

Концентрация изотопов урана в товарном низкообогащенном уране при разной концентрации ^{235}U в низкообогащенном уране-разбавителе, мас. доля, %

$^{232}\text{UF}_6$, 10^{-7}	$^{233}\text{UF}_6$, 10^{-7}	$^{234}\text{UF}_6$, 10^{-2}	$^{235}\text{UF}_6$	$^{236}\text{UF}_6$, 10^{-1}
Обогащение 1,1%				
2	3,89	3,43	4,08	2,82
Обогащение 1,5%				
2	3,88	3,6	4,08	2,81
Обогащение 2%				
2	3,89	3,82	4,08	2,81

разделения по отношению как к ранее предложенным многопоточным каскадам, так и к штатному каскаду для обогащения природного урана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук по проекту «Оптимизация процессов разделения в каскадах газовых центрифуг при получении изотопических смесей для актуальных приложений» (№ 14.Y30.16.6284-МК).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов А.А., Водолазских В.В., Мазин В.И. и др. Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2236053. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2004, № 25, с. 562.
2. Палкин В.А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением ^{235}U до 5%. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 1, с. 28—33.

3. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Теоретические основы хим. технологии, 2006, т. 40, № 1, с. 7—16.
4. Палкин В.А. Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором. — Перспективные материалы, 2010, вып. 8, с. 11—14.
5. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А. и др. Каскадные схемы в задачах исследования закономерностей изменения изотопного состава многократно регенерированного урана. — Ядерная физика и инжиниринг, 2012, т. 3, № 5, с. 396—403.
6. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ природным сырьем и отвальным ураном. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 1, с. 36—42.
7. De la Garza A., Garrett G., Murphy J. Multicomponent isotope separation in cascades. — Chem. Engng Sci., 1961, v. 15, p. 188—209.
8. Sulaberidze G.A., Borisevich V.D. Cascades for separation of multicomponent isotope mixtures. — Sep. Sci. Technol., 2001, v. 36, № 8/9, p. 1769—1817.
9. Song T., Shi Z., Borisevich V.D. et al. Comparative study of the model and optimum cascades for multicomponent isotope separation. — Sep. Sci. Technol., 2010, v. 45, p. 2113—2118.
10. Palkin V.A., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. et al. Design-analytical research of a refinement of the recycled uranium from ^{236}U isotope by use of the Q-cascade. — In: Proc. of SPLG-2010. Saint-Petersburg, Russia, 13—18 June, 2010, p. 142—149.
11. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Evolution of isotopic composition of reprocessed uranium during the multiple recycling in light water reactors with natural uranium feed. — Phys. Atomic Nuclei, 2012, v. 75, № 13, p. 1616—1625.

Поступило в Редакцию 15.03.16

УДК 621.039.83

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ПУЧКОВ ЯДЕР ^{7}Be ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Оглоблин А.А., Унежев В.Н., Новиков В.И., Маламут Т.Ю. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Использование пучков радиоактивных ядер в последние два десятилетия стало важным направлением в фундаментальной ядерной физике. Настоящая работа является их применением в прикладных целях — изучении износостойкости материалов, используемых в различных отраслях промышленности.

Как показал зарубежный опыт, одним из перспективных неразрушающих методов диагностики является метод поверхностной активации [1]. Его особенность состоит в том, что на поверхности исследуемого образца создается

слой радиоактивного вещества, изменение активности которого из-за износа или аналогичных процессов измеряется детекторами ядерного излучения. Такой слой обычно создается пучками протонов, α -частиц и дейтронов, получаемых на ускорителях заряженных частиц, например, циклотронах.

Однако большой класс современных материалов (керамика, пластмасса, многие композитные материалы), находящихся все большее применение, не может быть исследован таким способом, поскольку с помощью протонов или

других стабильных частиц в них трудно создать слой радиоактивного вещества с требуемыми ядерными свойствами и эти материалы в отличие от металлов быстро разрушаются под действием интенсивных пучков ускоренных частиц.

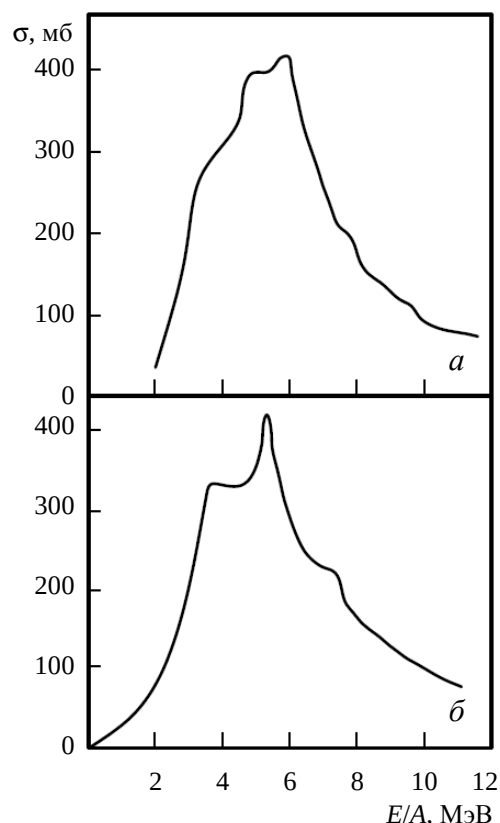
В конце 1980-х—начале 1990-х гг. исследования привели к внедрению в практику физического эксперимента вторичных пучков радиоактивных ядер, которые образуются в результате ядерных реакций в мишенях, облученных на ускорителях. Открылась возможность получать радиоактивные ядра с необходимыми ядерно-физическими свойствами и достаточной энергией, которые могут быть внедрены в изучаемый образец на нужную глубину.

Сущность метода состоит в следующем. Радиоактивные ядра имплантируются в исследуемый образец. Их энергия должна быть достаточной для проникновения на необходимую глубину. Обычно износ, заметно влияющий на работоспособность изделий из характерных синтетических материалов, составляет ~100 мкм. Такой пробег радиоактивных ядер в типичных применяемых веществах требует энергии не менее нескольких десятков мегаэлектронвольт даже для самых легких радиоактивных ядер. После имплантации ядер исследуемая деталь подвергается испытаниям на износ, который измеряется по активности γ -излучения образца или соприкасающейся с ним среды, например, масла автомобильного двигателя. Помимо высокой энергии для проведения измерений, период полураспада имплантируемых ядер должен быть не менее нескольких суток. Характер испускаемого излучения должен быть простым для наблюдения и идентификации. Это означает, что γ -излучение ядер должно иметь высокую энергию и сравнительно простой спектр. Кроме того, имплантируемые ядра не должны вызывать в исследуемых образцах заметных радиационных повреждений. Этим требованиям удовлетворяет ${}^7\text{Be}$. Его основные ядерно-физические свойства следующие: период полураспада 53 сут, тип радиоактивности — К-захват, излучение — γ -кванты энергией 480 кэВ, доля распадов с испусканием γ -квантов 10,5%. Первые три свойства удовлетворяют требованиям. Четвертое является недостатком,

который необходимо компенсировать выбором реакций с максимальными сечениями образования ${}^7\text{Be}$ и увеличением интенсивности первичных пучков.

Ядра ${}^7\text{Be}$ могут быть получены в результате реакций, выбор которых является одним из важных элементов метода. В экспериментах использовали реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и ${}^{10}\text{B}(p, {}^4\text{He}){}^7\text{Be}$. По сравнению с другими, например, реакциями фрагментации [2] их максимальное сечение превышает 400 мб, что является высоким показателем для реакций с заряженными частицами. Ядра ${}^7\text{Be}$ можно генерировать в условиях обратной кинематики (легкая мишень, тяжелая налетающая частица). Кривые возбуждения реакции $\text{H}({}^7\text{Li}, n){}^7\text{Be}$ и $\text{H}({}^{10}\text{B}, \alpha){}^7\text{Be}$ имеют широкие максимумы при энергии 5—6 и 4—6 МэВ/нуклон соответственно (рис. 1).

При бомбардировке водородосодержащей мишени ядрами ${}^7\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$ образующиеся ядра ${}^7\text{Be}$ летят по направлению пучка в сравнительно узком конусе, раствор которого определяется энергией первичного пучка ${}^7\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$. Для эффективной диагностики имплантируемые в об-



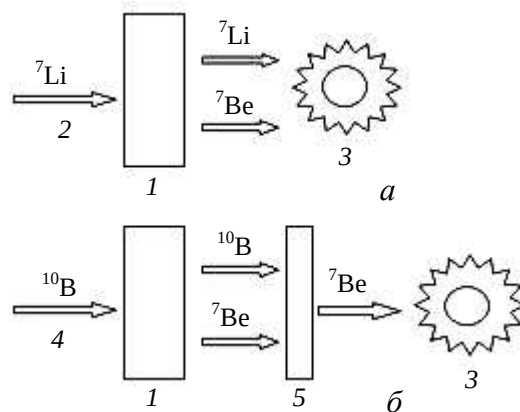
Р и с. 1. Функции возбуждения реакций $\text{H}({}^7\text{Li}, n){}^7\text{Be}$ (а) и $\text{H}({}^{10}\text{B}, \alpha){}^7\text{Be}$ (б)

разцы ядра ${}^7\text{Be}$ должны иметь энергию около 30 МэВ, что недостижимо для обычных имплантеров, энергия которых не превышает сотен кэВ. Реализация метода потребовала режима ускорения ионов ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$, что нетривиально для ускорителей заряженных частиц, и создания мишеней устройств (конверторов), преобразующих ядра ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$ в ядра ${}^7\text{Be}$.

Принцип действия установок для облучения показан на рис. 2. Конвертор с использованием ускоренных ядер ${}^7\text{Li}$ представляет собой полиэтиленовую пленку или камеру, заполненную водородом. Камера соединена с ионопроводом циклотрона через фольговое окно (молибден, титан и др.). В нее помещается исследуемый образец (см. рис. 2, а). Пучок ионов ${}^7\text{Li}$ из циклотрона попадает через фольговое окно в газовую мишень, где в результате ядерной реакции $\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})$ образуются ядра ${}^7\text{Be}$. Теряя часть энергии в газовой среде, ядра ${}^7\text{Be}$ имплантируются в исследуемый образец на глубину до нескольких десятков микрон.

Данный конвертор предназначен для исследования образцов с высокой теплопроводностью и температурой плавления, поскольку одновременно с ядрами ${}^7\text{Be}$ в образец попадает пучок ${}^7\text{Li}$, выделяя в нем мощность до нескольких ватт, что может привести к плавлению или испучиванию материала.

Конвертор с использованием ускоренных ядер ${}^{10}\text{B}$ представляет собой газовую мишень с водородом толщиной 2—5 мг/см², которую облучают пучками ионов ${}^{10}\text{B}$ энергией около 60 МэВ (см. рис. 2, б). Отличием от предыдущего



Р и с. 2. Принципиальная схема имплантации радиоактивных ядер ${}^7\text{Be}$ в поверхностный слой детали с помощью первичных пучков ${}^7\text{Li}$ (а) и ${}^{10}\text{B}$ (б): 1 — газовая мишень; 2, 4 — пучок ионов ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$; 3 — облучаемый образец; 5 — фильтр ядер бора

го конвертора является наличие между водородосодержащей мишенью и образцом металлического фильтра с высокой теплопроводностью для задержки первичного пучка. Толщина фильтра выбирается равной пробегу в нем ионов ${}^{10}\text{B}$. Отфильтрованный пучок ${}^7\text{Be}$ имеет малую мощность и не вызывает перегрева исследуемых материалов, что важно, например, для пластмассы и резины.

Оба способа получения ядер ${}^7\text{Be}$ могут быть применены для их имплантации в материалы на глубину несколько десятков микрон (см. таблицу).

Наряду с конверторами в экспериментальных целях пучки ${}^7\text{Be}$ формировали с помощью магнитного ахроматического сепаратора энергии. Для получения ядер ${}^7\text{Be}$ были разработаны и изготовлены несколько типов конверторов.

Параметры использованных пучков ${}^7\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ и вторичных пучков ${}^7\text{Be}$

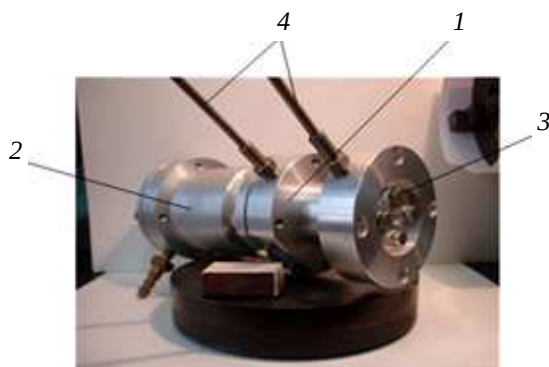
Ускоренные ядра	Первичный пучок		Пучок ${}^7\text{Be}$			Тип конвертора
	E , МэВ	I , мкА*	E , МэВ	I , с ⁻¹	Площадь пучка, см ²	
${}^7\text{Li}$	70	0,2	0—28	$1 \cdot 10^9$	2,5	Газ
${}^7\text{B}$	50	0,2	0—25	$3 \cdot 10^8$	0,1	Полиэтилен
${}^{10}\text{B}$	60	0,2	0—42	$2 \cdot 10^8$	1,5	Газ
${}^{10}\text{B}$	60	0,2	0—28	$7 \cdot 10^7$	2,0	Газ + фильтр
${}^{10}\text{B}$	60	0,1	0—25	$1 \cdot 10^7$	0,1	Полиэтилен + фильтр
${}^7\text{Li}$	70	0,2	Моноэнергетический	$1 \cdot 10^6$	0,1	Магнитный ахроматический сепаратор энергии

* По числу частиц.

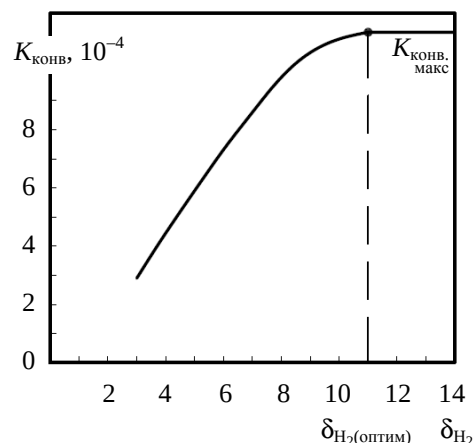


Р и с. 3. Полиэтиленовый конвертор: 1 — основание; 2 — вращающийся диск с пленкой из полиэтилена толщиной 150 мкм; 3 — электропривод

В полиэтиленовом конверторе в качестве водородосодержащего материала используется полиэтиленовая или майларовая пленка толщиной до 20 мг/см^2 (рис. 3). Конвертор представляет собой вращающийся диск с закрепленной на нем пленкой, охлаждаемый воздушным потоком. Пучок ускоренных ионов из ускорителя, проходя через фольговое окно, попадает на полиэтиленовую или майларовую пленку, и в результате ядерных реакций образуется ${}^7\text{Be}$. Газовый конвертор, используемый, в основном, для экспериментов с пучками бора, представляет собой металлический охлаждаемый водой цилиндр, заполненный водородом (рис. 4). Максимальная толщина конвертора выбрана равной 5 мг/см^2 водорода ($6,6 \cdot 10^{21} \text{ ат./см}^2$). Такой толщине конвертора соответствует максимальный коэффициент конверсии $1,1 \cdot 10^{-3}$, достигаемый при энергии ионов ${}^7\text{Li}$ 50 МэВ. Это вытекает из расчетов с учетом зависимостей сечения образования ${}^7\text{Be}$ в водороде от энергии ${}^7\text{Li}$, энергетических



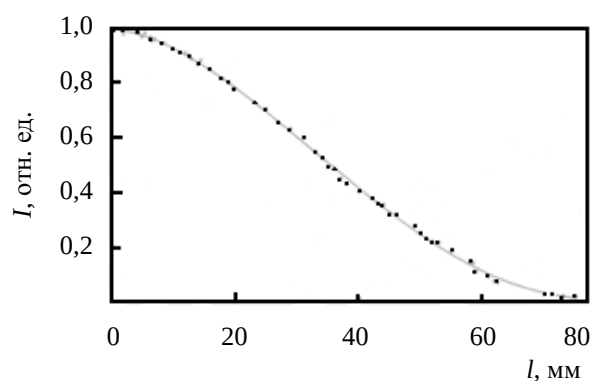
Р и с. 4. Газовый конвертор с прокачкой мишенного газа (водорода): 1 — газовая мишень, заполненная водородом; 2 — вакуумированный измерительный отсек; 3 — входное окно; 4 — патрубки системы прокачки водорода



Р и с. 5. Зависимость коэффициента конверсии ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}$ от количества водорода в мишени в единицах $\delta = LP$

ческих спектров этих ядер, потерь энергии ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$ в водороде. Результаты показаны на рис. 5, где приведены коэффициенты конверсии ядер ${}^7\text{Li}$ в ядра ${}^7\text{Be}$ в зависимости от числа атомов водорода в конвертирующей мишени (в единицах $\delta = LP$, где L — длина газовой мишени, см^2 , P — давление газа, атм). Ядра налетающего пучка задерживаются в специально подобранном металлическом фильтре.

Пучки ядер ${}^7\text{Be}$, формируемые с помощью конверторов и попадающие в исследуемые образцы, как правило, имеют широкий спектр энергии. Следствием этого является неоднородная активность по глубине образца (рис. 6). Для определения зависимости активности от толщины изношенного слоя были построены градуировочные кривые, получаемые с помощью эталонов. В некоторых случаях такие эталоны могли быть заменены стопками фольг. В экспериментах порог чувствительности составлял 1—2 мкм (активность около 10 кБк). В отдельных



Р и с. 6. Экспериментальное распределение имплантированного ${}^7\text{Be}$ в нитрид кремния

случаях с помощью вариации энергии первичного пучка и использования толстого конвертора формировалось однородное распределение по энергии имплантируемых ядер. Для отработки метода имплантации ядер бериллия был изготовлен стенд, предназначенный для снятия поверхностного слоя облученного материала.

С помощью разработанных конверторов была проведена серия экспериментов по исследованию износа деталей, в основном, автомобильных, а также используемых для изготовления искусственных суставов [4, 5]. Дальнейшее развитие метода возможно по следующим направлениям:

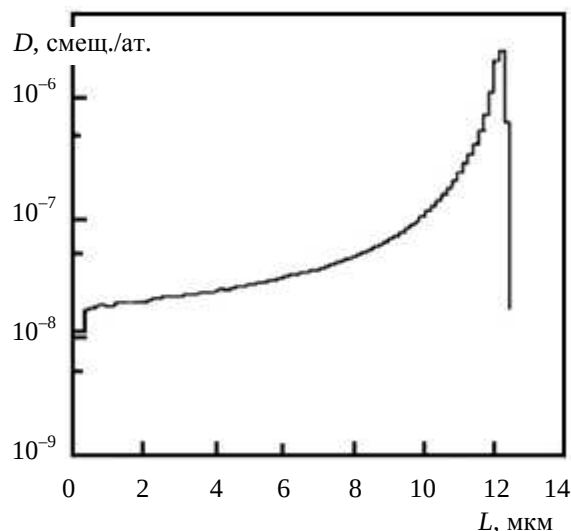
создание сверхпроводящего соленоида для сепарации ядер ${}^7\text{Be}$ от первичного пучка ${}^7\text{Li}$;

формирование и использование моноэнергетических пучков ${}^7\text{Be}$;

исследование радиационных повреждений синтетических материалов различными ядрами для изучения возможности их использования вместо ${}^7\text{Be}$.

Опыт показал, что использование пучков ${}^7\text{Be}$ не приводит к каким-либо повреждениям, влияющим на износ, кроме, возможно, полимерных материалов, которые не исследовались. Этот результат согласуется с оценкой количества смещений на атом, которое может служить некоторым индикатором повреждений. Для ориентировки на рис. 7 видно, что расчетное распределение смещений на атом по глубине углеродного образца во много раз меньше критического.

Основное преимущество разработанного метода состоит в исследовании износа деталей устройства, например, автомобильного двигателя без его разборки. Результаты могут быть получены значительно быстрее, чем при обычных испытаниях. Метод может быть применен в промышленности, где используются детали из синтетических материалов, износ которых мо-



Р и с. 7. Распределение смещений на атом в образце углерода при облучении ядрами бериллия энергией 10 МэВ, дозой 10^{11} ядер

жет быть определен по характерной области сравнительно небольшого размера ($\sim 1 \text{ см}^2$).

Авторы благодарны А.И. Рязанову, Е.В. Семенову и А.Е. Волкову за полезные обсуждения проблем радиационной физики.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 14-02-00079.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fehsenfeld P., Kleinrahn A.** The application of cyclotron in mechanical engineering. — In: Proc. of 12th Conf. on Cyclotrons. Berlin, 1989, p. 577.
2. **Mallory M.** Production of ${}^7\text{Be}$ from a heavy ion cyclotron: a new tool for wear studies. — Ibid., p. 582.
3. **Калинин С.П., Оглоблин А.А., Петров Ю.М.** Кривые возбуждения реакций $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$, $\text{B}^{10}(p, \alpha)\text{Be}^7$, $\text{B}^{11}(p, n)\text{C}^{11}$ и энергетические уровни ядер Be^8 , C^{11} и C^{12} . — Атомная энергия, 1957, т. 2, вып. 2, с. 171—174.
4. **Novikov V.I., Fehsenfeld P.** Be-7 beams for wear studies of plastics, elastomers and ceramics. — In: Proc. of 4th Europ. Particle Acceleration Conf. London, 1994, p. 2664.
5. **Ogloblin A.A.** Radioactive beams for material engineering. Cyclotrons and their applications. — In: Proc. of 14th Intern. Conf. Cape Town, 1995, p. 150.

Поступила в Редакцию 13.05.2016