

УДК 539.1.074.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ НУКЛИДОВ НА МЕДИ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 50 ГэВ

© 2012 г. Г. И. Крупный, Я. Н. Расцветалов

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

E-mail: gennady.krupny@ihep.ru, rascvetalov@ihep.ru

Поступила в редакцию 23.12.2011 г.

Тонкая мишень (сборка из медной и алюминиевой фольги), установленная в вакуумной камере ускорителя, облучалась циркулирующими протонами с энергией 50 ГэВ. По активации мониторинговой Al-фольги определено число протонов, прошедших через мишень за сеанс работы ускорителя, и измерены активности радионуклидов в каждой из фольг. Оценены сечения образования ряда радионуклидов протонами с энергией 50 ГэВ на ядрах меди.

ВВЕДЕНИЕ

Важным параметром при решении широкого круга задач по воздействию радиационных факторов на вещество в условиях высоких уровней радиации является максимально-достижимая доза или интегральный флюенс частиц за разумное время работы облучающей установки. При исследованиях физики радиационных повреждений материалов атомной техники обычно используются исследовательские ядерные реакторы. За рубежом довольно часто такие исследования проводятся и на ускорителях протонов с энергиями 0.2–1.5 ГэВ для экспрессной оценки изменения свойств материалов в результате облучения [1–3]. При использовании ускорителей протонов для решения задач радиационного материаловедения современной ядерной энергетики нужны пучки с интенсивностями $\geq 10^{14}$ протонов/(см² · с). Таких ускорителей протонов в мире немного, при этом дальнейшее увеличение интенсивности пучков сопряжено с нарастанием как физико-технических, так и материальных проблем.

На ускорительном комплексе Института физики высоких энергий выполнены первые тестовые исследования по изучению радиационных повреждений материалов атомной техники. За сеанс работы протонного синхротрона У-70 (~1000 ч), не мешая основной физической программе, на тонких образцах материалов может быть достигнут интегральный флюенс протонов $\sim 10^{19}$ протонов/см². При этом используется около 1% циркулирующих в вакуумной камере ускорителя протонов (гало пучка), которые, многократно пересекая тонкий образец исследуемого материала, создают в нем вышеуказанный уровень радиационных нагрузок. В данной работе исследованы облученные в ускорителе тонкие образцы (фольги) из меди и алюминия и получены экспериментальные оцен-

ки сечений образования вторичных радионуклидов протонами с энергией 50 ГэВ на ядрах меди.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве тонкой внутренней мишени использовалась сборка из двух фольг: медной и алюминиевой. Сборка была установлена в вакуумной камере магнитного блока № 33 ускорителя У-70 (рис. 1). Первой по пучку стояла медная фольга,

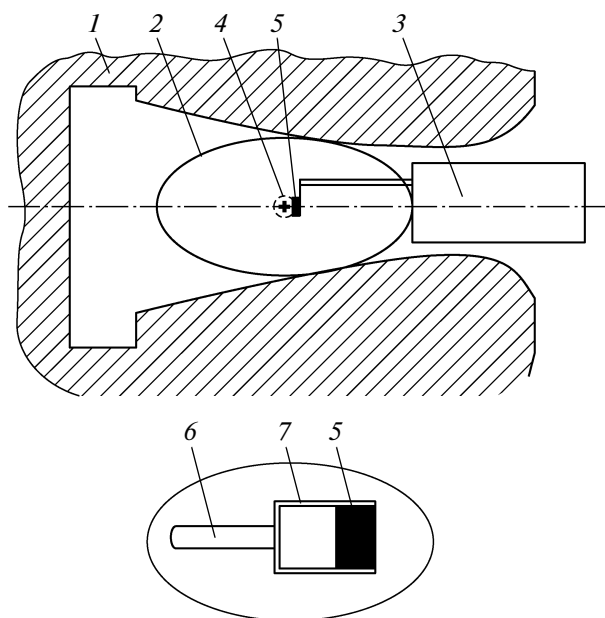


Рис. 1. Схема расположения мишени в радиально-фокусирующем блоке ускорителя. 1 — магнитный блок, 2 — вакуумная камера, 3 — бокс привода мишени, 4 — пучок протонов и его гало (условно), 5 — мишень (фольги), 6 — привод мишени, 7 — рамка для крепления фольг.

вплотную к ней – алюминиевая. Исследуемым образцом в сборке была фольга из электролитической меди с естественным содержанием изотопов ^{63}Cu и ^{65}Cu ; назначение мониторинговой алюминиевой фольги – определение полного числа протонов, прошедших сборку. Размеры фольг 40×20 мм определялись конструкцией рамки-держателя мишени (см. вставку на рис. 1), толщина медной фольги составляла 50 мкм. С целью минимизации вносимых возмущений на число пересечений протонами сборки толщина алюминиевой фольги (~6 мкм) выбрана гораздо меньше медной. Радиальная координата мишени экспериментально выбрана равной +18 мм, что соответствует удалению мишени примерно на 11 мм от центра пучка. Энергия циркулирующих протонов в У-70 составляла 50 ГэВ.

КОНТРОЛЬ ИНТЕНСИВНОСТИ СБРОСА ПРОТОНОВ НА МИШЕНЬ

Интенсивность сброса (наведения) протонов на исследуемую мишень ограничивали два фактора: чрезмерный ее разогрев, а также необходимость обеспечения надежной совместной работы других внутренних мишеней и медленного вывода пучка протонов. Средняя интенсивность протонов, сбрасываемых на исследуемую мишень, составляла $\sim 7 \cdot 10^9$ протонов/цикл. При этом ускоренные до энергии 50 ГэВ протоны в течение каждого цикла многократно (~2000 раз) пересекали мишень (сборку из двух тонких фольг), что эквивалентно интенсивности при однократном падении на мишень $\sim 1.4 \cdot 10^{13}$ протонов/цикл. В сеансе работы ускорителя У-70 контроль за сбросом протонов на мишень осуществлялся детектором черенковского излучения (радиатор из свинцового стекла, сочлененный с фотоумножителем ФЭУ-85), регистрирующим вторичные заряженные частицы от неупругих взаимодействий протонов с ядрами вышеуказанной мишени под углом $\sim 30^\circ$ [4]. Детектор был установлен в коллиматоре боковой защиты ускорителя (нулевая ветка канала № 6) и включен в систему автоматизированного радиационного контроля У-70 [5].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРОТОНОВ НА МИШЕНИ ЗА ЭКСПОЗИЦИЮ

Число протонов, прошедших мишень, измерено по числу радиоактивных ядер ^{22}Na , образующихся в мониторинговой алюминиевой фольге. Толщина алюминиевой фольги определялась путем взвешивания и составила 5.7 ± 0.1 мкм. Нуклид ^{22}Na образуется на протонах в реакции $^{27}\text{Al}(p, 3p3n)^{22}\text{Na}$. Сечение σ этой реакции является опорным для последующих вычислений и оценок сечений образования радионуклидов протонами на ядрах

меди. Используемое нами значение сечения данной реакции при энергии протонов $E_p = 50$ ГэВ принято равным $\sigma = 10.6 \pm 0.9$ мб [6].

Число ядер ($N_{\text{акт.яд.}}$) радионуклида ^{22}Na в мониторинговой фольге, образуемых при взаимодействии протонов с мишенью, определяется по формуле:

$$N_{\text{акт.яд.}} = I_{\Sigma} N_0 \sigma \Delta x, \quad (1)$$

где σ – сечение реакции, I_{Σ} – число протонов за экспозицию, Δx – толщина мишени, N_0 – число ядер ^{27}Al в 1 см^3 мишени.

С другой стороны, активность C радионуклида ^{22}Na связана с числом радиоактивных ядер $N_{\text{акт.яд.}}$ соотношением

$$C = N_{\text{акт.яд.}}/\tau, \quad (2)$$

где $\tau = T_{1/2}/\ln 2$; $T_{1/2} = 2.605$ года – период полураспада радионуклида ^{22}Na .

Таким образом, используя формулы (1) и (2), можно определить число протонов за экспозицию. Заметим, что аналогичный подход был реализован при расчете сечений образования долгоживущих радионуклидов на меди.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Измеренная с помощью полупроводникового γ -спектрометра активность нуклида ^{22}Na в алюминиевой фольге, приведенная к времени окончания экспозиции, составила 7600 ± 400 Бк. По соотношениям (1) и (2) было определено, что через медную фольгу толщиной 50 мкм прошло $(2.50 \pm 0.25) \cdot 10^{18}$ протонов. Выбывание нуклида ^{22}Na из алюминиевой фольги, по нашим оценкам, составило ~1% и частично компенсировалось их добавкой из медной фольги. Для изучения распределения активности ^{22}Na по алюминиевой фольге она была разрезана на три полоски: две – шириной по 5 мм и одна – шириной 10 мм. Из ближайшей к пучку полоски шириной 5 мм была вырезана центральная часть размером 20 мм, на которую приходится 90% активности. Всего на ближайшую к пучку полоску приходится 95% активности, оставшиеся 4.5% активности приходятся на среднюю полоску шириной 5 мм и 0.5% – на полоску шириной 10 мм.

Идентификация радионуклидов и измерения активности C облученных фольг выполнены на полупроводниковом γ -спектрометрическом комплексе [7]. Активность короткоживущих радионуклидов не измерялась ввиду высокой суммарной активности радионуклидов в фольгах на момент окончания облучения. После выдержки в течение ~1 мес были измерены активности радионуклидов с периодом полураспада более 16 сут. По результатам измерений определены активности 11 долгоживущих радионуклидов, образовавшихся в результате облучения тонкой медной фольги протонами с энергией 50 ГэВ (табл. 1).

Таблица 1. Активности идентифицированных радионуклидов в медной фольге (значения приведены на конец облучения)

Радионуклид	Период полураспада, сут	Активность, Бк
⁷ Be	53.3	$8.4 \cdot 10^5 \pm 4\%$
²² Na	2.602 года	$1.5 \cdot 10^4 \pm 4\%$
⁴⁶ S	83.83	$3.0 \cdot 10^5 \pm 7\%$
⁴⁸ V	16.238	$1.3 \cdot 10^6 \pm 5\%$
⁵¹ Cr	27.704	$1.9 \cdot 10^6 \pm 12\%$
⁵⁴ Mn	312.5	$2.0 \cdot 10^5 \pm 10\%$
⁵⁹ Fe	44.529	$1.3 \cdot 10^5 \pm 6\%$
⁵⁶ Co	78.76	$2.8 \cdot 10^5 \pm 12\%$
⁵⁷ Co	270.9	$1.9 \cdot 10^5 \pm 7\%$
⁵⁸ Co	70.8	$1.2 \cdot 10^6 \pm 6\%$
⁶⁰ Co	5.271 лет	$2.3 \cdot 10^4 \pm 6\%$

Таблица 2. Сечения образования радионуклидов на ядрах меди протонами с энергией 50 ГэВ

Радионуклид	σ , мб	σ^* , мб
⁷ Be	$6.1 \pm 11\%$	10.9
²² Na	$1.4 \pm 11\%$	3.6
⁴⁶ Sc	$3.2 \pm 13\%$	6.3
⁴⁸ V	$5.3 \pm 11\%$	8.9
⁵¹ Cr	$9.3 \pm 16\%$	18.1
⁵⁴ Mn	$6.4 \pm 14\%$	17.7
⁵⁹ Fe	$0.9 \pm 12\%$	1.3
⁵⁶ Co	$2.8 \pm 16\%$	4.9
⁵⁷ Co	$5.6 \pm 13\%$	15.3
⁵⁸ Co	$10.5 \pm 12\%$	23.0
⁶⁰ Co	$4.4 \pm 12\%$	5.5

В погрешность определения активности входят статистическая погрешность скорости счета в пике полного поглощения при обработке аппаратного спектра и погрешность (3%) градуировки спектрометра по образцовым источникам γ -излучения (ОСГИ).

Суммарная удельная активность долгоживущих радионуклидов в медной фольге на конец облучения с погрешностью 8% составила $1.8 \cdot 10^7$ Бк/г.

Таблица 3. Активности и доли радионуклидов на алюминиевой фольге, перенесенные с медной фольги

Радионуклид	⁴⁶ Sc	⁴⁸ V	⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co
Активность на Al, Бк	1810	6720	8740	790	700	440	2130
Доля, %	0.60	0.50	0.46	0.40	0.25	0.23	0.18

Полученные значения активностей долгоживущих радионуклидов, образуемых на меди протонами с энергией 50 ГэВ, позволили выполнить оценку сечения образования (σ) этих радионуклидов. Результаты вычислений σ с погрешностью в процентах представлены в табл. 2. При определении погрешности, кроме названных выше, учтена также погрешность оценки сечения мониторинговой реакции ²⁷Al (*p*, *3p3n*)²²Na.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по сечениям образования радионуклидов на меди, взятые из работ [8–11], здесь же приведены полученные нами данные (залитые черным точками) для радионуклидов, перечисленных в табл. 2.

Представлялось целесообразным также сравнить наши данные с расчетными значениями сечений σ^* , полученными с помощью феноменологических аппроксимаций. Расчеты этих сечений были проведены по модели Silberberg and Tsao [12] для естественной смеси изотопов меди с содержанием 69% ⁶³Cu и 31% ⁶⁵Cu; данные представлены в третьей колонке табл. 2. В отдельных случаях (⁵⁹Fe и ⁶⁰Co) расхождение результатов эксперимента и расчетов не превышает 30%, в других – достигает до трех раз. Дальнейшее обсуждение имеющихся расхождений возможно лишь совместно с анализом самого феноменологического подхода в модели Silberberg and Tsao.

При измерении активности алюминиевой фольги, кроме ²²Na, были идентифицированы следующие радионуклиды: ⁴⁶Sc, ⁴⁸V, ⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co и ⁵⁸Co. Измеренные величины активностей этих радионуклидов (табл. 3) не могут быть объяснены активацией содержащихся в алюминиевой фольге примесей более тяжелых элементов. Согласно ГОСТ 25905-83, при изготовлении алюминиевой фольги основной примесью с более высоким атомным номером является медь, содержание которой не превышает 0.0045%. Согласно нашей оценке активации примеси меди в алюминиевой фольге, значения активностей вышеуказанных радионуклидов составляют от 0.01 до 10 Бк, что на несколько порядков ниже наблюдаемых (см. табл. 3). Скорее всего, эти радионуклиды перенесены с медной фольги на алюминиевую. Как видно из табл. 3, доля перенесенных с медной фольги радионуклидов уменьшается с ростом их атомной массы.

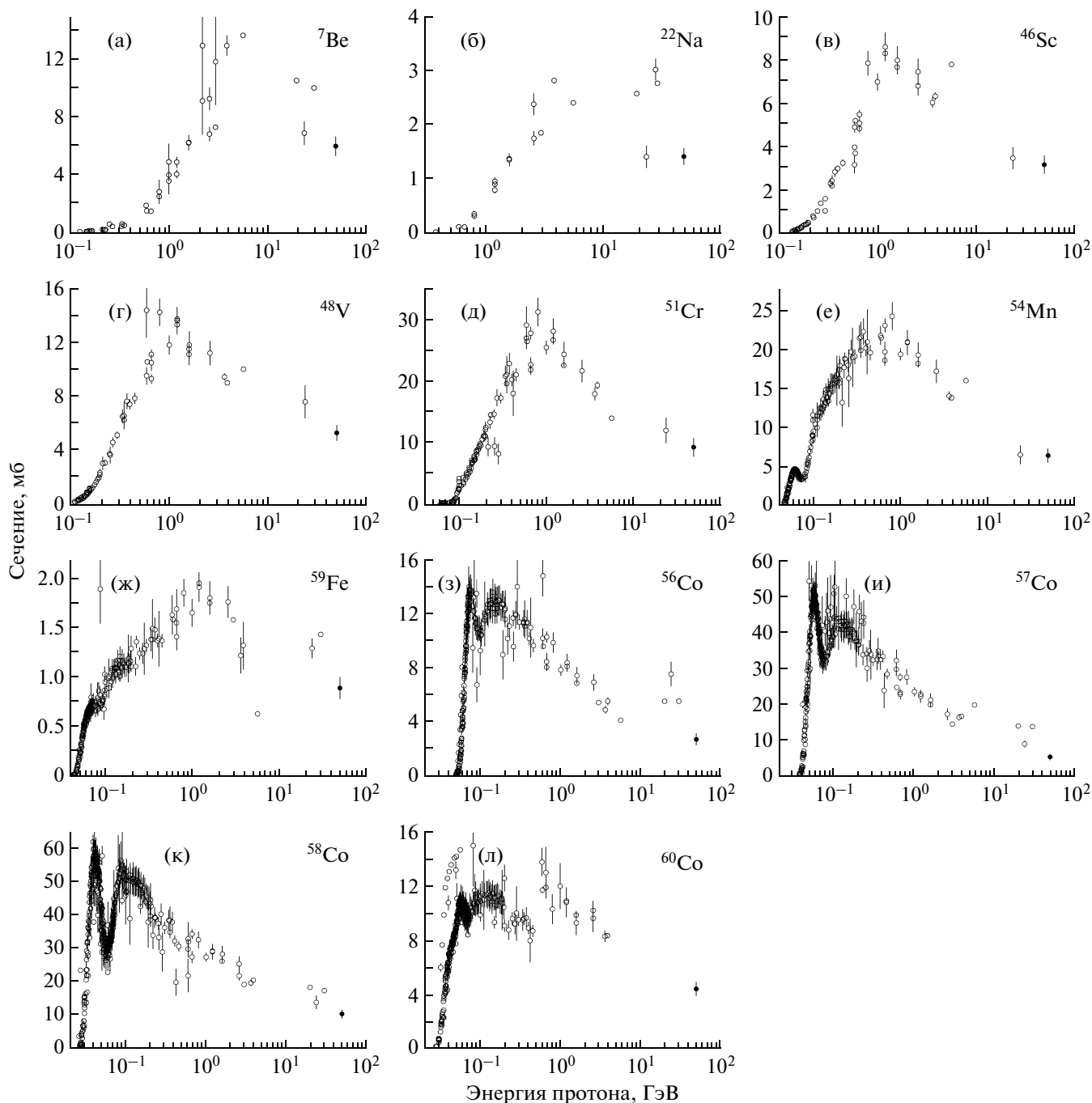


Рис. 2. Зависимости сечений образования различных радионуклидов на меди от энергии протонов: светлые точки – данные работ [8–11]; черные точки – полученные нами данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования облученных пучком протонов тонких фольг получены экспериментальные оценки сечений образования вторичных радионуклидов протонами с энергией 50 ГэВ на ядрах меди. По активации алюминиевой фольги определено число протонов, прошедших через мишень (сборку из алюминиевой и медной фольг) в

вакуумной камере за сеанс работы ускорителя; измерены активности радионуклидов в фольгах; оценены сечения образования ряда радионуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ; проанализированы погрешности основных величин, используемых при расчетах сечений; внесены поправки, учитывающие временную структуру изменения интенсивности облучения образцов в течение сеанса; количественно и качественно оценен пере-

нос части радионуклидов с медной фольги на алюминиевую в вакуумной среде. Полученные данные представлены в сравнении с расчетами по модели Silberberg and Tsao и известными экспериментальными результатами при энергиях менее 50 ГэВ.

Авторы выражают благодарность Г.Е. Ворони-ну и А.В. Минченко за установку и обеспечение работы мишени; С.А. Другаченку за обеспечение непрерывной работы монитора в сеансе У-70; Ю.В. Белецкой за проведение измерений радио-активных фольг на полупроводниковом γ -спек-трометре; А.В. Санникову за полезное обсужде-ние результатов и замечания; О.В. Суманееву за предоставленные расчеты сечений образования радионуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ по модели Silberberg and Tsao.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Webber W.R., Kish J.C., Schrier D.A.* // Phys. Rev. 1990. V. C41. P. 520.
2. *Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al.* CERN/AT/95-44(ET), 1995.
3. *Dai Y., Bauer G.S., Carsughi F. et al.* //Journal of Nuclear Materials. 1999. V. 265. Issues 1-2. P. 203.
4. *Купцов С.И., Пелешко В.Н., Сумароков А.Л. и др.* Препринт ИФВЭ 2000-26. Протвино, 2000.
5. *Клюшников В.А., Купцов С.И., Пелешко В.Н.* Пре-принт ИФВЭ 2002-24. Протвино, 2002.
6. *Крупный Г.И., Снитко Д.В., Янович А.А.* //Атомная энергия. 2000. Т. 89. Вып. 5. С. 418; *Крупный Г.И., Снитко Д.В., Янович А.А.* Препринт ИФВЭ 2000-13. Протвино, 2000.
7. *Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А.* Пре-принт ИФВЭ 2000-30. Протвино, 2000.
8. *Rudstam G., Bruninx E., Pappas A.C.* // Phys. Rev. 1962. V. 126. № 5. P. 1852.
9. *Hudis J., Dostrovsky I., Friedlander G. et al.* // Phys. Rev. 1963. V. 129. № 1. P. 434.
10. *Porile N.T., Tanaka S.* // Phys. Rev. 1964. V. 135. № 1B. P. B122.
11. [http://www.nndc.bnl.gov/\(EXFOR\)](http://www.nndc.bnl.gov/(EXFOR))
12. *Silberberg R., Tsao C.H.* // ApJS. 1973. V. 25. № 220. Issue 1. P. 315.