

P8-2001-27

И.Н.Гончаров*

О ПОВЫШЕНИИ J_c В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
СВЕРХПРОВОДНИКАХ, ДОПИРОВАННЫХ ^{238}U ,
ЗА СЧЕТ ТРЕКОВ ОТ ОСКОЛКОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ
ЕГО ЯДЕР

Направлено на 4-й международный уральский семинар
«Радиационная физика металлов и сплавов»,
Снежинск, 25 февраля – 3 марта 2001 г.

*E-mail: ingonch@sunhe.jinr.ru

1. Во многих странах мира стремятся создать длинномерные токонесущие элементы на основе ВТСП, обладающие достаточно высокой критической плотностью тока (J_c) при температурах жидкого азота, так как стоимость их поддержания примерно в 20 раз меньше стоимости поддержания гелиевых температур. До настоящего времени промышленная технология изготовления таких элементов длиной 1000 м и более освоена только для системы на основе Bi (преимущественно для $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$, имеющей $T_c \sim 110$ К) в матрице из серебра (лента Bi-2223/Ag). Однако при температурах $62 \div 77$ К в магнитных полях $>(0,2 \div 0,5)$ Тл J_c таких лент оказываются намного меньше значений, приемлемых для практического использования. К тому же в них велика анизотропия критического тока относительно угла между направлением \vec{B} и плоскостью ленты ($J_{c \parallel} / J_{c \perp} > 3,5$ для $B > 0,2$ Тл), что может создавать дополнительные трудности их применения в некоторых магнитных системах.

Оба эти недостатка могут быть в значительной степени уменьшены за счет создания в ВТСП достаточного количества треков тяжелых ионов, имеющих линейные потери энергии $dE/dx > (5 \div 10)$ кэВ/нм (см., например, обзоры [1,2]). Такие треки могут быть созданы не только при облучении на пучках ускорителей, но и при образовании осколков деления ядер в ВТСП, вызванного облучением подходящими частицами. В последнем случае длины эффективной части трека составляют $4 \div 7$ мкм, а поперечные размеры аморфной несверхпроводящей области $\approx (2 \div 8)$ нм.

Наиболее приемлемым представлялся метод введения в ВТСП некоторого количества урана-235 с последующим облучением тепловыми нейтронами из реактора. В работах [3-7] этот метод был успешно применен для повышения J_c в YBCO, а в работах [8,9] - в Bi-2223/Ag. В

последнем случае оказалось, что без заметной деградации исходной величины J_c допустимо вводить в ВТСП не более ~0,6 вес.% урана [9]. Заметим, что облученная потоком тепловых и быстрых нейтронов (в соотношении ~1:1) лента (Bi-2223+0,3 % ^{235}U)/Ag через месяц выдержки имела следующее соотношение уровней радиоактивности: от Ag ~ 99 %, от Bi-2223 ~ 0,8 % и от осколков деления ~ 0,2 % [8]. Чтобы уменьшить необходимый флюенс нейтронов и, следовательно, уровень наведенной радиоактивности, который оказывается весьма высоким из-за образования изотопа $^{110\text{m}}\text{Ag}$ с периодом полураспада ~250 сут (см. примеры в работе [10]), надо применять уран с достаточно высокой степенью обогащения ураном-235. Это, в свою очередь, приводит, во-первых, к заметному возрастанию стоимости ленты (не считая дополнительной стоимости облучения), Во-вторых, работа с обогащенным ураном сильно усложняет производство ленты.

В работе [11] была сделана попытка решить указанные проблемы следующим образом. Во-первых, допировать в ВТСП небогатый уран (в том числе более дешевый обедненный). Во-вторых, для деления ядер урана-238 использовать быстрые нейтроны ($E_n > 1,4$ МэВ), для которых растущее сечение деления $\sigma_n > 0,5$ барн (10^{-24} см²). Можно было надеяться также, что при облучении быстрыми нейтронами (с $E_n > 0,1$ МэВ) могут образовываться дополнительно квазисферические дефекты каскадного происхождения, как это наблюдалось для YBCO (см., например, [12]). В-третьих, использовать поток с предельно низкой примесью медленных нейтронов, вызывающих в основном активацию ^{109}Ag . Первые, казавшиеся обнадеживающими результаты для ленты (Bi_{1,8}Pb_{0,4}Sr₂Ca_{2,2}Cu₃O_x+0,8 вес.% ^{238}U)/Ag были представлены в докладе [11] для самого низкого флюенса нейтронов. Однако после -

дующие облучения с более высокими флюенсами показали¹, что наблюдается прогрессирующая деградация J_c и T_c ленты. Таким образом, этот метод оказался неприемлемым, хотя и позволял существенно снизить уровень наведенной радиоактивности изотопа ^{110m}Ag .²

В настоящей работе описывается метод, впервые предложенный автором в докладе [10], при использовании которого фотоделение ядер ^{238}U вызывается гамма-квантами с энергией $6 < E_\gamma < 20$ МэВ без образования изотопа ^{110m}Ag .

2. Фотоделение ^{238}U в области энергий гигантского дипольного резонанса происходит в соответствии с кривой $\sigma_\gamma(E_\gamma)$, которая имеет колоколообразный вид с $\sigma_\gamma^{\max}(14 \text{ МэВ}) = 0,11$ барн и шириной ~ 6 МэВ на половине высоты (см., например, [13])³. При этом одновременное облучение γ -квантами серебряной матрицы и Vi-2223 не приводит к образованию "опасного" долгоживущего изотопа ^{110m}Ag (как при облучении тепловыми нейтронами).

Для данной работы были взяты 61-жильные ленточные образцы Vi-Pb-Sr-Ca-Cu-O , содержащие $\sim 0,8$ вес.% ^{238}U (по отношению к ВТСП), изготовление которых было подробно описано в работе [11]. Облучение проводилось γ -квантами с максимальной энергией тормозного спектра

¹ Детально эти результаты будут опубликованы в отдельной работе.

² В этих экспериментах соотношение быстрых и медленных нейтронов было $\sim 5000:1$. Последние главным образом активируют изотоп ^{109}Ag , содержащийся в природной смеси в количестве 49 %. Так как $\sigma_{\text{пл}}(^{235}\text{U})/\sigma_{\text{пл}}(^{238}\text{U}) \sim 10^3$, то для получения одинаковой плотности делений в 1 см^3 результирующее уменьшение уровня радиоактивности составило ~ 5 раз.

³ Заметим, что для ^{238}U $\sigma_\gamma(14 \text{ МэВ}) \approx 0,16$ барн, так что использование этого изотопа урана не дает больших преимуществ, хотя и является желательным.

~ 24 МэВ.⁴ После первой дозы облучения средняя плотность актов деления ядер ^{238}U в ВТСП составляла $\langle n_f \rangle \approx 0,012 \cdot 10^{14}$ делений/см³.

Экспериментальное значение оптимальной величины $\langle n_f^{\text{optim}} \rangle$, которой отвечает максимальный рост $J_c(B, T)$, в нашем случае пока неизвестно. По некоторым оценкам, для Bi-2223/Ag ленты (при $T = 62 \div 77$ К, $B \approx 1$ Тл) $\langle n_f^{\text{optim}} \rangle \sim 10^{14}$ делений/см³. После набора второй дозы возникло, по видимому, не более 3 % от $\langle n_f^{\text{optim}} \rangle$. Измерения на двух парах образцов (исходных и облученных) при 77 К показали, что в диапазоне магнитных полей от 0,01 до 2 Тл транспортный критический ток возрос соответственно на $40 \div 60$ %. Можно ожидать, что после набора хотя бы 30 % от $\langle n_f^{\text{optim}} \rangle$ величина $J_c(62 \div 77$ К) может возрасти еще более заметно (особенно в области $B > (0,5 \div 1)$ Тл). Одновременно с этим должна уменьшиться анизотропия J_c [9]. Оба этих обстоятельства чрезвычайно важны для создания сверхпроводящих магнитных систем, работающих при температурах жидкого азота (в том числе таких, у которых магнитное поле формируется железом, как в современном ускорителе ОИЯИ- нуклотроне [14]).

Временной характер спада уровня наведенной радиоактивности после набора первой дозы измерялся в течение 19 месяцев с помощью цифрового дозиметра "Аргус". При расположении облученного образца длиной 1 см вплотную к открытому окну дозиметра спустя 3, 6 и 9 месяцев после облучения мощности дозы были (за вычетом фона) соответственно 0,15, 0,03 и 0,007 мР/ч.⁵ После ~ 10 месяцев характер спада изменился и

⁴ Детали постановки эксперимента, определение плотности делений ядер урана и результаты измерений $J_c(T, B)$ после набора нескольких доз облучения будут опубликованы в отдельной работе.

⁵ Заметим, что естественный фон в Московской области составляет $(0,01 \div 0,02)$ мР/ч, а допустимая мощность дозы общего облучения для персонала составляет 2,7 мбэр/ч (при шестичасовом рабочем дне).

составлял $\sim 0,001$ мР/ч за каждые последующие три месяца. Специальные измерения показали, что для расчета мощности дозы на расстояниях 10 и 20 см от окна дозиметра надо приведенные значения разделить на 32 и 190 соответственно. Из измерений следует, что доминирующим γ -излучателем из ленты является изотоп ^{105}Ag с $T_{1/2} \sim 41,3$ сут.

Данные, приведенные выше, указывают на то, что даже при дозах облучения гамма-квантами, соответствующих достижению $\sim 0,5 \langle n_f^{\text{optim}} \rangle$, выдержка после облучения в течение необходимого количества месяцев делает работу с такой лентой достаточно безопасной (не говоря уже об эксплуатации готовых устройств). В этом отношении отличие от ситуации после облучения тепловыми нейтронами [8-10] очень велико.

3. В заключение отметим, что предложенный автором в работе [10] метод уменьшения анизотропии и повышения J_c сверхпроводящей ленты ($\text{Bi-2223} + ^{238}\text{U}$)/Ag за счет фотоделения ядер урана гамма-квантами с энергией $10 \div 20$ МэВ имеет определенные преимущества перед другими аналогичными методами:

а) главное – через несколько месяцев выдержки облученная лента практически не имеет заметного уровня радиоактивности (в отличие от облучения реакторными нейтронами, при котором образуется в больших количествах долгоживущий изотоп $^{110\text{m}}\text{Ag}$ с $T_{1/2} \sim 250$ сут);

б) стоимость облучения не слишком высока из-за относительно небольшой энергии E_γ , особенно если эффективно использовать попутное облучение (либо позади основного облучаемого объекта, либо периферийной частью расходящегося пучка тормозных гамма-квантов).

Если при этом учесть, что существуют технические решения, позволяющие многократно увеличить количество ^{238}U в ленте (без ухудшения ее исходных характеристик) и тем самым сократить

необходимую дозу облучения, то можно надеяться, что этот метод будет использоваться практически (по крайней мере, для некоторых специальных задач).

Автор выражает глубокую благодарность О.Д.Маслову за полезные обсуждения и помощь при облучениях, а также А.В.Калинову за проведение измерений J_c .

Литература

1. Toulemonde M., Bouffard S., Studer F., Nuclear Instruments and Methods, **B91** (1994) 108.
2. Civale L., Supercond. Sci. Technol., **10** (1997) A11.
3. Fleischer R.L., Hart H.R., Jr., Lay K.W., Luborsky F.E., Phys. Rev., **B40** (1989) 2163.
4. Sawh R., Ren Y., Weinstein R., Henning W., Nemoto T., Physica, **C305** (1998) 159.
5. Ren Y., Weinstein R., Sawh R., Liu J., Physica, **C282-287** (1997) 2301.
6. Weinstein R., Sawh R., Ren Y., Eisterer M., Weber H.W., Supercond. Sci. Technol., **11** (1998) 959.
7. Eisterer M., Tönies S., Novak W., Weber H.W., Weinstein R., Sawh R., Supercond. Sci. Technol., **11** (1998) 1001.
8. Schultz G.W., Klein C., Weber H.W., Moss S., Zeng R., Dou D.X., Sawh R., Ren Y., Weinstein R., Appl. Phys. Lett., **73** (1998) 3935.
9. Tönies S., Klein C., Weber H.W., Zeimet B., Guo Y.C., Dou S.X., Sawh R., Ren Y., Weinstein R., in Proceedings of EUCAS-99, Spain. 14-17 September, 1999, Inst. Phys. Conf. Ser. **167**, p.487, 2000 IOP Publishing Ltd.
10. Goncharov I.N., *ibid.*, p.559; JINR Preprint E8-99-270, Dubna, 1999.

11. Nikulin A.D., Shikov A.K., Akimov I.I., Goncharov I.N., Aksenov V.L., Golikov V.V., Luschikov V.I., Voloshin I.F., Fisher L.M., Proc. ICEC-17, eds. D. Dew-Hughes et al. (Bristol-Philadelphia: IOP Publishing Ltd) (1998) p. 539.
12. Frischherz M.C., Kirk M.A., Farmer J., Greenwood L.R., Weber H.W., Physica, **C232** (1994) 309.
13. Горбачёв В.М., Замятнин Ю.С., Лбов А.А., Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Справочник, М.: Атомиздат, 1976.
14. Baldin A.M. et al, IEEE, **5**, № 2 (1995) 875.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 февраля 2001 года.

Гончаров И.Н.

P8-2001-27

О повышении J_c в высокотемпературных сверхпроводниках, допированных ^{238}U , за счет треков от осколков фотоделения его ядер

Известно явление заметного повышения $J_c(B, T)$ в высокотемпературных сверхпроводниках (особенно в области температур жидкого азота 62–78 К в магнитных полях выше 0,5 Тл) в результате образования треков от быстрых тяжелых ионов, в том числе от осколков деления ядер урана, введенного в ВТСП. Треки являются дополнительными и весьма эффективными центрами пиннинга. Описанные в литературе результаты получены для ВТСП, допированных ^{235}U , после реакторного облучения тепловыми нейтронами. В настоящей работе проанализированы недостатки, присущие этому методу, в частности, при его применении для токонесущей ленты на основе ВТСП-системы Bi-2223 в серебряной матрице. В этом случае возникает очень высокий уровень радиоактивности, медленно спадающий со временем ($T_{1/2} = 250$ сут). Предложено использовать фотоделение ядер ^{238}U в области гигантского резонанса ($E_\gamma \sim 10 - 20$ МэВ). Приводятся результаты, полученные после облучения образцов ленты гамма-квантами с энергией $E_\gamma \leq 24$ МэВ, в том числе временной характер спада приведенной радиоактивности. Обсуждаются возможности практической реализации данного метода повышения J_c .

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод автора

Goncharov I.N.

P8-2001-27

On an Increase of Critical Current in High Temperature Superconductors Doped with ^{238}U Due to the Production of Nuclear Photofission Fragment Tracks

The effect of appreciable increasing $J_c(B, T)$ in HTSC (especially at liquid nitrogen temperatures of 62–78 K and magnetic fields of above 0.5 T) due to the production of fast heavy ion tracks, including those of doped U nuclear fission fragments, is known. The tracks are additional effective pinning-centers. The results described in the literature have been obtained for ^{235}U doped HTSC after reactor thermal neutron irradiations. Disadvantages of such a method are analyzed in this paper, in particular in case of its use for current-carrying Bi-2223/Ag tape, because a very high radioactivity level slowly decreasing in time arises. The author has suggested to use ^{238}U nuclear photofission in over a giant resonance energy range ($E_\gamma \sim 10 - 20$ MeV). The experimental results obtained after tape irradiation with gamma-quanta ($E_\gamma \leq 24$ MeV), including a time dependence of radioactivity level, are presented. Possibilities of practical realization of this method are discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 05.04.2001

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,95

Тираж 230. Заказ 52580. Цена 1 р. 14 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области