ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Xe С ЭНЕРГИЕЙ 167 МЭВ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

П.Н. Дегтяренко[1), 4)], В.А. Скуратов[2)], А.В. Овчаров[3)], А.М. Петржик[4)], В.К. Семина[2)], С.Ю. Гаврилкин[5)], М.С. Новиков[2)], А.Ю. Малявина[6)]
[1)]*Объединенный институт высоких температур РАН, ул. Ижорская 13, стр.2, Москва 125412, Россия, degtyarenkopn@gmail.com*
[2)]*Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, Дубна 141980, Московская область, Россия, skuratov@jinr.ru, msnovikov@jinr.ru*
[3)]*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовская пл. 1, Москва 123182, Россия, ovcharov.91@gmail.com*
[4)]*ООО «С-Инновации», Научный проезд 20, стр.2, Москва 117246, Россия, a.petrzhik@s-innovations.ru*
[5)]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский пр. 53, Москва 119991, Россия, gavrs@sci.lebedev.ru*
[6)]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское шоссе 31, Москва 115409, Россия, ayu.malyavina@gmail.com*

Проведено исследование влияния облучения на сверхпроводящие свойства коммерческих ВТСП лент 2-го поколения на основе YBCO производства компании «С-Инновации». Образцы ВТСП лент 2-го поколения с серебряным покрытием облучали при комнатной температуре сканированием пучка ионов Xe с энергией 167 МэВ на ускорителе ИЦ-100 ФЛЯР ОИЯИ. Петли магнитного гистерезиса и кривые магнитной восприимчивости были измерены на установке PPMS в диапазоне магнитных полей от 0 до 9 Тл и в диапазоне температур от 4,2 до 77К в исходных и облученных образцах. Отчетливо наблюдается увеличение критического тока при 77, 65 и 20К с увеличением плотности потока энергии и снижение его анизотропии при увеличении внешнего магнитного во всем диапазоне температур.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник; критический ток; деградация критической температуры; облучение ионами.

THE INFLUENCE OF 167 MEV Xe ION IRRADIATION ON THE SUPERCONDUCTING PROPERTIES OF 2G HTS

P.N. Degtyarenko[1), 4)], V.A. Skuratov[2)], A.V. Ovcharov[3)], A.M. Petrzhik[4)], V.K. Semina[2)], S.Y. Gavrilkin[5)], M.S. Novikov[2)], A.Y. Maliavina[6)]
[1)]*Joint institute for high temperature of RAS, 125412 Moscow, Russia, degtyarenkopn@gmail.com*
[2)]*Joint institute for nuclear research, 141980 Dubna, Russia, skuratov@jinr.ru, msnovikov@jinr.ru*
[3)]*National research center "Kurchatov institute", Moscow, Russia, ovcharov.91@gmail.com*
[4)]*LLC S-Innovations, Moscow, Russia, a.petrzhik@s-innovations.ru*
[5)]*P.N. Lebedev Physical institute of RAS, Moscow, Russia, gavrs@sci.lebedev.ru*
[6)]*National research nuclear university "MEPhI", Moscow, Russia, ayu.malyavina@gmail.com*

The influence of Xe irradiation on the superconducting properties of commercial 2G HTS tapes produced by S-Innovations was studied. Samples of silver-coated 2G HTS tapes were irradiated at room temperature by scanning of 167 MeV Xe-ion beam at IC-100 FLNR JINR cyclotron. The magnetic hysteresis loops and magnet susceptibility curves were measured on the PPMS in the range of magnetic fields from 0 to 9 Tesla and in the temperature range from 4.2 to 77 K in the pristine and irradiated samples. The increase of the critical current at 77, 65 and 20 K with the energy flux density increasing and its anisotropy decreasing with the increase of the external magnetic field were clearly observed in all temperature range.

***Keywords*:** high-temperature superconductors; critical current; critical temperature degradation; irradiation.

Введение

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) ленты 2-го поколения используются для создания сверхпроводящих магнитных систем (СМС) установок термоядерного синтеза, ускорительной техники и др. [1]. В процессе работы в данном типе установок ВТСП ленты 2-го поколения будут подвергаться радиационному воздействию ионов, протонов, электронов и нейтронов [2]. В этой связи подробное исследование влияния облучения на сверхпроводящие свойства ВТСП лент 2-го поколения вызывает повышенный интерес. С другой стороны, облучение является эффективным инструментом для создания дефектов структуры, которые выступают в роли центров закрепления вихревой решетки, позволяя значительно повысить токонесущую способность; с его помощью которого можно более подробно исследовать механизм пиннинга.

В данной работе подробно исследованы влияние облучения ионами Xe с энергией 167 МэВ и флюенсами до $100\cdot10^{10}$ см$^{-2}$ на изменение критического тока и критической температуры ВТСП лент 2-го поколения. Обсуждается возможность изменений пиннинга вихревой структуры в результате облучения.

Результаты и их обсуждение

Объектом исследований являлись ВТСП ленты 2-го поколения, покрытые серебром. Схематическое изображение структуры ВТСП ленты 2-го поколения представлено на рисунке 1. Подробно технология производства этих материалов представлена в работе [3]. Облучение проводилось при комнатной температуре потоком ионов Xe порядка $2\cdot10^{8}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$ на циклотроне ИЦ-100 в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Флюенсы высокоэнергетических ионов Xe находились в интервале от 3 до $100\cdot10^{10}$ см$^{-2}$.

Измерения критического тока в приложенном перпендикулярно плоской поверхности ленты (вдоль оси *c* YBCO) магнитном поле с индукцией до 8 Тл и при температурах 77 и 65K были выполнены с использованием установки PPMS, Quantum Design. Критический ток I_c определяли с помощью петель гистерезиса с применением модифицированной модели Бина, учитывающей анизотропию критического тока в YBCO [4]. Температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c оценивали из температурной зависимости динамической магнитной восприимчивости (см. рис. 2). Отчетливо видно, что в результате облучения при флюенсе $30\cdot10^{10}$ см$^{-2}$ температура сверхпроводящего перехода начинает деградировать.

Рис. 1 Схематическое изображение структуры ВТСП ленты 2-го поколения

На рис. 3 приведены зависимости нормированного значения критического тока от флюенса ионов Xe при температурах 77 и 65K. Отчетливо видно, что максимум критического тока достигается при флюенсе $30\cdot10^{10}$ см$^{-2}$, что свидетельствует

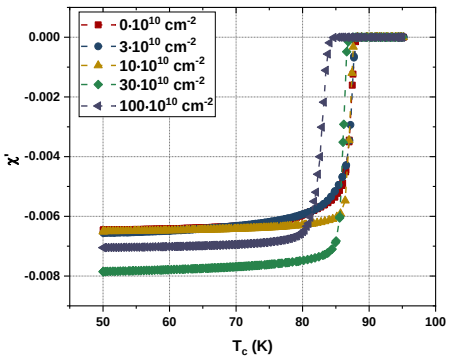

Рис. 2. Температурная зависимость динамической магнитной восприимчивости для исходного и облученных ионами Xe образцов ВТСП лент 2-го поколения

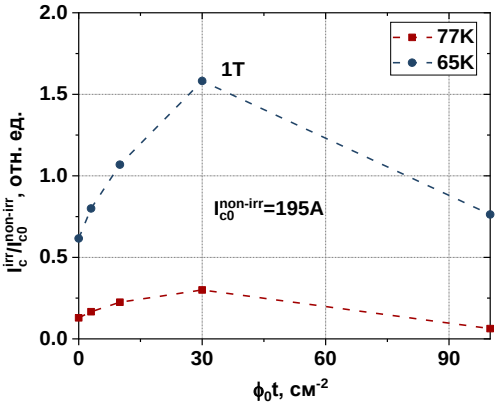

Рис. 3. Зависимость нормированного значения критического тока от флюенса ионов Xe энергией 167 МэВ

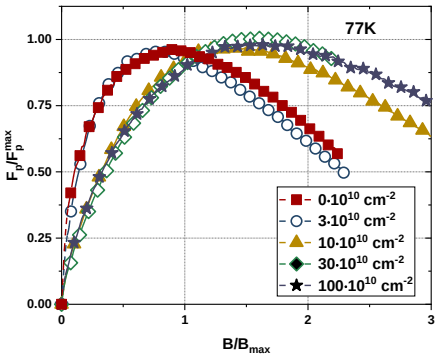

Рис. 4. Зависимость нормированной силы пиннинга от нормированного значения внешнего магнитного поля

об образовании ионных треков, являющихся эффективными центрами пиннинга. Это подтверждается как результатами предыдущей работы [5], так и построенной зависимостью полевой зависимости силы пиннинга при температуре 77К (см. рис. 4). Наблюдается смещение пика нормированной силы пиннинга в область более высоких магнитных полей, что свидетельствует об изменении типа пиннинга вихревой решетки [6].

Заключение

Проведены систематические исследования токонесущей способности ВТСП лент 2-го поколения до и после облучения ионами Xe с энергией 167 МэВ. Установлено оптимальное значение флюенса - $30\cdot10^{10}$ см$^{-2}$, при котором наблюдается максимум критического тока. При этом температура сверхпроводящего перехода начинает деградировать. Анализ результатов силы пиннинга свидетельствует об изменении типа пиннинга вихревой решётки. Полученные результаты будут использованы для создания ВТСП лент 2-го поколения с большей токонесущей способностью.

Библиографические ссылки

1. Walter H. Fietz, Christian Barth, Sandra Drotziger, Wilfried Goldacker, et al. Prospects of High Temperature Superconductors for fusion magnets and power applications. *Fus. Eng. Des.* 2013; (88): 440-445.
2. Yi Zhang, Rupich M. W., Solovyov V., Qiang Li and Goyal A. Dynamic behavior of reversible oxygen migration in irradiated-annealed high temperature superconducting wires. *Sci. Rep.* 2020; (25): 1614.
3. Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A. et al. Development and large volume production of extremely high current density $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting wires for fusion *Sci Rep* 2021; (11): 2084.
4. Gyorgy E.M., van Dover R.B., Jackson, K.A., Schneemeyer L.F., Waszczak J.V. Anisotropic critical currents in $Ba_2YCu_3O_7$ analyzed using an extended Bean model. *Appl. Phys. Lett.* 1989; (55): 283.
5. Suvorova E.I., Degtyarenko P.N., Karateev I.A. et al. Energy dependent structure of Xe ion tracks in YBCO and the effect on the superconductive properties in magnetic fields. *Appl. Phys.* 2019; (126): 145106.
6. Dew-Hughes D. Flux pinning mechanisms in type II superconductors *Phylos. Mag.* 1974; (30): 2.