

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

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

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 (I_c) при 77 К в собственном магнитном поле и критической температуры (T_c) от флюенсов ионного облучения при различных углах облучения. При всех исследованных углах облучения наблюдается небольшое (до ~5 %) увеличение критического тока высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент в интервале флюенсов от $3,4 \cdot 10^8$ до $5 \cdot 10^9$ ион/см². Определена радиационная стойкость сверхпроводника к ионному облучению в зависимости от угла облучения. Для определения радиационной стойкости ленты был измерен пороговый флюенс облучения Φ_{th} , при котором критический ток стремится к нулю. Зависимость Φ_{th} от угла облучения α хорошо аппроксимируется формулой: $\Phi_{th} = \Phi_0 + A \cdot \exp(-\alpha/t)$.

Ключевые слова: сверхпроводящие ленты второго поколения, ионы ксенона, критический ток, критическая температура, радиационная стойкость.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-9-36-42

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 устройствах ВТСП ленты могут подвергаться воздействию различных ионизирующих излучений, которые могут влиять на свойства сверхпроводника. Стоит отметить, что эти ленты очень чувствительны к наличию структурных дефектов, которые могут являться центрами пиннинга Абрикосовских вихрей и определять токнесущие свойства сверхпроводника в магнитных полях. Вопросы влияния радиационного разупорядочения на сверхпроводящие свойства

ВТСП-материалов весьма глубоко рассмотрены в работе [7]. Вообще, взаимодействие сверхпроводников типа ReBaCuO с излучением имеет достаточно сложную природу [8].

Прохождение ионов через ВТСП слой сопровождается образованием радиационных дефектов, что в свою очередь приводит к изменению критических параметров сверхпроводника. Важное значение при этом имеет формирование оптимального количества эффективных центров пиннинга. Пиннинг возможен на дефектах структуры, размеры которых сопоставимы с длиной когерентности, характерной для соединения $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Характерные размеры дефектов хорошо описываются в рамках модели термического пика методами математического моделирования [9].

При небольших флюенсах облучения критический ток сверхпроводника либо остаётся неизменным, либо возрастает. Повысится критический ток или нет, зависит от исходного значения критиче-

ского тока сверхпроводника, а также вида и энергии облучения. Повышение критического тока при облучении ионами достигается за счет создания искусственных центров пиннинга. При флюенсах облучения, превышающих некоторое критическое значение, критический ток, а затем и критическая температура сверхпроводника начинают уменьшаться, что может быть объяснено частичной аморфизацией сверхпроводника.

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.

Влияние ионного облучения на свойства ВТСП материалов, достаточно много исследовали в работах [10 – 15]. Наиболее часто изучали влияние ионного облучения на критический ток сверхпроводников. Это не удивительно, потому что данный параметр имеет большое практическое значение, и ионное облучение очень существенно на него влияет. Это влияние имеет место при различных температурах (от 4,2 до 77 К), во внешних магнитных полях и в собственном поле. Значительное повышение критического тока в результате ионного облучения в ВТСП материалах, как правило, имеет место в сильном (более 5 Тл) внешнем магнитном поле [14]. В некоторых случаях критический ток в результате облучения ионами может ощутимо расти и в собственном магнитном поле. Например, в работе [15], в результате облучения ионами тантала, критический ток плёнки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ вырос при 77 К в собственном магнитном поле приблизительно в два раза, а при 30 К — в 2,5 раза.

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 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [16 – 19]. 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.

Цель данной работы — исследование влияния угла облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) на критические параметры ВТСП ленты на основе $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, в том числе радиационной стойкости ленты и критического тока при углах облучения отличных от 90° .

Эксперимент

Исследовано влияние облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) на образцы композитной ВТСП ленты производства компании SuperOx [20]. Данная лента делается на основе соединения $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ без медной оболочки. Она имеет следующие критические параметры: плотность критического тока $j_c \approx 1,5 \cdot 10^6$ А/см², критическая температура $T_c \approx 93$ К. Ленту без медной оболочки использовали в наших экспериментах потому, что в случае наличия такой оболочки, толщина которой обычно составляет 20 мкм, только ионы с очень большой энергией могут достигать ВТСП слоя. Как показывают расчёты по программе SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [21], для этого необходимы ионы с энергией более 700 МэВ. Эта энергия намного превышает максимально доступную для нас энергию 167 МэВ. Образцы ленты имели размеры $0,1 \times 4 \times 20$ мм³. Структура образца и геометрия облучения приведена на рис. 1. Лента шириной 4 мм имеет многослойную структуру, содержащую металлическую подложку (хастеллой С276), толщиной 60 мкм, несколько буферных слоев оксидов металлов толщиной 200 – 300 нм, пленку сверхпроводника $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 1 мкм, нанесенную методом лазерного напыления, сверху покрытую слоем серебра 2 мкм.

Образцы ленты облучали ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) под углами $20, 30, 60$ и 90° к поверхности ленты на ускорителе ионов ИЦ-100 в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ (Дубна) со стороны сверхпроводника. Для предотвращения перегрева во время облучения образцы крепили с помощью двустороннего углеродного скотча на

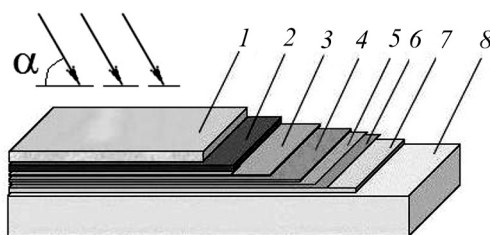


Рис. 1. Структура ВТСП ленты и геометрия облучения. 1 — Ag (2 мкм), 2 — $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (1 мкм), 3 – 7 — буферные слои, 8 — подложка из хастеллоя С-276 (60 мкм), α — угол облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$.

Fig. 1. HTSC tape structure and irradiation geometry. 1 — Ag (2 μm), 2 — $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (1 μm), 3 – 7 — buffer layers, 8 — Hastelloy C-276 substrate (60 μm), α — ion irradiation angle $^{132}\text{Xe}^{27+}$.

держателе, охлаждаемом водой при температуре 20 °С. Флюенсы облучения были в интервале от $1 \cdot 10^8$ до $3,4 \cdot 10^{12}$ ион/см².

До и после облучения на каждом образце был измерен критический ток I_c при $T = 77$ К и $B = 0$. Кроме этого после облучения определяли критическую температуру 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 определяли из вольтамперных характеристик (ВАХ) по критерию $E = 1$ мкВ/см. ВАХ измеряли четырехконтактным методом на постоянном токе с прижимными токовыми контактами с промежуточным слоем индия. Значения T_c определяли из зависимости сопротивления от температуры $R(T)$. Данную зависимость также измеряли четырехконтактным методом на постоянном токе. При этом использовали прижимные токовые и потенциальные контакты.

Чтобы получить более точные результаты, в одних и тех же условиях облучали 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 в некоторых экспериментах значения критического тока существенно отличались. В этих случаях проводили повторное облучение другой пары образцов до тех пор, пока не получали совпадающие или близкие результаты. После этого вычисляли среднее значение критического тока и критической температуры по двум образцам.

Результаты

Для использованных в работе углов облучения ионов по программе SRIM были рассчитаны удельные ионизационные потери энергии. На рис. 2 показаны величина удельных потерь энергии на ионизацию и пробег ионов. В расчёте плотность $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ была принята равной 6 г/см³. Из расчёта видно, что при всех значениях углов ионы $^{132}\text{Xe}^{27+}$ проходят сквозь слой ВТСП. При этом удельные потери энергии на ионизацию ВТСП слоя для ионов, падающих под углами 60 и 90°, почти одинаковые и слабо меняются по толщине слоя, тогда как для меньших углов (20 и 30°) 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.

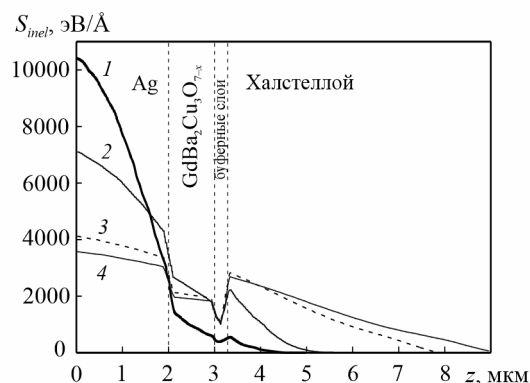


Рис. 2. Зависимость удельных ионизационных потерь энергии S_{inel} от глубины z в $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ для ионов $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) под углами 20° (1), 30° (2), 60° (3) и 90° (4) к поверхности ленты.

Fig. 2. Dependence of specific ionization energy losses S_{inel} on depth z in $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ for $^{132}\text{Xe}^{27+}$ ions (167 MeV) at angles of 20° (1), 30° (2), 60° (3) and 90° (4) to the tape surface.

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.

Из рис. 3 видно, что при всех углах облучения имеется небольшое до примерно 5 % повышение

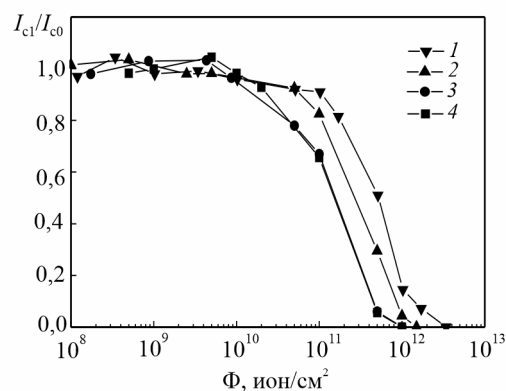


Рис. 3. Зависимость отношения критического тока после облучения I_{c1} при $T = 77$ К и $B = 0$ к исходному значению критического тока I_{c0} от флюенсов облучения ионами ксенона под углами: 1 — 20°, 2 — 30°, 3 — 60°, 4 — 90°.

Fig. 3. Dependence of the ratio of the critical current after irradiation I_{c1} at $T = 77$ К and $B = 0$ to the initial value of the critical current I_{c0} on the xenon ion irradiation fluences at angles of: 1 — 20°, 2 — 30°, 3 — 60°, 4 — 90°.

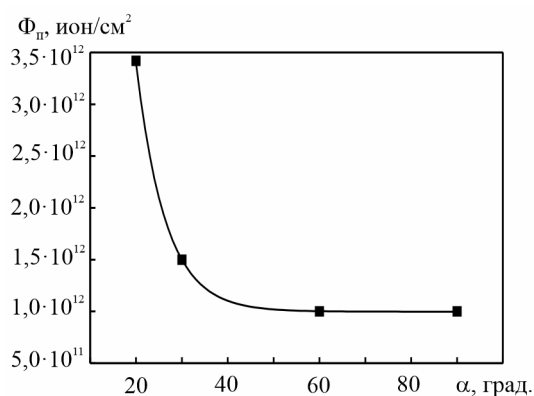


Рис. 4. Зависимость порогового флюенса Φ_{th} от угла облучения α ионами ксенона. Сплошная линия — аппроксимация по формуле (1).

Fig. 4. Dependence of the threshold fluence Φ_{th} on the angle of irradiation α by xenon ions. The solid line is the approximation by formula (1).

критического тока. Максимум критического тока 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 критического тока сдвигается в область меньших флюенсов.

В качестве параметра, определяющего радиационную стойкость ленты, в работе использовали пороговый флюенс Φ_{th} . Прохождение иона через твердое тело сопровождается возникновением областей с локальными фазовыми переходами [22]. С увеличением флюенса облучения происходит рост числа таких областей, что приводит к тому, что ВТСП теряет свои сверхпроводящие свойства, происходит аморфизация. Пороговое значение флюенса, при котором критический ток стремится к нулю, определяет радиационную стойкость. Такой критерий был выбран, потому что он является безусловным, кроме того, относительная погрешность определения значения флюенса облучения уменьшается с увеличением флюенса. Пороговый флюенс зависит от температуры, чем она меньше, тем больше Φ_{th} . В данной работе под Φ_{th} имеется в виду пороговый флюенс при $T = 77$ К.

Реальные сверхпроводящие устройства, разумеется, будут выходить из строя при флюенсах облучения значительно меньших Φ_{th} . Для оценки их работоспособности в условиях облучения будут нужны другие критерии. Однако, зависимость от угла облучения, вероятнее всего, будет похожей и в случае других критериев радиационной стойкости.

Пороговый флюенс определяется из зависимости критического тока от флюенсов. Критерием

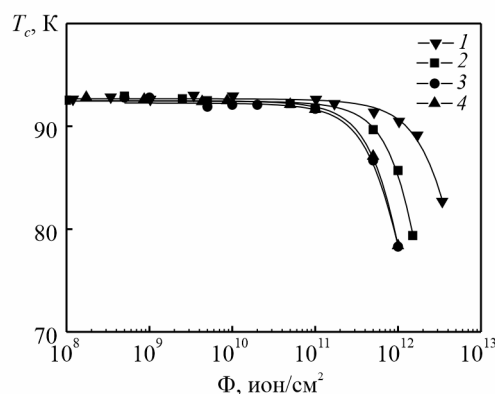


Рис. 5. Зависимость T_c от флюенсов облучения ионами ксенона под углами: 1 — 20°, 2 — 30°, 3 — 60°, 4 — 90°.

Fig. 5. T_c dependence on xenon ion irradiation fluences at angles of: 1 — 20°, 2 — 30°, 3 — 60°, 4 — 90°.

достижения Φ_{th} считалось падение I_c более чем в тысячу раз. Из рис. 3 может быть определена зависимость Φ_{th} от угла облучения. Данная зависимость показана на рис. 4. Из рис. 4 видно, что для углов 20°, 30°, 60° и 90° Φ_{th} 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. Данная зависимость хорошо аппроксимируется следующей формулой:

$$\Phi_{th} = \Phi_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{t}\right), \quad (1)$$

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_{th} — в ион/см².

Зависимость критической температуры от флюенсов облучения ионами ксенона приведена на рис. 5. Из рис. 5 видно, что при всех углах облучения критическая температура ленты начинает заметно уменьшаться при гораздо больших (примерно на порядок) флюенсах, чем критический ток (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 $\alpha = 20^\circ$.

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 критического тока сдвигается в область меньших флюенсов.

Для всех исследованных углов облучения определён пороговый флюенс облучения Φ_{th} , при котором $I_c \rightarrow 0$. Для углов 20° , 30° , 60° и 90° Φ_{th} 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 $\Phi_{th}(\alpha)$ хорошо аппроксимируется формулой

$$\Phi_{th} = \Phi_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{t}\right).$$

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 облучение ионами.

Литература/References

- 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, art. 032018.
- Dezhin D., Ilyasov R., Kozub S., Kovalev K., Verzhbitsky L. Synchronous motor with HTS-2G wires. Journal of Physics: Conference Series, 2014, v. 507, art. 032011.
- 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 Applied Superconductivity, 2022, v. 32, no. 4, art. 5700105.
- Parizh M., Lvovsky Y., Sumption M. Conductors for commercial MRI magnets beyond NbTi: Requirements and challenges. Supercond. Sci. Technol., 2017, v. 30, art. 14007.
- 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, art. 4301705.
- Bruzzone P., Fietz W.H., Minervini J.V., Novikov M., Yanagi N., Zhai Y. and Zheng J. High temperature superconductors for fusion magnets. Nucl. Fusion, 2018, v. 58, art. 103001.
- Карькин А.Е., Гощицкий Б.Н. Особенности электронных состояний соединений с сильными электронными корреляциями: исследование методом радиационного разупорядочения. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2006, т. 37, № 6, с. 1533 – 1591.
- Karkin A.E., Goshchitskii B.N. Features of electron states of compounds with strong electron correlations probed by radiation-induced disorder. Physics of Particles and Nuclei, 2006, v. 37, pp. 807 – 836.
- Parkin Don M. Radiation effects in high-temperature superconductors: A brief review. Metallurgical Transactions A, 1990, v. 21, pp. 1015 – 1 019.
- Лифшиц И.М. О температурных вспышках в среде, подверженной действию ядерного излучения. Доклады Академии Наук, 1956, т. 109, № 6, с. 1109 – 1111.
- Lifshits I.M. O temperaturnykh vspyshkakh v srede, podverzhenoj deystviyu yadernogo izlucheniya. On temperature flashes in an environment exposed to nuclear radiation] Doklady Akademii Nauk [Doklady Physics], 1956, v. 109, no. 6, pp. 1109 – 1111.
- Mezzetti E., Gerbaldo R., Ghigo G., Gozzelino L., Minetti B. Enhanced critical current density in melt textured YBCO via Au ion surface irradiation. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, v. 7, no. 2, pp. 1993 – 1996.
- Matsushita T., Isobe G., Kimura K., Kiuchi M., Okayasu S. and Prusseit W. The effect of heavy ion irradiation on the critical current density in DyBCO coated conductors. Supercond. Sci. Technol., 2008, v. 21, art. 054014.
- Arpna Kujur, Viswakarma P.N., Alok Banerjee, Kanjilal D. and Behera D. The effect of swift heavy ion irradiation on critical current density in YBa₂Cu₃O_{7-δ} thick film with Y₂O₃ addition. Radiation Effects and Defects in Solids, 2011, v. 166, nos. 8 – 9, pp. 635 – 639.
- Matsui H., Ogiso H., Yamasaki H., Kumagai T., Sohma M., Yamaguchi I., and Manabe T. 4-fold enhancement in the critical current density of YBa₂Cu₃O₇ films by practical ion irradiation. Appl. Phys. Lett., 2012, v. 101, art. 232601.
- Gapud A.A., Greenwood N.T., Alexander J.A., Khan A., Leonard K.J., Aytug T., List F.A., Rupich M.W., Zhang Y. Irradiation response of commercial, high-Tc superconducting tapes: Electromagnetic transport properties. Journal of Nuclear Materials, 2015, v. 462, pp. 108 – 113.
- Yu Gu, Chuanbing Cai, Zhiyong Liu, Jie Liu, Li Liu and Rongtie Huang. Effect of Ta irradiation on microstructure and current carrying properties of YBCO

- coated conductors with element doping. J. Appl. Phys., 2021, v. 130, art. 085304.
16. 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 флуенсов при облучении тяжелыми ионами и электронами высоких энергий. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, № 5, с. 84 – 91.
 - Antonova L.Kh., Belov A.G., Voronova V.V., Didyk A.Yu., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Mal'ginov V.A., Mikhailova G.N., Troitskii A.V. Dependences of HTS tape critical parameters on fluencies under irradiation with heavy ions and high energy electrons. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2011, v. 5, no. 3, pp. 484 – 491.
 17. Mikhailova G.N., Antonova L.Kh., Troitskii A.V., Didyk A.Yu., Mal'ginov V.A., Demikhov T.E., Suvorova 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, pp. 677 – 680.
 18. 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 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ HTS-2G Due to Swift-Ion Irradiation. Physica Status Solidi B, 2019, v. 256, art. 1800255.
 19. 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, art. 135363.
 20. 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, art. 04402.
 21. 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, no 1 – 2, pp. 257 – 269, <http://www.srim.org>.
 22. Дидык А.Ю., Семина В.К., Хофман А., Михайлова Г.Н., Троицкий А.В., Антонова Л.Х. Термические процессы в многослойных ВТСП второго поколения при облучении тяжелыми ионами высоких энергий. Письма в ЭЧАЯ, 2013, т. 10, № 5(182), с. 739 – 744.
 - Didyk A.Yu., Semina V.K., Hofman A., Mikhailova G.N., Troitskij A.V., Antonova L.Kh. Thermal processes in multilayer second-generation HTSC under swift heavy-ion irradiation. Physics of particles and nuclei letters, 2013, v. 10, no. 5, pp. 453 – 456.

Статья поступила в редакцию — 31.03.2023 г.
 после доработки — 27.04.2023 г.
 принята к публикации — 28.04.2023 г.

Антонова Ландыш Халяфовна — ФГБУН Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук (125190 Москва, ул. Усиевича, 20); Московский политехнический университет (107023 Москва, ул. Большая Семеновская, 38), кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Математика, специалист в области физики полупроводников, сверхпроводимости, радиационных дефектов. E-mail: lpa117@gmail.com.

Семина Вера Кирилловна — Объединенный институт ядерных исследований (Дубна 141980, ул. Жолио-Кюри, 6), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: semina@jinr.ru.

Троицкий Алексей Владимирович — ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, (Москва, 119991 ул. Вавилова 38), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости, радиационных дефектов. E-mail: at@kapella.gpi.ru.

Effect of irradiation with $^{132}\text{Xe}^{27+}$ ions at different angles on the critical parameters of second generation HTSC tapes based on $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

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

The effect of irradiation with $^{132}\text{Xe}^{27+}$ ions (167 MeV) at angles of 20°, 30°, 60°, and 90° to the tape surface on the critical parameters of second-generation superconducting tapes based on the SuperOx $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ compound has been studied. The dependences of the critical current (I_c) at $T = 77$ K in the intrinsic magnetic field and the critical temperature (T_c) on the ion irradiation fluences at different irradiation angles are obtained. At all studied irradiation angles, a small (up to ~ 5 %) increase in the critical current of HTSC tapes is observed in the fluence range from $3.4 \cdot 10^8$ to $5 \cdot 10^9$ ion/cm². The radiation resistance of a superconductor to ion irradiation is determined as a function of the irradiation angle. To determine the radiation resistance of the tape, the threshold irradiation fluence Φ_{th} was measured, at which the critical current tends to zero. The dependence of Φ_{th} on the irradiation angle α is well approximated by the formula: $\Phi_{th} = \Phi_0 + A \cdot \exp(-\alpha t)$.

Keywords: second generation superconducting tapes, xenon ions, critical current, critical temperature, radiation resistance.

***Antonova Landysh** — All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (123190 Moscow, Usievicha str. 20); Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, Bolshaya Semyonovskaya street, 38), associated professor of the department of Mathematics, scientific area of studies are in the field of semiconductor structures, high-temperature superconductivity, radiation defects in solid. E-mail: lpaa117@gmail.com.*

***Semina Vera** — Joint Institute for Nuclear Research, (Dubna, 141980, str. Joliot-Curie, 6) PhD, researcher; specialist in the field of radiation materials science. E-mail: semina@jinr.ru.*

***Troitskii Alexey** — Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow 119991, Vavilov Str. 38), PhD, senior researcher; specialist in the field of low temperature physics, superconductivity, radiation defects. E-mail: at@kapella.gpi.ru.*