

P9-2003-28

В. Ю. Щеголев*

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ИЗ NdFeB
В ПОЛЯХ НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

*E-mail: vys@jinr.ru

Введение

Постоянные магниты на основе NdFeV обладают уникальными свойствами и имеют наибольшие значения остаточной намагниченности и коэрцитивной силы при приемлемой стоимости. В настоящее время они находят широкое применение во многих областях науки и техники. В ускорительной технике магниты данного типа используются, например, для формирования магнитных полей в источниках ЭЦР-типа. В связи с тем, что источники ионов находятся в зале ускорителя и, соответственно, в полях нейтронного излучения, возникает вопрос о воздействии нейтронных потоков на характеристики магнитов. Наиболее остро этот вопрос стоит для источников вторичных ионных пучков, когда ионный источник находится в непосредственной близости от производящей мишени. В рамках проекта DRIBs в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ были проведены облучения образцов магнитов из NdFeV в условиях, максимально приближенных к реальным. В данной работе приводятся изменения магнитных характеристик в результате облучения нейтронами.

Эксперимент

Источником вторичного излучения для облучения образцов служила мишень из ${}^9\text{Be}$ толщиной 2 мм, облучаемая пучком ионов ${}^{11}\text{B}^{+5}$ с энергией 34 МэВ/нукл. и интенсивностью $\approx 6 \times 10^{12}$ ион/с. Образцы располагались под углами 28, 90 и 152° к направлению пучка на расстояниях 18, 50 и 100 см от мишени (всего 9 точек). Облучали 12 образцов из NdFeV размером $h=2$ мм, $\varnothing=10$ мм, причем три точки дублировались образцами, экранированными от тепловых нейтронов Cd толщиной 0,5 мм. Расположение образцов во время облучения показано на рис.1. Облучение длилось 188 часов.

Для определения спектрального состава нейтронов, выходящих из мишени, были облучены наборы пороговых детекторов под разными углами.

Использовались следующие пороговые реакции:

${}^{115}\text{In}(n,n'){}^{115m}\text{In}$	$E_{\text{пор}}=0,34$ МэВ [1],
${}^{58}\text{Ni}(n,p){}^{58}\text{Co}$	$E_{\text{пор}}=2,3$ МэВ [1],
${}^{209}\text{Bi}(n,4n){}^{206}\text{Bi}$	$E_{\text{пор}}\approx 24$ МэВ [2],
${}^{209}\text{Bi}(n,5n){}^{205}\text{Bi}$	$E_{\text{пор}}\approx 32$ МэВ [2],
${}^{209}\text{Bi}(n,6n){}^{204}\text{Bi}$	$E_{\text{пор}}\approx 38$ МэВ [2],
${}^{209}\text{Bi}(n,7n){}^{203}\text{Bi}$	$E_{\text{пор}}\approx 45$ МэВ [2],
${}^{209}\text{Bi}(n,8n){}^{202}\text{Bi}$	$E_{\text{пор}}\approx 54$ МэВ [2].

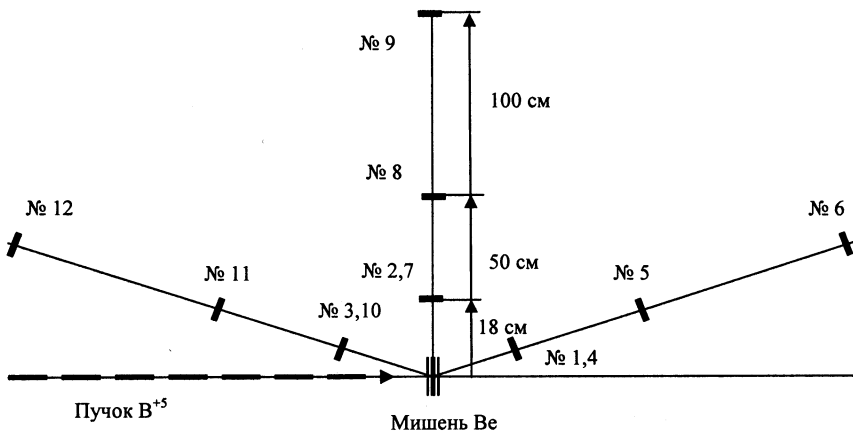


Рис. 1. Геометрия облучения образцов из NdFeB

Для угла 14° был восстановлен спектр нейтронов при помощи программы восстановления спектров нейтронов методом статистической регуляризации [3]. Он представлен на рис.2.

Исходными данными для этой программы являются измеренные скорости ядерных реакций активации в облученных детекторах. Скорости ядерных реакций в облученных детекторах рассчитывались как

$$Q_{act} = A_t / [N_{ядер} (1 - \exp(-\lambda t_{обл})) \exp(-\lambda t_{выд})],$$

где A_t - наведенная активность активационного детектора на момент времени измерения t ; $N_{ядер}$ - число ядер нуклида мишени в детекторе; $t_{обл}$ - время облучения детектора в нейтронном поле; λ - постоянная распада продукта активации в детекторе; $t_{выд}$ - время выдержки активационного детектора после облучения до начала измерения.

Измерения наведенной активности проводились на спектрометре с Ge ППД (разрешением 2 кэВ на энергии 1,4 МэВ).

На том же ППД измерялись облученные образцы постоянных магнитов. Обработка γ - спектров позволила определить в образцах магнитов активность Mn-54, который является продуктом ядерных реакций Fe-54(n,p) и Fe-56(n,2np) с $E_{пор}$ соответственно 2 и 20 МэВ.

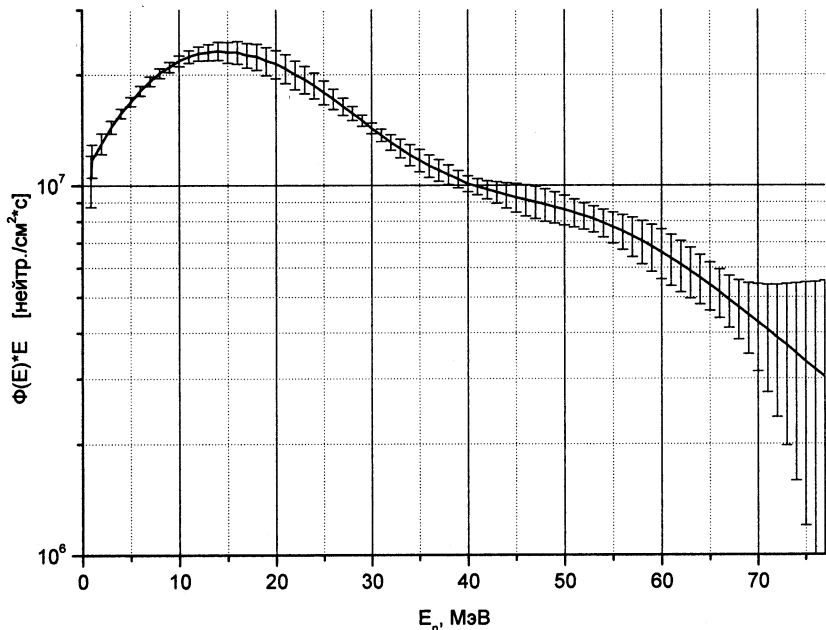


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов из мишени Be (417 мг/см^2) под углом 14° и на расстоянии 24 см от нее, облучаемой ионами $^{11}\text{B}^{+5}$ ($E=32,5 \text{ МэВ/нукл.}$) током 1 мкА ($1,25 \times 10^{12}$ ионов/с)

Результаты и обсуждение

До и после облучения была измерена датчиком Холла напряженность магнитного поля B_{r0} и B_r в центре торцов цилиндрических образцов постоянных магнитов из NdFeB. Изменения величины напряженности магнитного поля в точке измерения составили от 17 до 87 % в зависимости от расстояния до мишени и угла от направления пучка. Проведенные измерения не показали различий в образцах, помещенных в кадмиевые экраны, и без них, облученных в одинаковых условиях.

Зависимость B_r/B_{r0} от наработки Mn-54 в образцах представлена на рис.3.

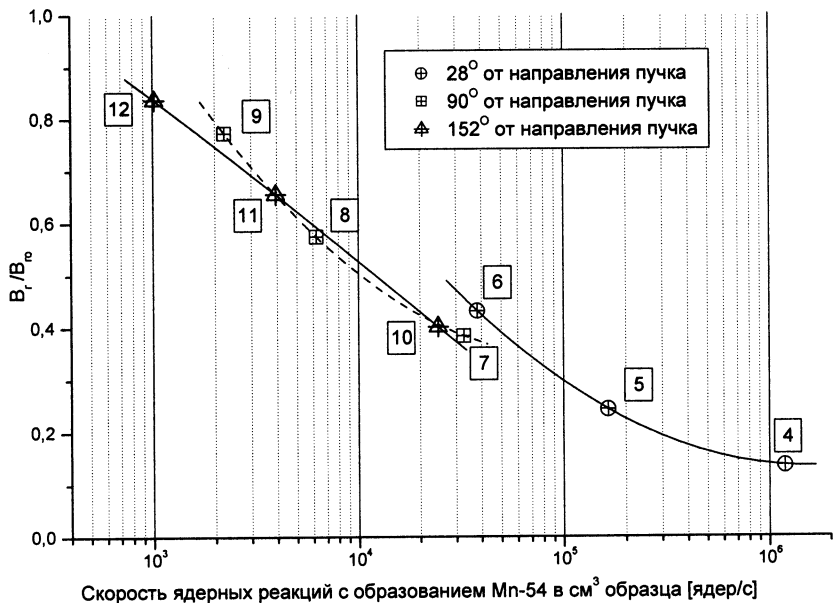


Рис.3. Зависимость B_r/B_{r0} от наработки Mn-54 в образцах магнитов NdFeB

Рассматривая результаты измерений в точках №6 и №7, видим, что в образце в точке №6 наработалось Mn-54 больше, но потери остаточной намагниченности меньше, чем в образце в точке №7. Это можно объяснить тем, что спектр нейтронов в точке №6 более «жесткий», чем в точке №7. Сечение реакции $Fe-54(n,p)Mn-54$ выше 12 МэВ падает, в то время как сечение образования дефектов в железе продолжает расти с ростом энергии нейтронов [4].

Степень «жесткости» нейтронов под разными углами можно оценить из результатов облучения пороговых детекторов, представленных на рис. 4.

Такой же вывод можно сделать, рассмотрев результаты облучения образцов из NdFeB в полях нейтронов реакторного спектра [5] и спектра деления Cf-252 [6]. Эти данные совместно с результатами, полученными в нашей работе, показаны на рис.5.

Выводы

Экстраполируя полученные результаты для точки №12 (повторяет геометрию расположения постоянного магнита на установке DRIBs (фаза 1) на проектный режим установки DRIBs (фаза 1) (пучок ионов $^{11}B^{+5}$ с энергией 35±50 МэВ/нукл. и интенсивностью $\approx 6 \times 10^{13}$ ион/с.), получаем плотность потока

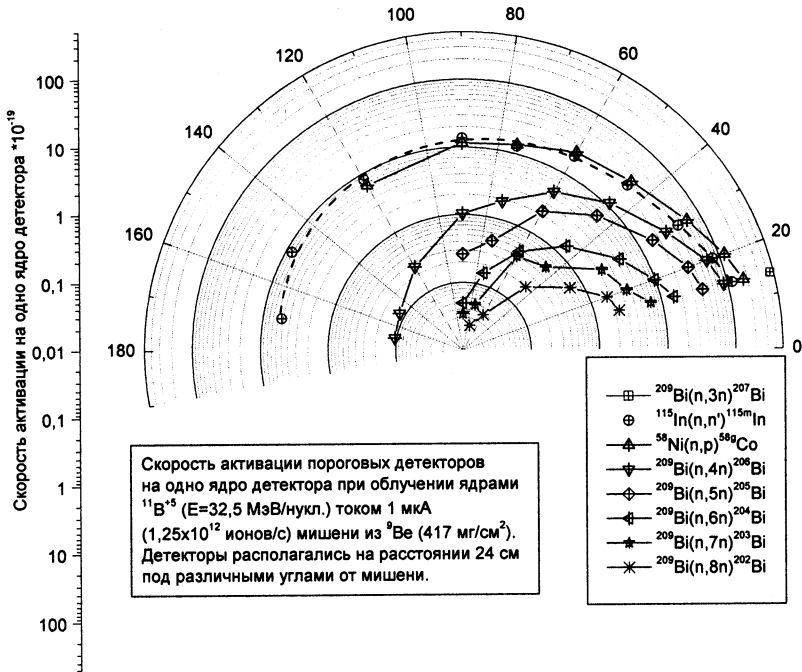


Рис. 4 Скорости активации пороговых детекторов в зависимости от угла по отношению к пучку, под которым располагался детектор

нейтронов (с энергией больше 0,5 МэВ) $2,5 \times 10^7$ [нейтр./(см 2 ×с)] и, соответственно, потери остаточной намагниченности в 17 % через 19 часов работы, что неприемлемо для нормальной работы установки. Следовательно, представляется актуальной задача уменьшения повреждающего воздействия нейтронов высоких энергий на постоянные магниты из NdFeB установки DRIBs (фаза 1). Для нормальной работы установки в течение года требуется ослабить плотность потока быстрых нейтронов в 1500 раз. Этого можно достичь, например, установив защиту толщиной ~ 65 см железа, или ~ 90 см полиэтилена.

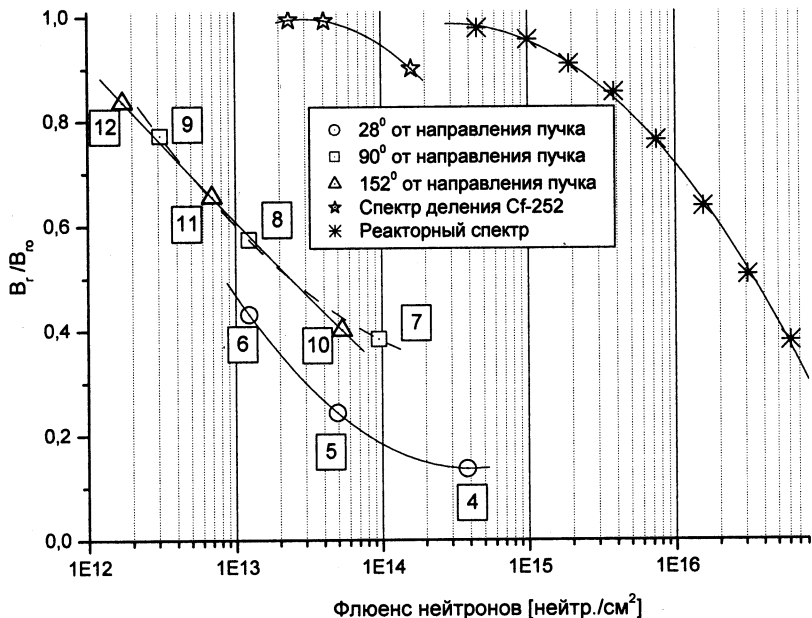


Рис. 5. Результаты облучения постоянного магнита из NdFeB нейтронами разного спектрального состава

Список литературы

1. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. "Evaluated Nuclear Data File," ENDF/B-VI, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory (1990).
3. Бамблевский В.П., Гречко В.В. ОИЯИ, Р-16-12069, Дубна, 1978.
4. Авраменко В.И., Конобеев Ю.В., Строкова А.М. Атомная энергия, 1984, т. 56, вып. 3, с.139.
5. J.R. Cost, R.D. Brown, A.L. Giorgi, and J.T. Stanley, IEEE Trans. Magn. vol. 24, № 3, 1988, p.2016.
6. J.Alderman, P.K.Job, R.C.Martin, C.M.Simmons, G.D.Owen, Nucl.Instr.and Meth. A 481 (2002) p.9.

Щеголев В. Ю.

P9-2003-28

**Радиационная стойкость постоянных магнитов из NdFeB
в полях нейтронов высоких энергий**

Измерены магнитные характеристики образцов постоянных магнитов из NdFeB до и после облучения в условиях, приближенных к условиям установки DRIBs (фаза 1) ЛЯР ОИЯИ. Потери остаточной намагниченности образцов составили от 17 до 87 % за 8 дней облучения. Сделана оценка «времени жизни» ЭЦР-источника с такими магнитами на установке DRIBs (фаза 1). Обсуждаются возможные причины столь больших потерь остаточной намагниченности образцов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова и в Отделении радиационных и радиобиологических исследований ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод автора

Schegolev V. Yu.

P9-2003-28

**Radiation Hardness of Permanent Magnets of NdFeB
in High Energy Neutrons Field**

Magnetic properties of NdFeB permanent magnet samples were measured before and after irradiation with conditions similar to conditions of DRIBs (phase 1) (FLNR, JINR) facility. Demagnetization of the samples after 8-day irradiation was found to be in the range of 17 to 87 %. Estimation of magnet «life time» was made in the case of setting up these magnets on ECR ion source of DRIBs (phase 1) facility. Possible reasons of considerable demagnetization of the magnets are discussed.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, and at the Division of Radiation and Radiobiological Research, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 04.03.2003.

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

Усл. печ. л. 0,37. Уч.-изд. л. 0,48. Тираж 270 экз. Заказ № 53799.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/