ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 531

ОБРАЗОВАНИЕ ^{178m2}Hf ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ ГАФНИЯ ИНТЕНСИВНЫМ ПУЧКОМ γ-КВАНТОВ

В. А. Бочаров, И. Г. Гончаров, А. Н. Довбня, С. С. Кандыбей, В. И. Нога, Ю. Н. Ранюк, О. С. Шевченко

(*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина*)

E-mail: ranyuk@kipt.kharkov.ua

Излагаются результаты эксперимента по наработке ^{178m2}Hf путем воздействия интенсивного пучка тормозного излучения на естественную смесь изотопов гафния. Исследуемый образец подвергался облучению пучком электронов с энергией 30 МэВ и током 200 мкА в течение 500 ч. Спектрометрический анализ облученного образца с применением радиохимических методов разделения изотопов не обнаружил линий ^{178m2}Hf.

В начале прошлого десятилетия возникла идея исследования ядерных реакций с изомером ^{178m2}Hf в качестве мишени. Уже получен ряд интригующих результатов. Нет сомнений в перспективности этих исследований, несмотря на огромные трудности в приготовлении мишеней. В работе [1] рассмотрена возможность образования ^{178m2}Hf при воздействии потока тормозных γ-квантов на естественную изотопную смесь гафния. Работа выполнена методом компьютерного моделирования. Граничная энергия тормозного спектра составляла 30 МэВ. Генерация спектра тормозного излучения происходила в результате взаимодействия пучка электронов с вольфрамовой мишенью толщиной 0.4 см. В расчете выхода фотоядерных реакций использовались экспериментально измеренные сечения реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ на изотопах ^{179}Hf и ^{180}Hf.

Независимо от работы [1] в Харькове был начат эксперимент, конечная цель которого была та же самая — определение количественных характеристик образования изомера ^{178m2}Hf в фотоядерных реакциях в области гигантского резонанса. Активация образца гафния осуществлялась на электронном линейном импульсном ускорителе КУТ-20 Харьковского физико-технического института. Этот ускоритель традиционно используется как активационный стенд при проведении радиационных, материаловедческих, стерилизационных и других работ.

В конце 2003 г. гафниевая пластинка вместе с другими образцами была помещена в контейнер для облучения. Электронный пучок попадал на вольфрамовую пластину толщиной 2 мм, предназначенную для генерации тормозного излучения. За ней располагалась исследуемая пластинка гафния толщиной 0.8 мм, а за ней в том же контейнере находились другие образцы, предназначенные для облучения. Содержимое контейнера охлаждалось проточной водой. Контейнер в течение 500 ч находился под воздействием пучка электронов с энергией 30 МэВ и током 200 мкА. 15 января 2004 г. облучение было прекращено.

Спектрометрический анализ облученного образца гафния проводился с помощью Ge(Li) спектрометра с энергетическим разрешением 2.5 кэВ для энергии 1333 кэВ.

Из-за чрезмерно высокой активности образца первые измерения были проведены через 4 мес после окончания облучения. При этом образец располагался на расстоянии 2.4 м от поверхности детектора.

Время измерения составило 30 мин. В спектре доминировали три линии:

1) 343 кэВ (квантовый выход $I_\gamma = 84\%$) и 433 кэВ ($I_\gamma = 1.4\%$), принадлежащие изотопу ^{175}Hf с периодом полураспада $T_{1/2} = 70$ сут, образовавшемуся в реакции $^{176}\mathrm{Hf}(\gamma, n)^{175}\mathrm{Hf} \to {}^{175}\mathrm{Lu}$ (стаб.);

2) 482.2 кэВ ($I_\gamma = 80\%$), принадлежащая изотопу ^{181}Hf с $T_{1/2} = 42.4$ сут, образовавшемуся в реакции $^{180}\mathrm{Hf}(n, \gamma)^{181}\mathrm{Hf} \to {}^{181}\mathrm{Ta}$ (стаб.).

В измерениях пришлось сделать двухлетний перерыв. На рис. 1 приведен γ-спектр, измеренный 18 мая 2006 г., время измерения 100 мин, расстояние от образца до поверхности детектора 10 см. В спектре обнаружилось большое количество радиоактивных изотопов, среди которых ^{172}Hf ($T_{1/2} = 1.87$ лет), ^{172}Lu ($T_{1/2} = 6.7$ сут) и ^{173}Lu

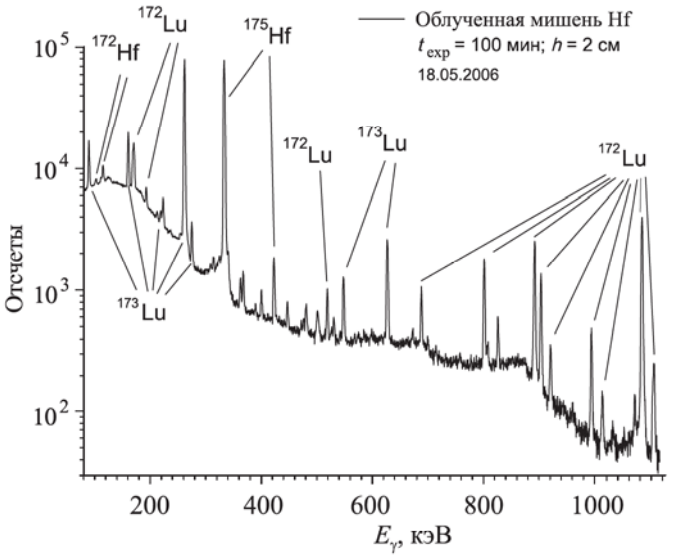

Рис. 1. Спектр излучения облученного образца гафния, измеренный через 2 года и 4 месяца. После окончания облучения

($T_{1/2} = 1.37$ лет), образовавшихся в реакциях и распадах:

1) $^{174}\mathrm{Hf}(\gamma, n)^{173}\mathrm{Hf}$ (23.6 суток) $\rightarrow$ $^{173}\mathrm{Lu}$ (1.37 лет) $\rightarrow$ $^{173}\mathrm{Yb}$ (стаб.);

2) $^{174}\mathrm{Hf}(\gamma, 2n)^{172}\mathrm{Hf}$ (1.87 лет) $\rightarrow$ $^{172}\mathrm{Lu}$ (6.7 суток) $\rightarrow$ $^{172}\mathrm{Yb}$ (стаб.).

Обнаружить γ-линии, принадлежащие $^{178m2}\mathrm{Hf}$, в этом измерении не удалось.

Таким образом, спектр оказался заполненным линиями долгоживущих изотопов, дожидаться существенного распада которых пришлось бы долго. Поэтому было принято решение обратиться к радиохимическим методам разделения элементов лютеция и гафния. Такая операция была выполнена, в настоящей работе мы не будем останавливаться на ее изложении. Спектры γ-излучения разделенных элементов представлены на рис. 2 и 3.

В спектре на рис. 2 видны линии радиоизотопов Hf, которые присутствовали в неразделенном образце, а также изотопа $^{172}\mathrm{Lu}$, который успел появится после радиохимического разделения в результате распада $^{172}\mathrm{Hf}$. Видны также линии 343 кэВ ($I_\gamma = 84\%$) и 433 кэВ ($I_\gamma = 1.4\%$) с $T_{1/2} = 70$ сут, принадлежащие изотопу $^{175}\mathrm{Hf}$. Линии $^{178m2}\mathrm{Hf}$ в гафниевой фракции по прежнему отсутствуют.

В спектре на рис. 3 наблюдаются только линии радиоизотопов $^{172}\mathrm{Lu}$ и $^{173}\mathrm{Lu}$.

На рис. 4 изображены участки спектров 2 и 3, близкие к линии изомера $^{178m2}\mathrm{Hf}$ 574.2 кэВ ($I_\gamma = 88\%$), которая обозначена вертикальной прямой. Визуально эта линия в спектрах не просматривается. Анализ полученных спектров с привлечением данных об эффективности детектора и характеристиках распада свидетельствует о том, что если в облученной мишени и накопились атомы $^{178m2}\mathrm{Hf}$,

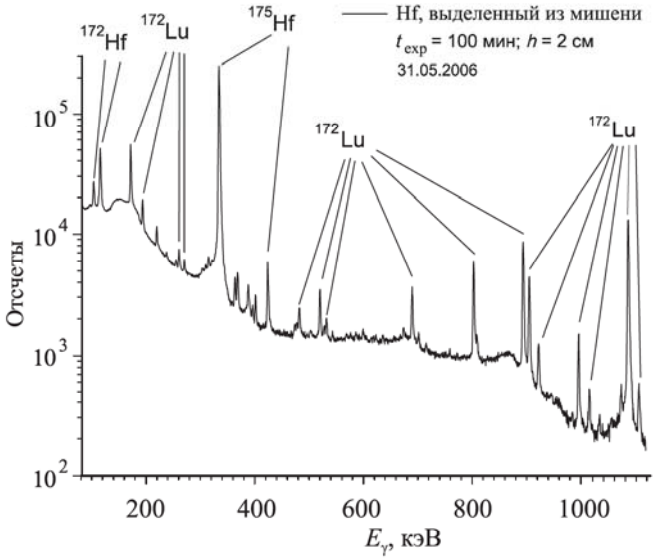

Рис. 2. Спектр излучения фракции гафния

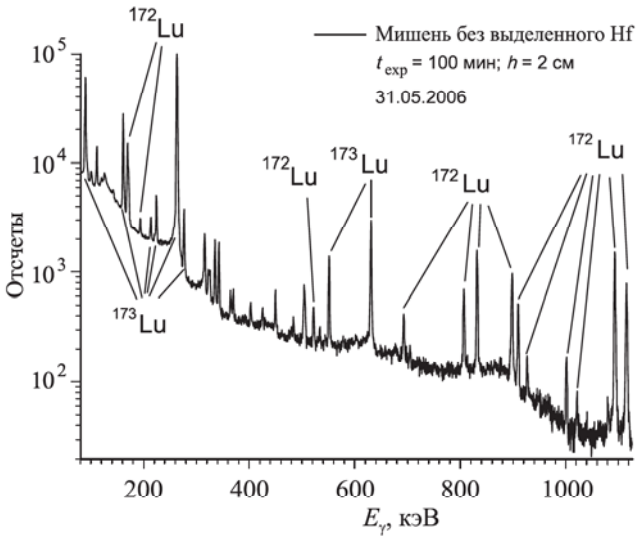

Рис. 3. Спектр излучения фракции лютеция

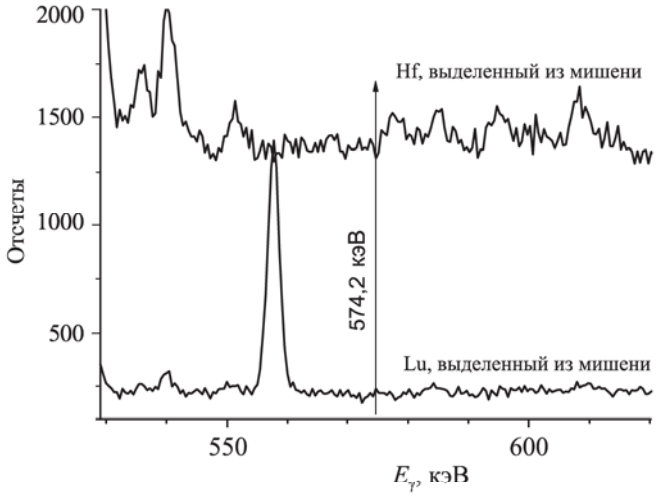

Рис. 4. Спектры излучения фракций гафния и лютеция вблизи энергии наиболее интенсивной линии $^{178m2}\mathrm{Hf}$, обозначенной вертикальной линией

Сравнительная таблица исходных данных и результатов настоящей работы и работы [1]

	Настоящая работа	Расчет [1]
Энергия электронов	30 МэВ	30 МэВ
Ток электронов	0.2 мА	10 мА
Время облучения	20 сут	30 мес
Толщина радиатора	2 мм, W	4 мм, W
Толщина мишени	10^{21} ядер/см^2	10^{22} ядер/см^2
Образовалось атомов ^{178}Hf	$2.8 \cdot 10^{16}$, расчет [1]	$6.2 \cdot 10^{20}$
Образовалось атомов ^{178m2}Hf	$< 4.5 \cdot 10^9$	
Изомерное отношение	$< 1.6 \cdot 10^{-5}$%	

то их меньше, чем $4.5 \cdot 10^9$. Изотопы стабильного ^{178}Hf в эксперименте наблюдаться не могли. Произвести корректные сравнения полученных нами результатов с расчетами работы [1] у нас нет возможности, поскольку в расчетах Ишханова и др. был определен выход стабильного изотопа ^{178}Hf, в нашем же эксперименте был определен выход изомера ^{178m2}Hf (таблица).

Остается открытым вопрос о величине изомерного отношения. Обычно это отношение считается равным 2–5%. В этом случае, как утверждают авторы работы [1], «следует ожидать достаточно большой выход изомера». В нашем эксперименте изомерное отношение оказалось меньше $1.6 \cdot 10^{-5}$.

Литература

1. *Ишханов Б.С., Лютиков И.А., Павлов С.И.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 6. С. 25.
2. *Гончаров И.Г., Довбня А.Н., Ранюк Ю.Н., Шевченко О.С.* // Украинский физический журнал. 2007. **52**, № 9. С. 823.
3. *Karamian S.A., Carrol J.J., Adam J., Demekhina N.A.* // JINR Preprint. E1-2004-36. Dubna, 2004 (препринт ОИЯИ. Дубна, 2004).

Поступила в редакцию
26.06.2007