

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 538.945

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ
НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ВТСП КОМПОЗИТОВ
В ГЕЛИКОИДАЛЬНОМ КАБЕЛЕ**Д. А. Абин¹, А. С. Стариковский¹, А. Ю. Малявина¹, И. В. Мартиросян^{1,2}, С. В. Покровский¹,
Р. Г. Батулин², М. А. Черосов², П. А. Федин³, К. Е. Прянишников³, Т. В. Кулевой³

В Мегасайнс установках нового поколения (токамаках, синхротронах, ускорителях) для удержания плазмы и заряженных частиц требуются сильные магнитные поля, создаваемые магнитными системами из ВТСП. Транспортные и магнитные свойства ВТСП-лент, являющихся основой магнитных систем, чувствительны к типу и количеству дефектов в сверхпроводящем слое. В данной работе изучается влияние ионного облучения на сверхпроводящие свойства ВТСП-лент в геликоидальных кабелях. Исследована зависимость критического тока ВТСП-лент, подвергнутых предварительному ионному облучению, от внешнего магнитного поля. Облучение проводили ионами Fe^{2+} с энергией 5.6 МэВ и различными флюенсами при комнатной температуре. Образцы представляли собой ВТСП-ленты шириной 4 мм с открытым сверхпроводящим слоем, намотанные на мельхиоровую трубку диаметром 5 мм, а также недеформированные ленты. При флюенсе $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ наблюдается увеличение плотности критического тока при температурах ниже 30 К во всём измеренном диапазоне магнитных полей для недеформированных лент. Дальнейшее увеличение флюенса приводит к деградации характеристик. Для лент, подверженных деформации изгиба, наибольшие значения плотности критического тока соответствуют флюенсу 10^{13} см^{-2} , но они не превосходят значения для недеформированного, необлученного образца.

Ключевые слова: ВТСП-ленты, ионное облучение, критический ток, радиационные дефекты, деформация изгиба.

Введение. Термоядерные реакторы-токамаки требуют высоких магнитных полей для удержания горячей плазмы, в которой происходит дейтерий-тритиевая реакция. На-

¹ НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: DAAbin@mephi.ru.

² Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Казань, ул. Кремлевская, 18.

³ НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

пример, для разрабатываемого российского токамака TRT (ТРТ – Троицкий токамак с реакторными технологиями) необходимо достичь величины магнитного поля 8 Тл [1]. Чтобы сделать ядерный синтез более коммерчески выгодным, разрабатываемое в настоящее время следующее поколение малых токамаков будет разработано на основе современных высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2) для создания высоких магнитных полей в компактных обмотках [2]. Предпочтительным материалом для ВТСП является $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (RE – редкоземельный элемент), который обладает превосходной токопроводящей способностью при низких температурах в чрезвычайно высоких магнитных полях [3]. В промышленных масштабах производятся ленты следующей структуры: на гибкую металлическую подложку напыляются тонкие буферные слои и выращивается текстурированная пленка сверхпроводника толщиной $\sim 1-4$ мкм [4, 5]. Для защиты ВТСП-слоя осаждается слой серебра толщиной $\sim 1-2$ мкм, на финальном этапе лента с двух сторон покрывается стабилизирующим слоем меди 5–20 мкм [5]. ВТСП-ленты укладывают в кабели, из которых в последующем формируют обмотки ВТСП магнитов.

При эксплуатации в термоядерном реакторе обмотки ВТСП магнитов будут подвергаться воздействию потока нейтронов высокой энергии. Для дейтерий-тритиевой реакции характерная энергия нейтронов составляет 14.1 МэВ. Нейтронный поток в ИТЭР во время импульса мощностью 500 МВт вблизи сверхпроводящих магнитных систем достигает $10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ [6].

Исследования влияния нейтронов спектра деления и ионного облучения на сверхпроводящие свойства ВТСП-соединений, включая REBCO, начались в конце 1980-х годов, вскоре после открытия высокотемпературной сверхпроводимости [7–10]. Однако эксперименты проводились на монокристаллах, которые значительно отличаются по качеству от современных ВТСП-лент. Позднее результаты были подтверждены и на лентах [11, 12]. При низких значениях нейтронного флюенса облучение обычно приводит к увеличению критического тока, за исключением области очень слабых внешних магнитных полей, которая не очень важна для практического применения. Это улучшение критического тока является результатом создания дополнительных центров пиннинга магнитного потока. При дальнейшем увеличении значений нейтронного флюенса происходит деградация свойств. Высокая плотность дефектов, снижающая энергию активации движения линий магнитного потока и, следовательно, увеличивающая крип магнитного потока, ведет к потере сверхпроводимости [10]. Величина флюенса, соответствующая максимуму критического тока, зависит от множества факторов, включая

температуру измерения, направление приложенного магнитного поля и уже существующую структуру дефектов [11]. В работе [10] было обнаружено, что критическая температура сверхпроводника монотонно снижается с увеличением флюенса нейтронов до $\sim 10^{18}$ см⁻², с возможным плато при очень низких флюенсах [10]. Поскольку измерения критической температуры выполняются при очень низких токах, это убедительно свидетельствует о том, что радиационно-индуцированные дефекты возникают повсюду в облучаемом объеме, даже при относительно низких флюенсах нейтронов.

В силу сложностей работы с нейтронным пучком: длительное время экспозиции для набора флюенса, активация исследуемых образцов – распространены имитационные эксперименты по созданию радиационных дефектов за счёт облучения ионами. Ионное облучение обеспечивает легкодоступный альтернативный путь изучения влияния радиации на высокотемпературные сверхпроводники, при этом создавая те же типы структурных дефектов в решетке REBCO [13]. В данной работе были проведены исследования влияния облучения ионами Fe²⁺ на сверхпроводящие свойства ВТСП-лент с целью получения новых сведений об их функционировании в радиационных полях.

Методика исследования и образцы. В качестве образцов для исследований были использованы ленточные ВТСП композиты второго поколения, промышленно выпускаемые компанией ООО “С-Инновации”. Композиты представляют собой тонкий (порядка 1–2 мкм) слой ВТСП YBa₂Cu₃O_{7-x}, нанесенный на гибкую подложку из сплава Hastelloy C-276, толщиной 40 мкм с использованием нескольких буферных слоев. Как правило, ВТСП закрывается тонким защитным слоем серебра и весь композит покрывается слоями меди. В нашем случае технологические этапы нанесения слоёв меди и серебра были пропущены. Открытый слой ВТСП был необходим для соблюдения режимов облучения ионами заданных энергий. Ранее коллективом авторов статьи было показано влияние слоев меди и серебра на режим образования дефектов [12, 14, 15]. Облучение через открытый слой серебра толщиной 0.5–2 мкм приводит не только к созданию вакансий в ВТСП структуре, но и к имплантации ионов. Наилучшая имплантация в ВТСП-слой происходит при толщине слоя серебра около 1.2 мкм, что приводит к увеличению критического тока [12].

Критическая температура исходных образцов ВТСП-лент (шириной 4 мм) составляет $T_c \sim 91 - 92$ К, критический ток – $I_c \sim 150$ А при температуре кипения жидкого азота (77 К) в собственном магнитном поле. Использовались как прямые образцы ВТСП-ленты, так и подверженные деформации изгиба, что по своей структуре близко к структуре геликоидального кабеля, который может служить основой для магнитной

системы. Деформация изгиба создавалась с помощью намотки на мельхиоровую трубку диаметром 5 мм. Сила натяжения находилась в пределах от 500 до 1000 г. Угол намотки составлял 22 градуса. Намотка осуществлялась сверхпроводящим слоем внутрь. Облучение сверхпроводящего слоя осуществлялось через сквозное отверстие в трубке диаметром 3 мм. Отверстие перпендикулярно оси трубки. Схема облучения и держатель с образцами приведены на рис. 1. Более подробно схема эксперимента по облучению описана в работе [16].

Облучение проводилось на резонансном ускорителе ТИПр-1 в Центре коллективного пользования “КАМИКС” Национального Исследовательского Центра “Курчатовский институт” ионами Fe^{2+} с энергией 5.6 МэВ при температуре ~ 300 К. Получен набор образцов с флюенсами: 5×10^{12} , 1×10^{13} , 2×10^{13} , 5×10^{13} см^{-2} .

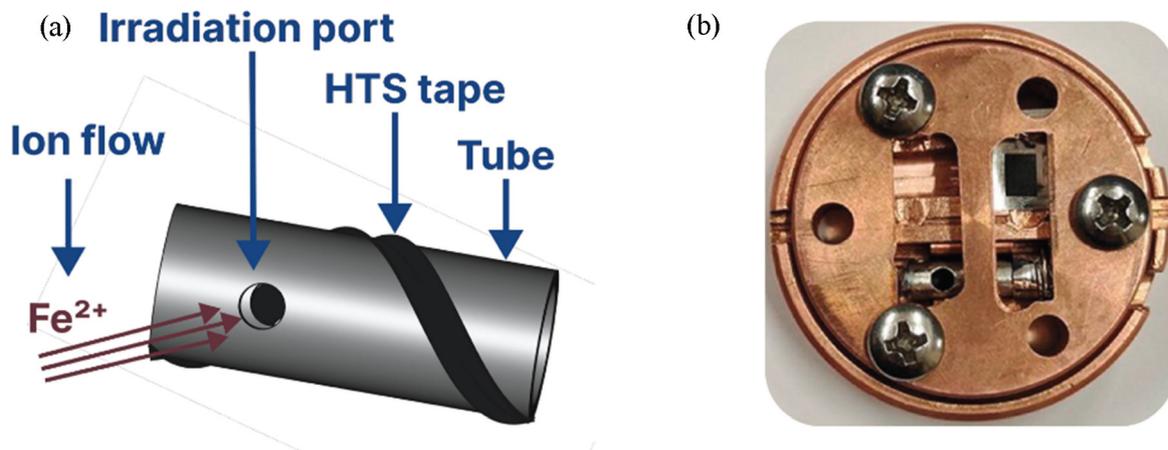


Рис. 1: (a) схема облучения, (b) держатель образцов.

При используемом способе намотки внутри сверхпроводящего слоя возникают механические напряжения. Однако в наших экспериментах это не приводило к деградации величины критического тока. Качество образцов до и после намотки контролировалось по картине распределения захваченного магнитного поля. Для обнаружения дефектов в лентах использовалась пространственная сканирующая Холловская магнитометрия при температуре кипения жидкого азота 77 К.

После облучения образцы извлекались из держателя. Далее механическим методом из областей, подвергшихся облучению, вырезались квадраты со стороной ~ 2 мм. Для полученных образцов были измерены петли намагничивания на вибрационном магнетометре РРMS-9 при температурах 5, 20, 30, 50, 65, 77 К и магнитных полях до 8 Тл. На основе полученных данных по формуле (1) были рассчитаны нормированные плотности

критического тока [17]

$$J_c[A/cm^2] = \frac{20\Delta M}{V_{HTS} \cdot b} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{b}{3a}\right)}, \quad (1)$$

где J_c – плотность критического тока, ΔM – намагниченность ВТСП образца, определенная из петли намагниченности, V_{HTS} – объем сверхпроводника, a – длина образца, b – ширина образца. Второй множитель позволяет учесть форм-фактор образца.

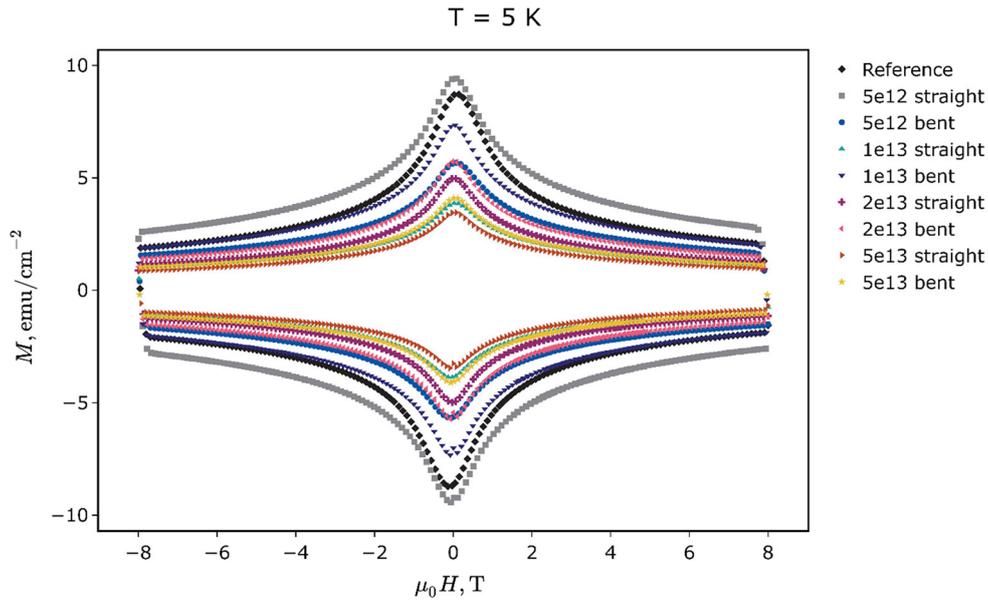


Рис. 2: Зависимости магнитного момента образцов ВТСП-ленты, нормированные на их площадь, от индукции внешнего магнитного поля при температуре 5 К.

Результаты. На рис. 2 приведен набор петель намагничивания для прямых и деформированных образцов при температуре 5 К. С точки зрения создания магнитных систем на основе ВТСП с максимальным магнитным полем представляет интерес рабочий диапазон температур вблизи кипения жидкого гелия 4.2 К. Из графика видно, что недеформированный образец, подвергнутый облучению с флюенсом $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, имеет наибольший магнитный момент во всём диапазоне магнитных полей, превосходя даже референсный, не подвергнутый изгибам и облучению, образец. Такая же картина сохраняется и для температур 20, 30 К. В магнитных полях до 2 Тл ни один из образцов, подверженных изгибу, не превосходит референсный (за исключением области крайне низких магнитных полей). На рис. 3 приведены данные петель намагниченности для ВТСП образца, подверженного деформации изгиба и облученного с флюенсом на $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, в зависимости от индукции внешнего магнитного при различных тем-

пературах. Петли намагничивания, подобные показанным на рис. 3, были получены и проанализированы для всех образцов в широком диапазоне температур.

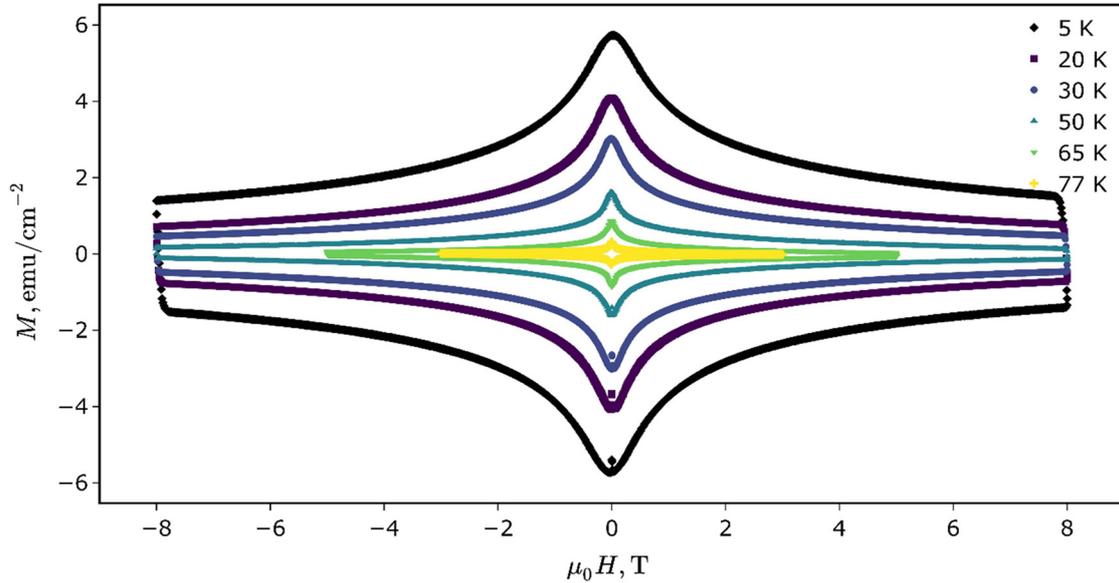


Рис. 3: Зависимости магнитного момента образцов ВТСП-ленты, нормированные на их площадь, от индукции внешнего магнитного поля при различных температурах для образца, подверженного деформации изгиба и облученного с флюенсом на $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Механическая деформация ВТСП-лент влияет на характер радиационных дефектов, формируемых при облучении ионами, потому что она напрямую изменяет структурное состояние, дефектность, напряжённо-деформированное состояние (НДС) и теплопереносные свойства сверхпроводящей плёнки [18]. Когда YBCO (или другой REBCO) находится в растянутом или сжатом состоянии, энергия образования вакансий, межузловых атомов и кластеров меняется [19]. При растяжении энергия образования вакансий снижается, дефекты формируются легче, трек иона может быть шире или плотнее. При сжатии энергия образования межузловых дефектов возрастает, часть энергии уходит на релаксацию напряжений, трек может быть менее непрерывным [20, 21]. Деформация вызывает перераспределение существующих дефектов. ВТСП-ленты содержат дислокации, микротрещины, границы зёрен, остаточные технологические напряжения. Механическая нагрузка раскрывает трещины, изменяет плотность дислокаций, перераспределяет остаточные напряжения. Ион, попадая в такую изменённую среду, будет создавать трек не в идеальной кристаллической решётке, а в сильно неод-

нородной структуре. Это влияет на то, как трек стягивается, в каких направлениях распространяется. Деформация меняет ориентацию наноструктур и текстуру YBCO. Любые изменения кристаллографической ориентации по оси c влияют на каналирование ионов, глубину пробега и характер энергетических потерь [22]. Кроме того, облучение ионами с различным флюенсом нелинейным образом влияет на механическую прочность как стабилизированных медью, так и открытых ВТСП-лент [23].

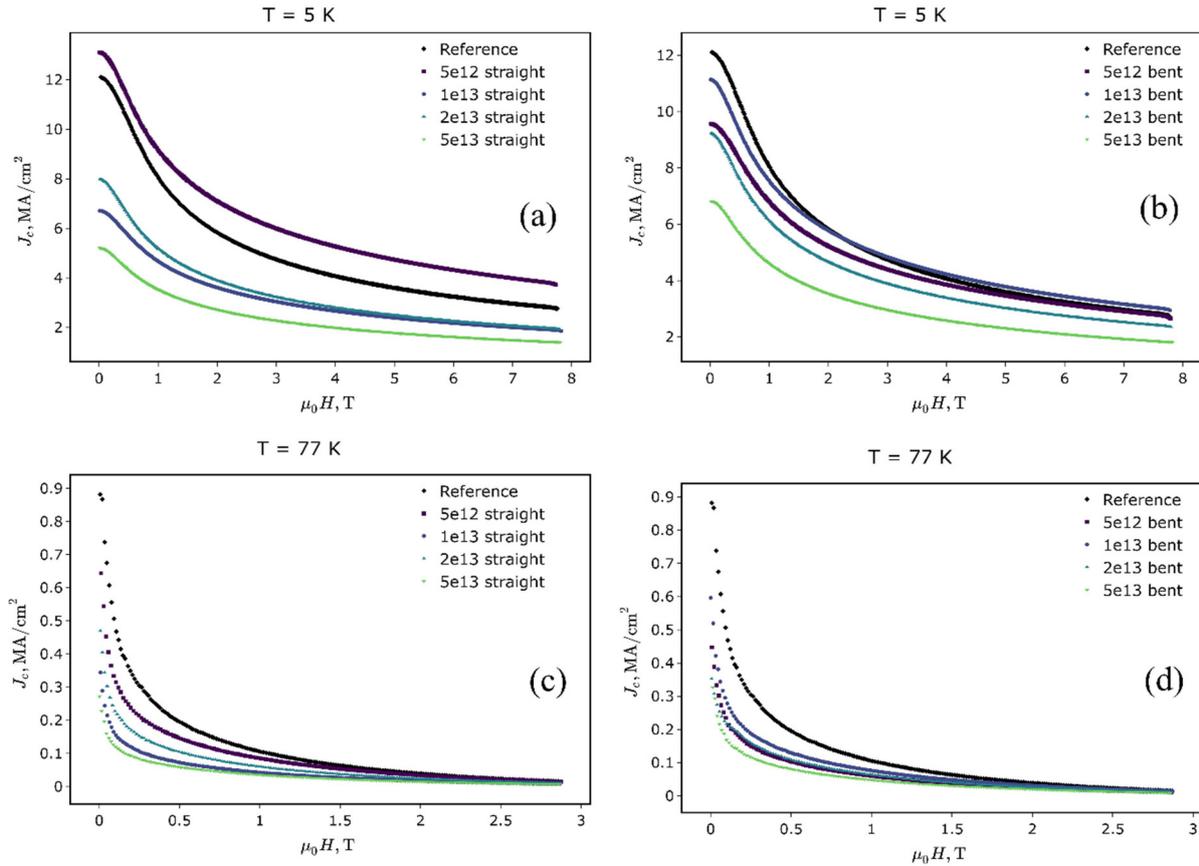


Рис. 4: Зависимости величины плотности критического тока от индукции внешнего магнитного поля при температуре 5 К и 77 К: (a), (c) недеформированные ленты; (b), (d) ленты, подверженные деформации изгиба.

На рис. 4 приведены зависимости величины плотности критического тока от индукции внешнего магнитного поля, а на рис. 5 – от ионного флюенса при температуре 5 К и 77 К. Из рис. 5 видно, что пик токонесущей способности деформированной ленты сдвинут в область больших флюенсов, относительно недеформированной, и приходится на 1×10^{13} см⁻². При температуре ниже 30 К и флюенсе больше 1×10^{13} см⁻² плот-

ность критического тока деформированных лент превышает плотность критического тока недеформированных лент во всём диапазоне магнитных полей для образцов с одинаковым флюенсом.

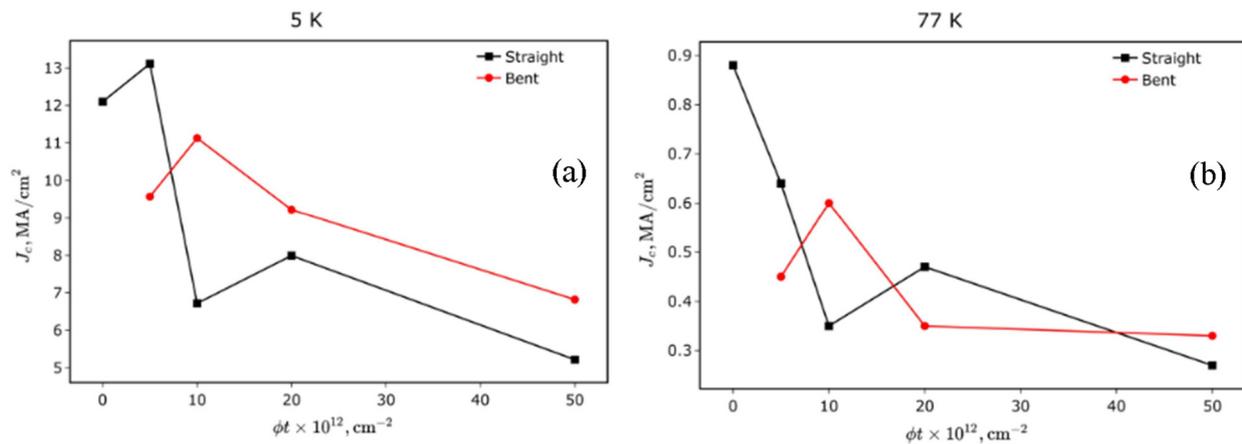


Рис. 5: Зависимости величины плотности критического тока от ионного флюенса для деформированных и недеформированных ВТСП-лент при температуре (a) 5 К, (b) 77 К.

Заключение. В настоящей работе экспериментально исследовано влияние различного флюенса ионного облучения на критический ток открытых ВТСП-лент: недеформированных и предварительно намотанных на мельхиоровые трубки сверхпроводящим слоем внутрь. Такой подход позволяет учитывать деформации, возникающие в ВТСП-слое, при изготовлении геликоидального кабеля, который используется в том числе для создания магнитных систем.

Показано влияние увеличения флюенса на критический ток сверхпроводника при различной температуре. При флюенсе 5×10^{12} см⁻² наблюдается увеличение плотности критического тока при температурах ниже 30 К во всём измеренном диапазоне магнитных полей для недеформированных лент. Дальнейшее увеличение флюенса приводит к деградации характеристик. Для лент, подверженных деформации изгиба, наибольшие значения плотности критического тока соответствуют флюенсу 10^{13} см⁻², но они не превосходят значения для недеформированного, необлученного образца.

При температуре ниже 30 К и флюенсе больше 1×10^{13} см⁻² плотность критического тока деформированных лент превышает плотность критического тока недеформированных лент во всём диапазоне магнитных полей для образцов с одинаковым флюенсом. Таким образом, полученные результаты демонстрируют сочетанное влияние ионного

облучения и механической деформации на токонесущие свойства ВТСП-лент, и позволяют выделить характерные области улучшения и деградации их сверхпроводящих параметров

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-22-00398 <https://rscf.ru/project/24-22-00398/>. Ионное облучение проводилось с использованием оборудования Центра коллективного пользования “КАМИКС” (<http://kamiks.iterp.ru/>) Национального Исследовательского Центра “Курчатовский институт”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. В. Красильников и др., *Физика плазмы* **47**(11), 970 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21110192.
- [2] B. N. Sorbom, J. Ball, T. R. Palmer, et al., *Fusion Engineering and Design* **100**, 378 (2015). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.07.008.
- [3] C. Senatore, M. Bonura, T. Bagni, *Superconductor Science and Technology* **37**(11), 115013 (2024). DOI: 10.1088/1361-6668/ad7f95.
- [4] V. Braccini, A. Xu, J. Jaroszynski, et al., *Superconductor Science and Technology* **24**(3), 035001 (2010). DOI: 10.1088/0953-2048/24/3/035001.
- [5] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, et al., *Scientific Reports* **11**(1), 2084 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z.
- [6] R. Juarez, M. Belotti, A. Kolsek, et al., *Nature Communications* **15**(1), 8563 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-52667-x.
- [7] A. Umezawa, G. W. Crabtree, J. Z. Liu, et al., *Physical Review B* **36**(13), 7151 (1987). DOI: 10.1103/PhysRevB.36.7151.
- [8] F. M. Sauerzopf, H. P. Wiesinger, W. Kritscha, et al., *Physical Review B* **43**(4), 3091 (1991). DOI: 10.1103/PhysRevB.43.3091.
- [9] F. M. Sauerzopf, H. P. Wiesinger, W. Kritscha, et al., *Cryogenics* **33**(1), 8 (1993). DOI: 10.1016/0011-2275(93)90068-Y.
- [10] F. M. Sauerzopf, H. P. Wiesinger, H. W. Weber, et al., *Physical Review B* **51**(9), 6002 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevB.51.6002.
- [11] D. X. Fischer, R. Prokopec, J. Emhofer, M. Eisterer, *Superconductor Science and Technology* **31**(4), 044006 (2018). DOI: 10.1088/1361-6668/aaadf2.

- [12] D. A. Abin, I. A. Rudnev, A. S. Starikovskii, et al., *Physics of Atomic Nuclei* **86**(9), 1985 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823090016.
- [13] K. Adams, W. Iliffe, R. J. Nicholls, et al., *Superconductor Science and Technology* **36**(10), 10LT01 (2023). DOI: 10.1088/1361-6668/aced9e.
- [14] I. Rudnev, D. Abin, S. Pokrovskii, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **32**(4), 1 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2022.3164629.
- [15] И. А. Руднев и др., *Физика твердого тела* **65**(3), 386 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.03.55577.540.
- [16] P. A. Fedin, K. E. Pryanishnikov, A. V. Ziyatdinova, et al., *Physics of Atomic Nuclei* **85**(2), S50 (2022). DOI: 10.1134/S1063778822140071.
- [17] M. Polichetti, A. Galluzzi, R. Kumar, A. Goyal, *Materials* **18**(2), 269 (2025). DOI: 10.3390/ma18020269.
- [18] J. Zhang, H. Wu, G. Zhao, et al., *Nanomaterials* **12**(19), 3340 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12193340>.
- [19] J. Emhofer, M. Eisterer, H. W. Weber, *Superconductor Science and Technology* **26**(3), 035009 (2013). DOI: 10.1088/0953-2048/26/3/035009.
- [20] Q. Guo, K. Lai, Y. Tang, et al., *Journal of Nuclear Materials* **537**, 152191 (2020). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152191.
- [21] B. Beeler, M. Asta, P. Hosemann, N. Gronbech-Jensen, *Journal of Nuclear Materials* **459**, 159 (2015). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.12.111.
- [22] A. S. Borovik, V. S. Malyshevsky, S. V. Rahimov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **226**(3), 385 (2004). DOI: 10.1016/j.nimb.2004.06.032.
- [23] Y. Pan, C. Xin, W. Wu, et al., *Fusion Engineering and Design* **211**, 114802 (2025). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2025.114802.

Поступила в редакцию 4 декабря 2025 г.

После доработки 5 января 2026 г.

Принята к публикации 6 января 2026 г.