

P14-2022-68

Л. Х. Антонова¹, В. К. Семина,*, А. В. Троицкий²

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ $^{132}\text{Xe}^{27+}$
ПОД РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ
НА КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ **ВТСП**-ЛЕНТ
ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Направлено в журнал «Физика металлов и металловедение»

¹ Московский политехнический университет, Москва

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

* E-mail: semina@jinf.ru

Антонова Л. Х., Семина В. К., Троицкий А. В.

P14-2022-68

Влияние облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ под различными углами на критические параметры ВТСП-лент второго поколения на основе $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Исследовано влияние облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) под углами 20, 30, 60 и 90° к поверхности ленты на критические параметры сверхпроводящих лент второго поколения на основе соединения $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ компании SuperOx. Получены зависимости критического тока при $T = 77$ К в собственном магнитном поле и критической температуры от флюенсов ионного облучения при различных углах облучения. Определена радиационная стойкость сверхпроводника к ионному облучению в зависимости от угла облучения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2022

Antonova L. Kh., Semina V. K., Troitskii A. V.

P14-2022-68

Effect of $^{132}\text{Xe}^{27+}$ Ions Irradiation at Different Angles on the Critical Parameters of the Second Generation HTSC Tapes Based on $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Effects of $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 MeV) ion irradiation at inclination of 20°, 30°, 60° and 90° relative to the tape surface on critical parameters of the 2nd generation HTSC tapes based on $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, produced by company SuperOx, were studied. Dependences of critical current at $T = 77$ K in self-magnetic field and of critical temperature on ion fluences for different angles of irradiation were established. Radiation resistance of superconductor to swift ion irradiation was identified as a function of irradiation angles.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Рекордно высокие значения критических токов и критические температуры, превышающие 90 К, делают современные гибкие ВТСП-ленты привлекательными для создания экономичных электротехнических устройств: генераторов [1], двигателей [2], накопителей энергии [3], томографов [4], мощных магнитных систем для ускорителей [5] и термоядерных установок [6].

В последних двух случаях ВТСП-ленты могут подвергаться воздействию различных ионизирующих излучений, которые могут влиять на свойства сверхпроводника. В зависимости от флюенса облучения это влияние может быть различно. При небольших флюенсах критический ток сверхпроводника либо остается неизменным, либо возрастает. Вырастет критический ток или нет, зависит от исходного значения криттока сверхпроводника, а также вида и энергии облучения. Увеличение критического тока связано с тем, что в результате облучения возникают различные радиационные дефекты, которые могут являться центрами пиннинга. При флюенсах облучения, превышающих некоторое критическое значение, критток, а затем и критическая температура сверхпроводника начинают уменьшаться, что может быть объяснено частичной аморфизацией сверхпроводника. Значение флюенса, при достижении которого критток начинает уменьшаться, зависит от типа сверхпроводника и вида и энергии облучения.

Таким образом, исследование влияния облучения на ВТСП-ленты важно по двум причинам. Во-первых, с целью нахождения режимов облучения, которые приводят к образованию эффективных центров пиннинга и, как следствие, к повышению критического тока сверхпроводника, а во-вторых, для оценки радиационной стойкости перспективных сверхпроводящих материалов.

Ранее нами проводились исследования влияния облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ), $^{86}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (48 МэВ) на критические свойства сверхпроводящих лент второго поколения на основе соединений $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [7–10]. Во всех этих работах облучение ионами происходило под углом 90° к поверхности ленты. Однако в случае применения ВТСП-лент в реальных реакторах или ускорителях, облучение ВТСП-лент может происходить и под другими углами. Целью данной работы является исследование влияния угла облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) на критические параметры ВТСП-ленты на основе $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

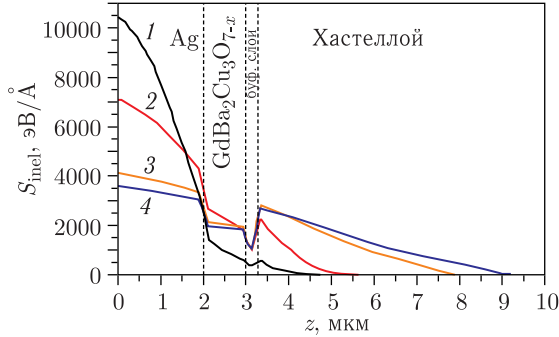


Рис. 2. Зависимость удельных ионизационных потерь энергии S_{inel} от глубины z в $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ для ионов $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) под углами 20° (1), 30° (2), 60° (3) и 90° (4) к поверхности ленты

изменяются значительно. Для ионов, падающих под углом 30° , удельные ионизационные потери в ВТСП-слое больше, чем при нормальном облучении, а для ионов, входящих под углом 20° , существенно меньше.

До и после облучения на каждом образце был измерен критический ток I_c при $T = 77$ К и $B = 0$. Кроме того, после облучения измерялись критическая температура T_c . Исходную T_c измерять на каждом образце нет необходимости, так как, в отличие от I_c , этот параметр постоянен на всей длине ВТСП-ленты. Поэтому T_c была измерена на одном исходном образце. Критический ток определялся из вольт-амперных характеристик (ВАХ) по критерию $E = 1$ мкВ/см. ВАХ измерялась четырехконтактным методом на постоянном токе с прижимными токовыми контактами с промежуточным слоем индия. Значения T_c определялись из зависимости $R(T)$. Данная зависимость также измерялась четырехконтактным методом на постоянном токе. При этом использовались прижимные токовые и потенциальные контакты.

Чтобы получить более точные результаты, в одних и тех же условиях облучались по два образца с максимально близкими исходными критическими токами. После облучения они, как правило, давали одинаковые, с точностью наших измерений ($\sim 0,5$ К), значения T_c и близкие значения критического тока, но иногда по какой-то причине значения критического тока существенно отличались. В этих случаях проводилось повторное облучение другой пары образцов до тех пор, пока не получались совпадающие или близкие результаты. После этого вычислялось среднее значение критического тока и критической температуры по двум образцам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученная зависимость отношения критического тока I_{c1} после облучения к исходному критическому току I_{c0} от флюенсов ионов ксенона для различных углов облучения при $T = 77$ К и $B = 0$ приведена на рис. 3.

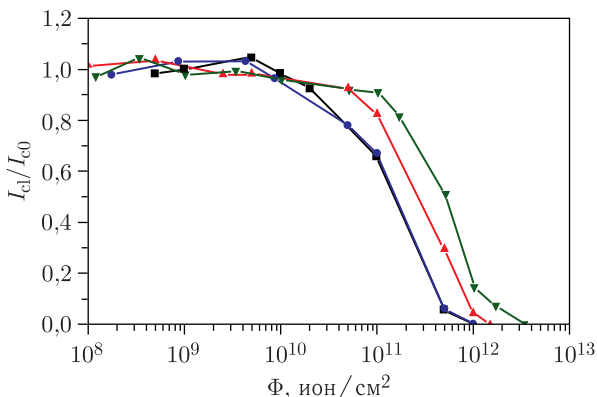


Рис. 3. Зависимость отношения критического тока после облучения I_{c1} при $T = 77$ К и $B = 0$ к исходному значению критического тока I_{c0} от флюенсов облучения ионами ксенона под углами 20° (\blacktriangledown), 30° (\blacktriangle), 60° (\bullet) и 90° (\blacksquare)

Из рис.3 видно, что при всех углах облучения имеется небольшое до примерно 5% повышение криттока, максимум которого наблюдается в интервале флюенсов от $3,4 \cdot 10^8$ до $5 \cdot 10^9$ ион/см² в зависимости от угла облучения. При уменьшении угла максимум криттока сдвигается в область меньших флюенсов. Из зависимости критического тока от флюенсов можно определить пороговый флюенс Φ_n . Пороговым при заданной температуре является флюенс облучения, при котором $I_c \rightarrow 0$ при этой температуре. Данный параметр определяет радиационную стойкость ВТСП-ленты. Критерием достижения Φ_n считалось падение I_c более чем в тысячу раз. Из рис.3 может быть определена зависимость Φ_n от угла облучения. Данная зависимость показана на рис.4. Из рис.4 видно, что для углов 20° , 30° , 60° и 90° Φ_n равен $3,4 \cdot 10^{12}$, $1,5 \cdot 10^{12}$, $1,0 \cdot 10^{12}$ и $1,0 \cdot 10^{12}$ ион/см²

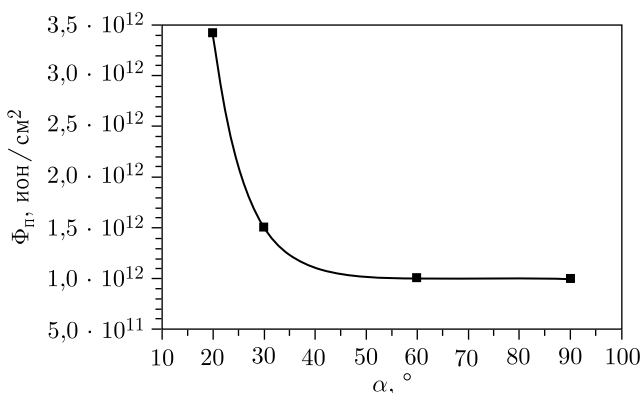


Рис. 4. Зависимость порогового флюенса Φ_n от угла облучения α ионами ксенона. Линия — аппроксимация по формуле (1)

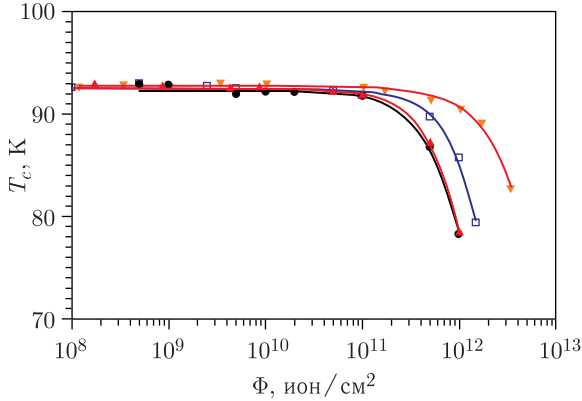


Рис. 5. Зависимость T_c от флюенсов облучения ионами ксенона под углами 20° (▼), 30° (□), 60° (▲) и 90° (●)

соответственно. Данная зависимость хорошо аппроксимируется следующей формулой:

$$\Phi_n = \Phi_0 + A e^{-\alpha/t}, \quad (1)$$

где $\Phi_0 = 0,9977 \cdot 10^{12}$ ион/см², $t = 6,3890$ град., $A = 5,4971 \cdot 10^{13}$ ион/см². В данной формуле α измеряется в градусах, а Φ_n — в ион/см².

Зависимость критической температуры от флюенсов облучения ионами ксенона приведена на рис. 5. Из данного рисунка видно, что при всех углах облучения критическая температура ленты начинает заметно уменьшаться при гораздо больших (примерно на порядок) флюенсах, чем критический ток (см. рис. 3). Интересно, что значение T_c , соответствующее пороговому флюенсу, при уменьшении угла облучения α увеличивается с 78,3 К при $\alpha = 90^\circ$ до 82,7 К при $\alpha = 20^\circ$. Это может свидетельствовать о том, что механизм разрушения сверхпроводимости в ВТСП-ленте при облучении ионами под малыми углами отличается от механизма разрушения сверхпроводимости при облучении под углами, близкими к 90° . Для выяснения причин этих различий требуются дополнительные исследования.

ВЫВОДЫ

Облучение ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) под углами 20, 30, 60 и 90° существенно влияет на критические параметры (I_c и T_c) ВТСП-ленты, но при углах меньше 60° это влияние становится слабее.

При всех исследованных углах облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) наблюдается небольшое (до $\sim 5\%$) увеличение критического тока ВТСП-лент в интервале флюенсов от $3,4 \cdot 10^8$ до $5 \cdot 10^9$ ион/см². При уменьшении угла облучения максимум криттока сдвигается в область меньших флюенсов.

Для всех исследованных углов облучения определен пороговый флюенс облучения Φ_n , при котором $I_c \rightarrow 0$. Для углов 20, 30, 60 и 90° Φ_n равен

$3,4 \cdot 10^{12}$, $1,5 \cdot 10^{12}$, $1,0 \cdot 10^{12}$ и $1,0 \cdot 10^{12}$ ион/см² соответственно. Зависимость $\Phi_n(\alpha)$ хорошо аппроксимируется следующей формулой: $\Phi_n = \Phi_0 + A e^{-\alpha/t}$.

При всех исследованных углах облучения ионами ксенона критическая температура ленты начинает заметно уменьшаться при гораздо больших (примерно на порядок) флюенсах, чем критический ток.

Критическая температура, соответствующая пороговому флюенсу при уменьшении угла облучения α , увеличивается с 78,3 К при $\alpha = 90^\circ$ до 82,7 К при $\alpha = 20^\circ$.

Авторы благодарят А. А. Молодыка за предоставление образцов и В. А. Скуратова за работу по облучению ионами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kovalev K. L., Poltavets V. N., Ilyasov R. I., Verzhbitsky L. G., Kozub S. S. 1 MVA HTS-2G Generator for Wind Turbines // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 87. P. 032018.
2. Dezhin D., Ilyasov R., Kozub S., Kovalev K., Verzhbitsky L. Synchronous Motor with HTS-2G Wires // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 507. P. 032011.
3. Savoldi L., Laviano F., Viarengo S., Sparacio S., Napolitano A. Design of a Module for a 10 MJ Toroidal YBCO Superconducting Magnetic Energy Storage // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2022. V. 32, No. 4. P. 5700105.
4. Parizh M., Lvovsky Y., Sumption M. Conductors for Commercial MRI Magnets beyond NbTi: Requirements and Challenges // Supercond. Sci. Technol. 2017. V. 30. P. 14007.
5. Gupta R., Anerella M., Ghosh A., Joshi P., Kirk H., Lalitha S. L., Palmer R., Sampson P., Wanderer W., Witte H., Shiroyanagi Y., Cline D., Garren A., Koonko J., Scanlan R., Weggel R. High Field HTS Solenoid for a Muon Collider — Demonstrations, Challenges, and Strategies // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2014. V. 24, No. 3. P. 4301705.
6. Bruzzone P., Fietz W. H., Minervini J. V., Novikov M., Yanagi N., Zhai Y., Zheng J. High Temperature Superconductors for Fusion Magnets // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. P. 103001.
7. 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 критических параметров ВТСП-ленты от флюенсов при облучении тяжелыми ионами и электронами высоких энергий // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 5. С. 84–91.
8. Mikhailova G. N., Antonova L. Kh., Troitskii A. V., Didyk A. Yu., Mal'ginov V. A., Demikhov T. E., Suworova E. I. Radiation Resistance and Generation of Pinning Centers in Composite HTSC under Heavy Ion Irradiation // Physica Status Solidi C. 2013. V. 10. No. 4. P. 677–680.
9. Antonova L. Kh., Troitskii A. V., Mikhailova G. N., Demikhov T. E., Kuzmichev S. A., Skuratov V. A., Semina V. K. Changes in Critical Parameters of GdBa₂Cu₃O_{7-x} HTS-2G Due to Swift-Ion Irradiation // Physica Status Solidi B. 2019, V. 256. P. 1800255.

10. *Troitskii A. V., Antonova L. Kh., Demikhov T. E., Skuratov V. A., Semina V. K., Mikhailova G. N.* The Effect of Xe Ion Irradiation (40, 80 MeV) on HTS-2G $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ // *Physica C: Superconductivity and Its Applications*. 2020. V. 572. P. 135363.
11. *Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov 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. Technol.* 2014. V. 27, No. 4. P. 04402.
12. *Biersack P., Haggmark L. G.* A Monte Carlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous Targets // *Nuclear Instruments and Methods B*. 1980. V. 174, Nos. 1–2. P. 257–269, <http://www.srim.org>.

Получено 29 декабря 2022 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 09.02.2023.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,53. Тираж 110 экз. Заказ № 60600.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/