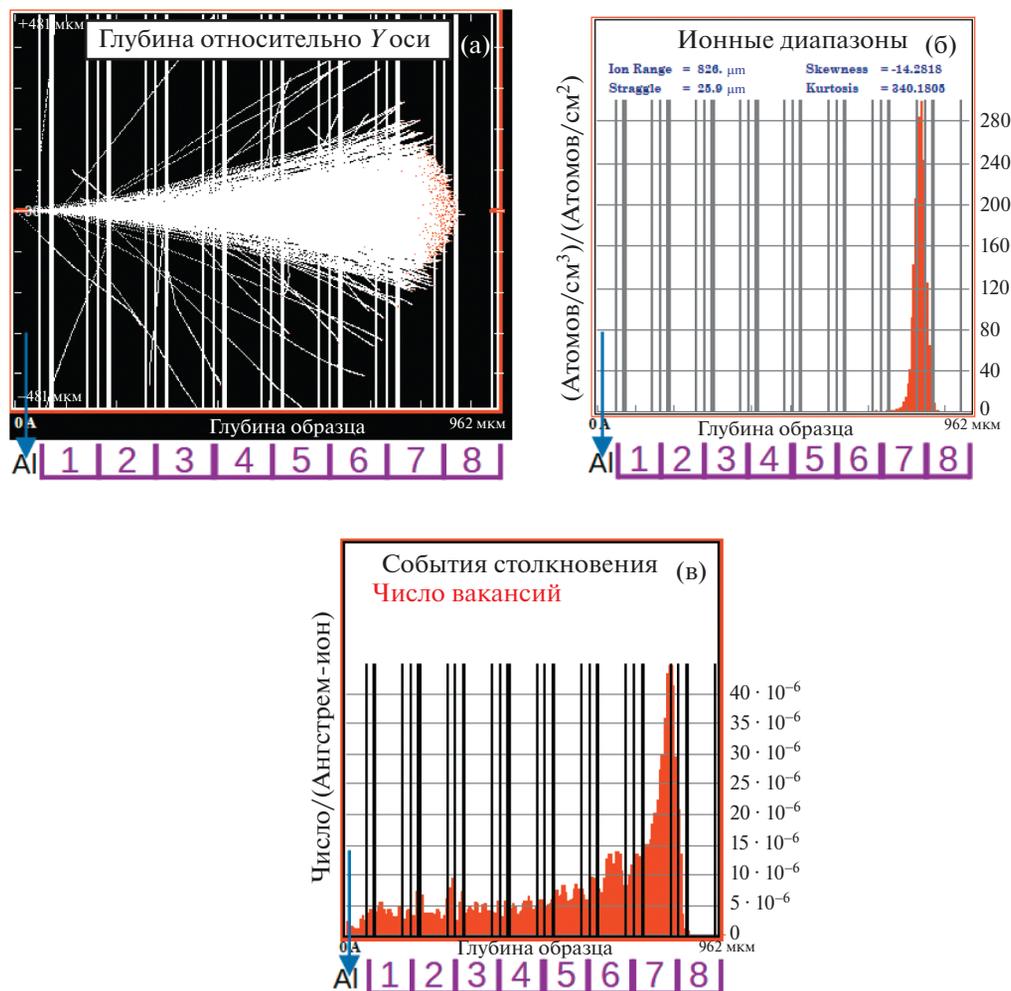
отбраковывались. Для дальнейших исследований отбирались только ленты однородностью захваченного магнитного поля по длине не хуже 15%. Оставшиеся участки лент были разрезаны на кусочки по 2 см, которые уже подвергались облучению. Из данных холловской магнитометрии было вычислено значение критического тока для каждого малого участка.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 3 приведены результаты моделирования облучения протонами с энергией  $E = 6$  МэВ. Большая часть протонов проходит через ленту, создавая точечные дефекты в сверхпроводящем слое, и остается во втором медном слое. При добавлении алюминиевой фольги толщиной 50 мкм на поверхность ленты, характер воздействия на сверхпроводящий слой практически не меняется,

но большинство протонов имплантируются уже в слое подложки из Hastelloy (рис. 4). На рис. 5 приведены результаты моделирования облучения протонами с энергией 20 МэВ с учетом наличия алюминиевой фольги. Первые 6 лент пучок протонов проходит практически полностью. Основная имплантация происходит в седьмой и восьмой лентах.

После экспериментального облучения блока лент с энергией  $E = 6$  МэВ до флюенса  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> было проведено измерение характеристик облученных образцов: критического тока и критической температуры. Критическая температура определялась по зависимости напряжения на образце от температуры, измеренной при медленном охлаждении и отогреве в парах гелия. Зависимости сопротивления от температуры для верхней (ближайшей к источнику нейтронов), нижней ленты

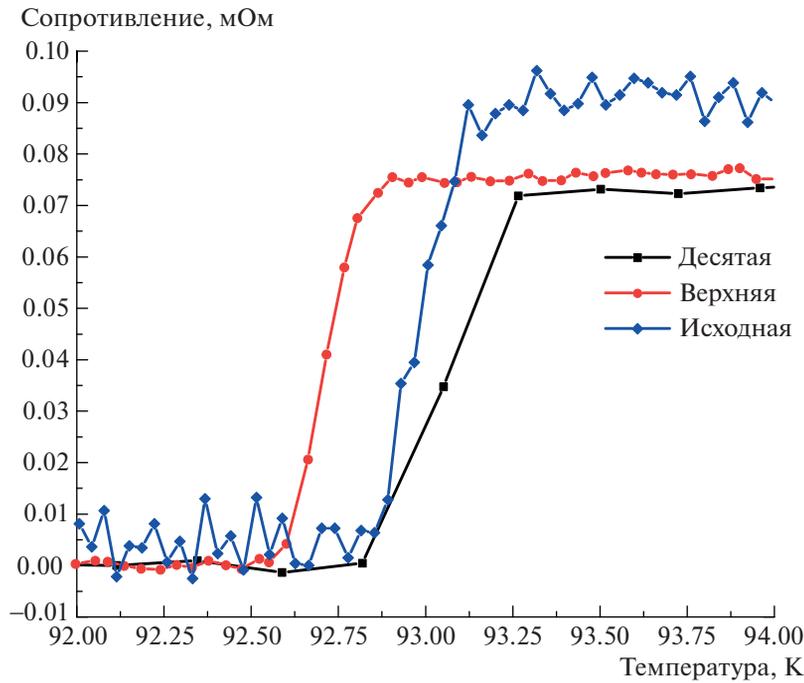


**Рис. 5.** Облучение стопки из 8 ВТСП лент, завернутой в алюминиевую фольгу, пучком протонов с энергией 20 МэВ (а) схема пролетов нейтронов через материал, (б) распределение протонов, остающихся в материале, (в) распределение событий столкновения протонов с атомами вещества. Линейка внизу показывает границы и номер ленты в стопке.

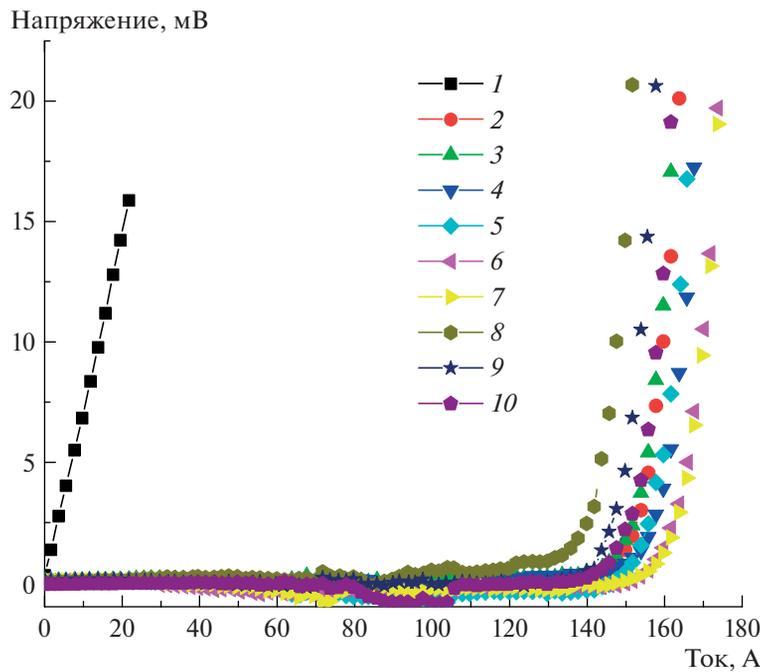
блока и для исходной необлученной ленты представлены на рис. 6. Величина критической температуры для первой ленты отличается менее чем на 0.5% по сравнению с необлученной лентой. А критическая температура нижней ленты в пределах погрешности совпадает с критической температурой необлученной ленты.

Помимо критической температуры было проведено измерение критического тока на всех облученных образцах. Примеры измеренных ВАХ приведены на рис. 7. Из зависимостей напряжения от тока видно, что для верхней ленты (ближайшей к источнику протонов) эта зависимость линейна и следует закону Ома. Следовательно, критический ток верхней ленты упал до значения ниже погрешности измерения, то есть ниже 1 А. Однако измерения критической температуры, представленные на рис. 6 показывают, что сверхпроводимость в образце при этом остается. В работах [11, 12] описан механизм изменения величины

критического тока для ВТСП в зависимости от количества дефектов. При увеличении числа дефектов критический ток растет, достигая максимума, а затем деградирует практически до нуля. Это связано с тем, что сначала количество центров пиннинга для вихрей Абрикосова увеличивается, но при высокой концентрации дефектов вихри закрепляются не на отдельных дефектах, а взаимодействуют с группами дефектов, что приводит к изменению глубины потенциальной ямы для вихря. Критическая температура уменьшается с ростом числа дефектов, но деградация происходит в несколько раз медленнее, чем деградация критического тока [13, 14]. Величина критической температуры связана скорее с целостностью структуры сверхпроводящего слоя, чем с количеством центров пиннинга. Увеличение числа дефектов приводит к увеличению зернистости структуры и ослаблению межзеренных связей, но внутри самих зерен сверхпроводимость сохраняется.



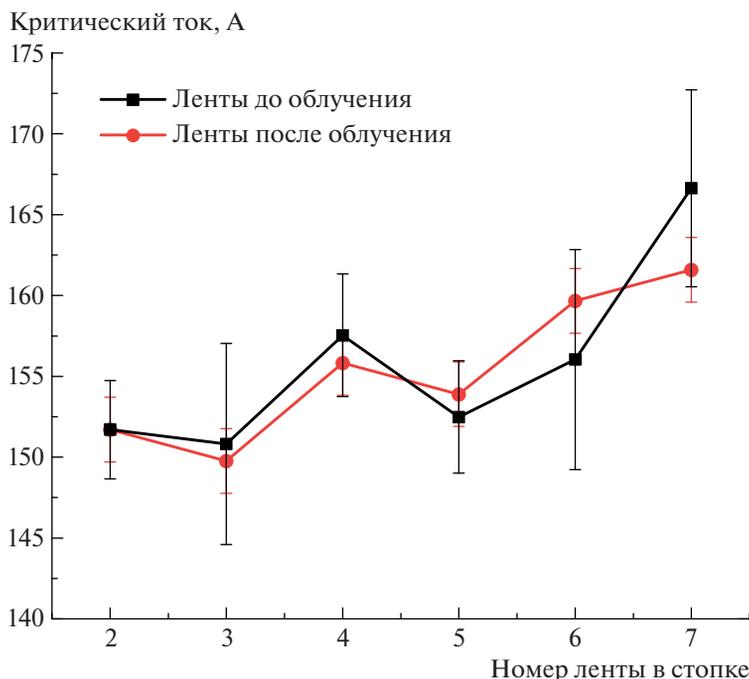
**Рис. 6.** Зависимость сопротивления от температуры для трех образцов лент – десятой ленты в центральном блоке, верхней ленты в центральном блоке (ближайшей к источнику протонов) и исходной необлученной ленты.



**Рис. 7.** Вольт-амперные характеристики ВТСП лент в стопке. На легенде указан номер ленты начиная с верхней (ближайшей к источнику протонов).

Образцы со второго по десятый демонстрируют наличие высокого критического тока. Пример зависимости критического тока от номера ленты в стопке представлен на рис. 8 для лент со второй по

седьмую. Также на рис. 8 представлены значения критического тока кусочков ленты, рассчитанные из данных холловской магнитометрии, приведенной на рис. 2. Из сравнения зависимостей



**Рис. 8.** Зависимости критического тока от номера ленты в стопке для лент со второй по седьмую. Представлены результаты, полученные из данных холловской магнитометрии на рис. 2 (на легенде — “ленты до облучения”), и данные прямого транспортного измерения после облучения. Энергия облучения 6 МэВ.

видно, что критический ток облученных лент совпадает в пределах погрешности с критическим током исходных лент. Таким образом, только для верхней ленты в блоке наблюдается деградация критического тока, причем ниже 1 А. Данный результат соответствует картине имплантации протонов, полученной при моделировании рис. 3. Пучок протонов создал дефекты в сверхпроводящем слое первой ленты, но не достиг сверхпроводящего слоя второй ленты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены исследования влияния потока заряженных частиц на критическую температуру и критический ток ВТСП-лент. Проведено моделирование облучения одиночной ленты и стопки из десяти ВТСП лент протонами с энергией  $E = 6\text{--}20$  МэВ. Стопка из десяти лент экспериментально подвергалась облучению протонами с энергией  $E = 6$  МэВ и флюенсом  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Показано, что для облучения протонами с энергией  $E = 6$  МэВ, излучение практически не проходит сквозь одиночную ленту, что подтверждается тем фактом, что критический ток сверхпроводника падает только в первой ВТСП-ленте из стопки, а величина критической температуры для этого слоя отличается менее чем на 0.5% по сравнению с необлученной лентой. Критический ток остальных лент в стопке после

облучения совпадает в пределах погрешности с критическим током исходных лент, что коррелирует с результатами распределения имплантированных протонов, полученными из моделирования. В реальных системах ВТСП-ленты могут быть легко защищены от излучения с энергией 6 МэВ, но при увеличении энергии требуется более сложная конструкция защиты.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках Госзадания на НИР (проект FSWU-2020-0035) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Д.А. Абин, М.А. Осипов), а также при частичной финансовой поддержке Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1352 (И.А. Руднев, А.С. Стариковский).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Colucci S.L., Weinstock H., Suenaga M. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48 (2). P. 837–838.
2. Fähnle M., Kronmüller H. // J. Nucl. Mater. 1978. V. 72 (1–2). P. 249–255.
3. Trappeniers L. et al. // Phys. C (Amsterdam, Neth.). 1999. V. 313 (1–2). P. 1–10.
4. Paulius L. et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 56 (2). P. 913–924.

5. Rudnev I. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (4). P. 1–5.
6. Civale L. et al. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67 (5). P. 648–651.
7. Kirk M.A., Yan Y. // Micron. 1999. V. 30 (5). P. 507–526.
8. Jia Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103 (12). P. 122601.
9. Haberkorn N. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28 (12). P. 125007.
10. Choi W.J. et al. // Sci. Rep. 2020. V. 10 (1). P. 1–12.
11. Rudnev I.A., Odintsov D.S., Kashurnikov V.A. // Phys. Lett. A. 2008. V. 372 (21). P. 3934–3936.
12. Rudnev I.A., Odintsov D.S., Kashurnikov V.A. // Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys. 2007. V. 71 (8). P. 1086–1088.
13. Елесин В.Ф., Руднев И.А. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1991. Т. 4 (11). С. 2055–2071.
14. Елесин В.Ф., Есин И.А., Руднев И.А. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1993. Т. 6 (4). С. 807–822.

## Influence of Proton Irradiation on the Critical Parameters of HTS Composites

D. A. Abin<sup>1</sup>, \*, M. A. Osipov<sup>1</sup>, A. S. Starikovskii<sup>1</sup>, I. A. Rudnev<sup>1</sup>,  
V. S. Stolbunov<sup>2</sup>, T. V. Kulevoy<sup>2</sup>, and P. A. Fedin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>2</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

\*e-mail: dima\_abin@mail.ru

Received July 21, 2022; revised July 23, 2022; accepted July 25, 2022

**Abstract**—High-temperature superconducting (HTS) 2G composite tapes are promising materials for the development of sources of high magnetic fields, including for accelerators and tokamaks, where superconductors can be exposed to radiation for a long time. Such an impact leads to the appearance of defects in superconductors, the presence of which can lead both to a decrease in the current-carrying capacity of the HTS due to the degradation of the superconducting layer, and to an increase due to the formation of additional pinning centers for magnetic field vortices. In this work, we simulated the processes of defect formation during irradiation with protons with energy  $E = 6–20$  MeV of both a single tape and a stack of 10 HTS tapes. The results obtained were verified experimentally by irradiating a stack of 10 HTS tapes with protons with an energy of  $E = 6$  MeV and a fluence of up to  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . For experimental studies, an industrial SuperOx HTS tape with a double-sided copper coating  $20 \mu\text{m}$  thick was used. It is shown that for irradiation with protons with energy  $E = 6$  MeV, the radiation practically does not pass through a single tape, which is confirmed by the fact that the critical current of the superconductor drops only in the first layer of a stack of HTS tapes, and the value of the critical temperature for this layer differs by less than by 0.5% compared to the non-irradiated tape. It is concluded that in real systems HTS tapes can be easily protected from radiation with an energy of  $E = 6$  MeV, but as the energy increases, a more complex protection design is required.

**Keywords:** HTS tape, proton irradiation, critical current, critical temperature, superconductivity, radiation resistance of HTS tapes