

06

Влияние облучения быстрыми протонами с энергией 32 MeV на критические параметры современных композиционных проводов на основе сверхпроводящего соединения Nb₃Sn

© П.Н. Дегтяренко^{1,5}, А. Ballarino², L. Bottura², С.Ю. Гаврилкин³,
R. Flükiger², В.С. Круглов^{1,4}, С.Т. Латушкин¹, А.И. Рязанов^{1,4},
С. Scheuerlein², Е. Семенов¹, С.В. Шавкин¹, Т. Spina²,
В.Н. Унежев¹

¹ НИЦ „Курчатовский институт“, Москва, Россия

² ЦЕРН, CH-1211 Женева 23, Швейцария

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

⁵ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: degtyarenkopn@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 сентября 2016 г.

Методами вибрационной магнитометрии проведены исследования изменений электрофизических характеристик нескольких типов современных коммерческих многожильных композиционных проводов на основе сверхпроводящего соединения Nb₃Sn при температурах 4,2, 7 и 12 К в магнитных полях до 8 Т до и после облучения на циклотроне НИЦ КИ быстрыми протонами с энергией 32 MeV и флюенсами облучения $\phi t = 3 \cdot 10^{16}$, $1 \cdot 10^{17}$, $3 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Для всех образцов при флюенсах облучения до $\phi t = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ отмечен рост критической плотности тока, наиболее резко выраженный в сильных магнитных полях и при низких температурах; при флюенсе облучения $\phi t = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ наблюдается падение критической плотности тока до уровня меньше исходного. Критическая температура образцов монотонно уменьшается с ростом флюенса облучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.12.44710.16495

В процессе эксплуатации сверхпроводящих магнитных систем в объектах ускорительной техники и в термоядерных установках ком-

позиционные провода на основе Nb_3Sn подвергаются радиационному воздействию различных высокоэнергичных частиц [1]. Для оценки ресурса работы магнитной системы после набора высоких доз облучения необходимы исследования не только „чистого“ материала Nb_3Sn , но и образцов реальных сверхпроводящих проводов, поскольку влияющие на электрофизические характеристики вторичные эффекты, связанные с облучением быстрыми частицами (например, изменение напряженного состояния в соединении Nb_3Sn , вызванное радиационным перемешиванием различных фаз материалов матрицы и сверхпроводника), могут сильно зависеть от архитектуры провода и быть также весьма существенными. В настоящей работе представлены результаты исследований влияния облучения быстрыми протонами с энергией 32 MeV и флюенсами облучения $\phi t = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ на изменения электрофизических характеристик 4 типов композиционных коммерческих проводов.

Для экспериментальных исследований были отобраны образцы коммерческих проводов на основе Nb_3Sn диаметром от 0.7 до 1 mm, содержащие от 54 до 245 сверхпроводящих жил, производства компаний Bruker (провод #0802), OxfordInstruments (#7419 и #11976) и Alstom (#63468) [2,3]. Из термообработанных проводов вырезались по 5 образцов длиной около 3 mm для последующего облучения (каждый образец до своей дозы, включая контрольный необлученный образец).

Облучение образцов проводилось быстрыми протонами на изохронном циклотроне НИЦ „Курчатовский институт“. Энергия протонов составляла около 32 MeV при токе пучка до $10 \mu A$, образцы облучались флюенсом до $\phi t = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. При облучении образцы охлаждались проточной водой, поэтому температура образцов не превышала $100^\circ C$. После облучения образцы выдерживались до нескольких месяцев для снижения наведенной активности до безопасного уровня.

Определение критической плотности тока образцов провода при температурах 4.2, 7 и 12 K в полях до 8 T проводилось по гистерезисным кривым намагничивания, полученным на вибрационном магнетометре установки PPMS при скорости развертки магнитного поля $10 \text{ mT} \cdot \text{s}^{-1}$. Использовалась модель пересчета величины магнитного момента многожильных проводов в плотность тока, предложенная в [4]. Критическая температура образцов оценивалась по температурной зависимости остаточного магнитного момента.

Установлено, что для всех исследованных образцов облучение протонами приводит вначале к росту критической плотности тока,

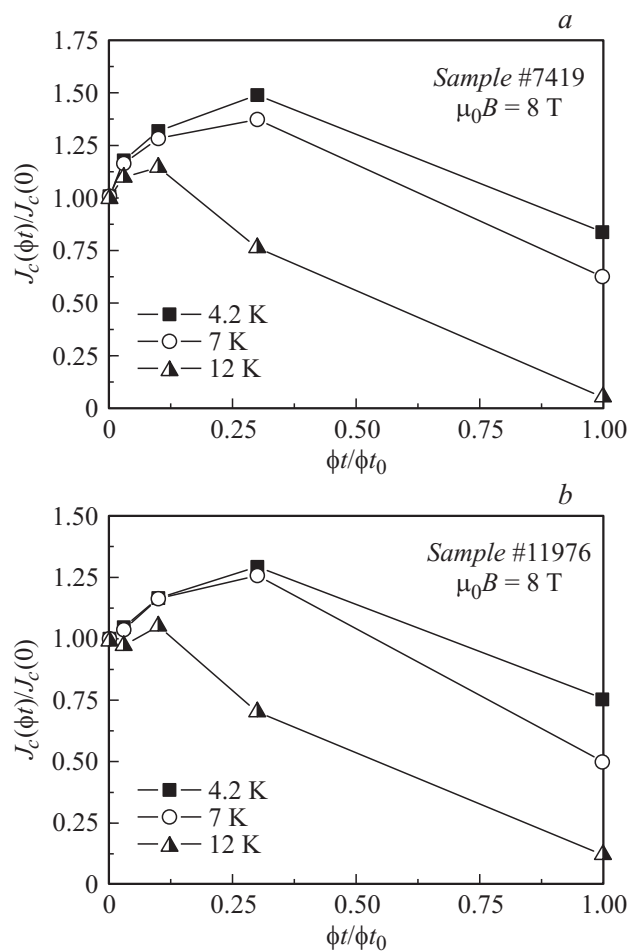


Рис. 1. Зависимость нормированной плотности критического тока образцов сверхпроводящих проводов # 7419 (a), #11976 (b), #0802 (c), #63468 (d) от нормированного значения флюенса быстрых протонов на величину $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ при различных температурах в магнитных полях до 8 Т (a, b) и до 6 Т (c, d).

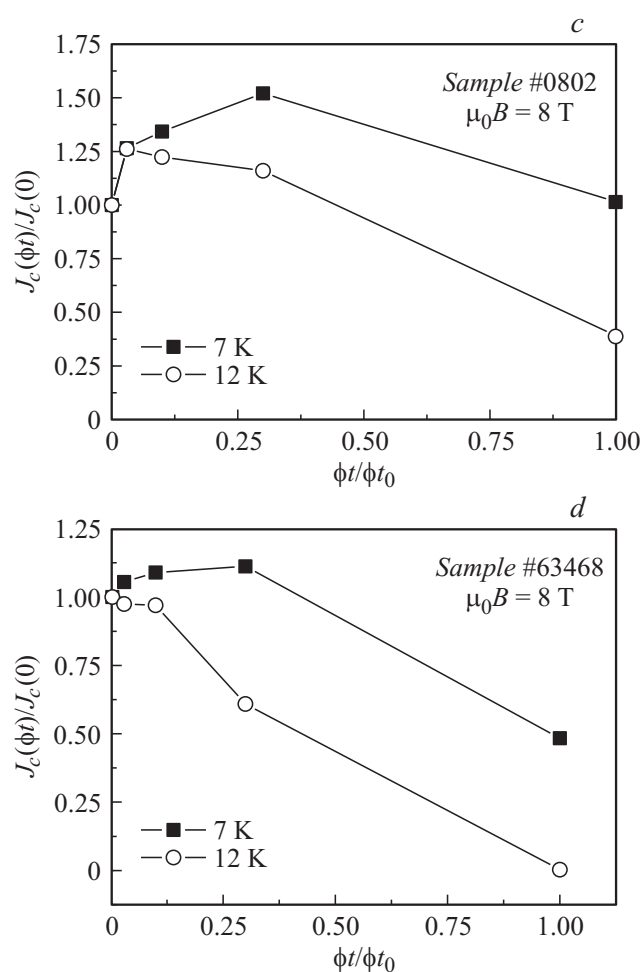


Рис. 1 (продолжение).

нормированной на исходное значение для необлученного образца (рис. 1) [5]. Из рисунков видно, что критическая плотность тока возрастает примерно в полтора раза. При этом максимум плотности критического тока приходится на флюенс облучения $\phi t = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

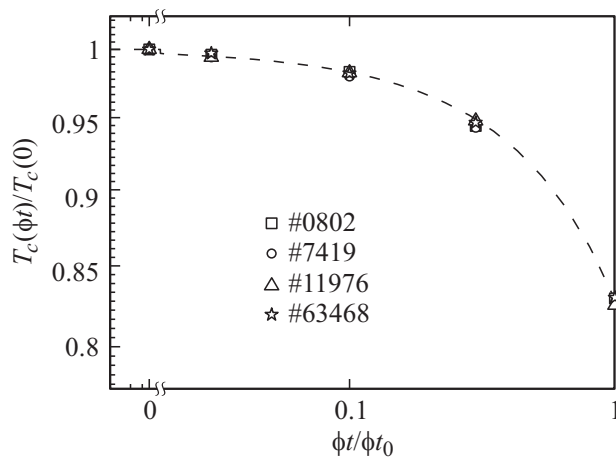


Рис. 2. Зависимость нормированной критической температуры сверхпроводящего перехода образцов сверхпроводящих проводов Nb_3Sn от нормированного значения флюенса быстрых протонов на величину $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$.

при температурах 4.2 и 7 К. Для температуры 12 К максимум приходится на флюенс облучения $\phi t = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Дальнейшее облучение приводит к уменьшению плотности критического тока, и при флюенсе облучения $\phi t = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ величина критической плотности тока всех образцов снижалась до уровня ниже исходной. По-видимому, при больших дозах облучения падение критического тока уже обусловлено деградацией критической температуры, вызванной радиационно-стимулированным разупорядочением материала. Отметим также, что в области возрастания плотности критического тока падение критической температуры незначительно (менее $0.95T_{c0}$).

Зависимости нормированного значения критической температуры сверхпроводящего перехода, представленные на рис. 2, показывают монотонное уменьшение T_c при увеличении флюенса для всех типов образцов. Отмечена зависимость критической температуры от дозы облучения $T_c \approx T_{c0}(1 - \kappa(\phi t))$ ($\kappa \approx 0.17 \cdot 10^{-18}$), где T_{c0} — критическая температура необлученного образца. В нашем случае это температура $T_c(0) = 17.9 \text{ K}$ для образца Bruker (провод #0802), $T_c(0) = 17.6 \text{ K}$ и $T_c(0) = 17.1 \text{ K}$ для образцов Oxford Instruments (#7419 и #11976).

и $T_c(0) = 16.8$ К для образца Alstom (#63468), что соответствует значению нормированной температуры, равному единице (рис. 2), и хорошо согласуется с данными работы [6]. По всей видимости, одним из наиболее вероятных объяснений такой зависимости может являться размытие пика плотности электронных состояний в облучаемом материале в результате радиационно-стимулированного образования радиационных дефектов замещения [7].

Таким образом, были проведены систематические исследования изменения критических параметров коммерческих сверхпроводящих многожильных проводов на основе соединения Nb_3Sn под воздействием облучения быстрыми протонами с энергией 32 MeV с флюенсами до $\phi t = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре. Был обнаружен рост критической плотности тока при небольших флюенсах облучения. Критическая плотность тока достигает максимума при флюенсе облучения $\phi t = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в области низких магнитных полей (до 3 Т включительно), а при флюенсе облучения $\phi t = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ — в области сильных магнитных полей (более 3 Т). После достижения максимума происходит уменьшение плотности критического тока, которая снижается для всех образцов ниже исходной при флюенсе облучения $\phi t = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. По всей видимости, одним из объяснений такого поведения плотности критического тока может быть изменение механизма пиннинга за счет образования радиационных дефектов. Плотность критического тока возрастает примерно в полтора раза и происходит в области флюенсов, при которых критическая температура практически не меняется, что указывает на различный тип радиационных дефектов, влияющих на эти величины. Критическая температура сверхпроводящего перехода деградирует с ростом флюенса быстрых протонов, что может свидетельствовать о снижении электронной плотности состояний вблизи поверхности Ферми. Эти результаты хорошо согласуются и дополняют результаты работ по облучению протонами с энергиями 65 MeV и 24 GeV [5] и в дальнейшем будут использованы для расчета радиационного ресурса сверхпроводящих магнитных систем ускорительной техники и будущих термоядерных реакторов.

Выражаем глубокую признательность руководству НИЦ „Курчатовский институт“ за всестороннюю поддержку. Магнитные измерения были выполнены в Центре коллективного пользования ФИАН.

Список литературы

- [1] *Weber H.W.* // Int. J. Modern Phys. 2011. V. E20. P. 1–47.
- [2] *Parrell J.A.* et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17. N 2. P. 2560–2563.
- [3] *Bordini B.* et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22. N 3. P. 6000304.
- [4] *Baumgartner T.* et al. // Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22. P. 6000604.
- [5] *Spina T.* et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25. N 3. P. 600505.
- [6] *Baumgartner T.* et al. // Supercond. Sci. Technol. 2014. V. 27. N 1. P. 015005.
- [7] *Александров А.С.* и др. // ФТТ. 1979. Т. 21. N 7. С. 2062–2072.