

КУМУЛЯТИВНІ ВИХОДИ УЛАМКІВ ФОТОПОДІЛУ ^{237}Np ПРИ МАКСИМАЛЬНІЙ ЕНЕРГІЇ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 9.5 МЕВ

О.О. Парлаг

Інститут електронної фізики НАН України,
88000, м. Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна
parlag@mail.uzhgorod.ua

Методом напівпровідникової гамма-спектрометрії проведено виміри кумулятивних виходів уламків фотоподілу ^{237}Np при максимальній енергії гальмівного випромінювання ~ 9.5 MeV

Вступ

В останні роки спостерігається підвищений інтерес до дослідження фотоядерних реакцій, зокрема процесу фотоподілу актинідних ядер. Існуючі бази експериментальних даних по масовим спектрам уламків фотоподілу не задовольняють потреб, як у плані розвитку модельних уявлень, так і для прикладного застосування. Історично так склалося, що більшість даних, які характеризують процес поділу, отримані в реакціях з нейтронами і зарядженими частинками. Саме тому виникає необхідність одержання нових експериментальних даних про характеристики фрагментів фотоподілу актинідних ядер.

Особливий інтерес у плані експериментальних досліджень масових спектрів уламків фотоподілу актинідних ядер становить ^{237}Np , для якого існують дані лише в діапазоні енергій гальмівних фотонів від 14 до 30 MeV [1–5]. Такі дослідження, зокрема, проводилися на бетатроні та лінійному прискорювачі Санкт-Петербурзького технологічного інституту (Росія) при максимальних енергіях гальмівного випромінювання 14.0; 25.0 та 28.0 MeV [1, 2], на лінійному електронному прискорювачі Токійського університету (Японія) при 20.0 та 30.0 MeV [3,4] і мікротроні М-30 ІЕФ НАН України при 17.5 MeV [5]. Ідентифікація уламків поділу та визначення їх кумулятивних виходів в цих роботах [1–5] проводилося методом напівпровідникової гамма-спектрометрії.

В цій області енергій крім реакції поділу (γ, f) відкриваються канали реакцій (γ, nf), ($\gamma, 2nf$), так званого емісійного поділу – поділу ядра з попередньою емісією декількох нейтронів, що призводить до утворення суміші подільних ядер і спотворення масових спектрів уламків поділу [6]. Поріг реакції (γ, nf) для ^{237}Np дорівнює ~ 12.2 MeV [7]. Тому проведення експериментальних досліджень по вивченню масових розподілів продуктів фотоподілу ^{237}Np гальмівними фотонами з енергіями до порогу реакції (γ, nf) – надзвичайно актуальне.

У роботі представлено результати вимірів кумулятивних виходів уламків фотоподілу ^{237}Np при максимальній енергії гальмівного випромінювання ~ 9.5 MeV.

Експериментальна частина

Визначення кумулятивних виходів уламків фотоподілу ^{237}Np здійснювався методом напівпровідникової гамма-спектрометрії [8-10].

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися шість мішеней, які являли собою диски оксиду ^{237}Np з діаметром активного шару 11.5 мм і товщиною 20 мкм, і які були нанесені на нікелеві підложки діаметром 30 мм. Домішки ізотопів ^{238}Pu та ^{239}Pu в мішені становили $2 \cdot 10^{-9}$ та $6 \cdot 10^{-7}$ г відповідно. Маса ^{237}Np на дисках знаходилася в межах 963 – 1193 мкг.

Активация подільних мішеней проводилася на електронному прискорювачі – мікротроні М-30 Інституту електронної фізики НАН України при енергії 9.46 ± 0.04 МеВ. Енергія електронів визначалася шляхом вимірювання ведучого магнітного поля мікротрону методом ядерного магнітного резонансу і частоти електромагнітної хвилі магнетрона. Нестабільність енергії електронів в процесі опромінення мішеней не перевищувала 0,04 МеВ.

Опромінення подільних збірок проводилася на віддалі 50 мм від гальмівної мішені прискорювача при струмі пучка 5–8 мкА. У якості гальмівної мішені використовували танталову пластину товщиною 1 мм. Час активації становив від 3 до 6 годин.

При проведенні досліджень проводився контроль чистоти пучка гальмівного випромінювання на наявність в ньому теплових нейтронів активаційними детекторами з ванадію. Оскільки переріз реакції ізотопу $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$, найхарактернішої домішки ^{237}Np , становить ~ 700 бн. Оцінка нейтронного потоку проводилася по аналітичній лінії 1434.06 кеВ ізотопу ^{52}V (його період напіврозпаду = 3.74 хвилини), утвореного в реакції $^{51}\text{V}(n_{\text{th}},\gamma)^{52}\text{V}$.

Уламки фотоподілу накопичувалися алюмінієвими фольгами–колекторами товщиною 0.1 мм, які встановлювалися перед шаром подільного матеріалу мішені. По закінченні накопичення уламків проводилися виміри їх гамма-активності. Виміри проводилися на протязі 1–80 годин. Час вимірів становив від 0.5 до 1.5 годин.

Виміри гамма-спектрів уламків поділу проводилися на спектрометричному комплексі “ORTEC” з HPGe–детектором об'ємом 150 см^3 . Відносна енергетична роздільна здатність спектрометра не перевищувала 0.5 % для лінії ^{60}Co – 1333 кеВ. Абсолютна ефективність реєстрації гамма-квантів визначалася за допомогою набору стандартних джерел “ОСГР” з статистичною похибкою 3 %, згідно [11] і задавалася співвідношенням для області енергій гамма-квантів $E > 120 \text{ кеВ}$ $K(E) = A + B \ln(E)$. Значення параметрів А і В, які відповідали опису калібровоч-

них даних з точністю не більше 3%, дорівнюють -0.847 і 2.736 відповідно.

Абсолютна ефективність реєстрації гамма-квантів також визначалася з використанням гамма-випромінювання радіоактивних нуклідів у ланцюжках розпаду уламків з реакції $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ [10]. Це дозволило суттєво спростити сам процес калібровки методики вимірів та врахувати реальну геометрію при вимірюванні гамма-спектрів.

Під час проведення вимірів постійно здійснювався контроль дрейфу енергетичної шкали, роздільної здатності та ефективності реєстрації спектрометричного комплексу за допомогою точкових стандартних гамма-активних джерел ^{57}Co та ^{60}Co . Дрейф вказаних параметрів не перевищував 0.5 %.

Статистична похибка виміру інтенсивності піків повного поглинання індукованих уламками поділу, які використовувалися в процесі аналізу, не перевищувала 3 – 5 %.

Ідентифікація уламків поділу проводилася по енергіях гамма-квантів, які ними випромінюються. При проведенні вимірів враховувалися періоди напіврозпаду досліджуваних ізотопів – уламків та їх попередників – ізобар, час їх накопичення, охолодження та виміру.

Чисельні значення ядерно-фізичних характеристик – періодів напіврозпаду, енергій гамма-ліній та їх квантових виходів для нуклідів-уламків поділу бралися з [12].

В процесі експерименту була проведена ідентифікація гамма-піків повного поглинання, які належать наступним уламкам: $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{88}Kr , ^{91}Sr , $^{91\text{m}}\text{Y}$, ^{92}Y , ^{97}Zr , ^{97}Nb , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{105}Rh , ^{129}Sb , ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{139}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce . Кумулятивні виходи визначалися відносно виходів уламків-реперів ^{132}Te (228.2 кеВ) та ^{133}I (529.9 кеВ).

Значення відносних кумулятивних виходів уламків, отриманих для вказаних реперів, узгоджувалися між собою з точністю не гірше 1%.

Сумарна похибка оцінювалася з врахуванням статистичних похибок інтен-

вності піків повного поглинання, аналізу часових залежностей, розкиду усереднених по окремих дослідах значень, похибок інтерпольованих значень ефективності та ядерно-фізичних констант (квантових виходів гамма-ліній, періодів напіврозпаду). Сумарна похибка визначення кумулятивних виходів уламків поділу становила 7 - 12 %.

Результати досліджень

Результати експериментальних досліджень кумулятивних виходів уламків фотоподілу ядра ^{237}Np при максимальній енергії гальмівного випромінювання 9.5 MeV представлені на рисунку 1 чорними точками. Тут же, приведені кумулятивні виходи уламків фотоподілу ^{237}Np : при енергіях 14 MeV [1] – крива з трикутниками і 28 MeV [2] – крива з ромбами.

Масовий розподіл є симетричним по відношенню до масового числа ~ 117 , що відповідає емісії в середньому трьох нейтронів на акт поділу. Це значення узгоджується з оціночним числом ~ 3.15 , отриманим на основі систематизації середнього числа нейтронів для випадку фотоподілу ^{237}Np [2].

Проведено аналіз параметрів мас-асиметричних мод Standart1 та Standart2 піку важких уламків масового розподілу подільного ядра ^{237}Np в рамках моделі поділу Brosa [13,14]. Пік важких уламків масового спектру описувався сукупністю двох гаусіанів з шістьма незалежними параметрами. Розрахунки проводилися програмою "MINUIT" з бібліотеки ЦЕРНу. Основний вклад у масовий спектр вносять компоненти локалізовані навколо середніх мас $\bar{A}_{SI} \sim 133.9$ а.о.м. і $\bar{A}_{SII} \sim 137.6$ а.о.м., і які відповідають мас-асиметричним модам Standart I та Standart II. Їхні значення співпадають в межах похибки з результатами аналізу ($\bar{A}_{SI} \sim 134.5$ а.о.м. та $\bar{A}_{SII} \sim 136.9$ а.о.м.), проведеними в роботі [2], для реакції $^{237}\text{Np}(\gamma, f)$ при енергії 28 MeV.

У рамках моделі [12,13], пов'язаної з наявністю виділених долин на поверхні потенціальної енергії подільного ядра у всій області деформацій від сідлової точ-

ки до точки розриву, ці компоненти переважають в масовому спектрі. Вага кожної компоненти визначається вірогідністю заселення відповідної долини. Їхні відносні долі у масовому спектрі складають $\sim 7\%$ і $\sim 78\%$.

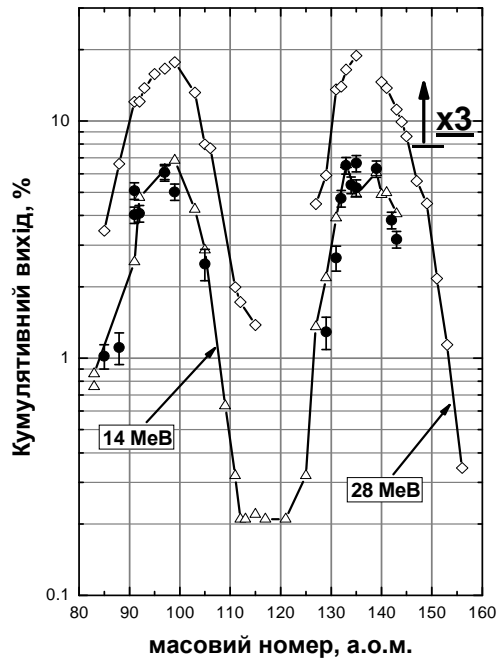


Рис.1. Кумулятивні виходи уламків фотоподілу ядра ^{237}Np при максимальних енергіях гальмівного випромінювання 9.5 MeV (чорні точки), 14 MeV (крива з трикутниками) і 28 MeV (крива з ромбами).

Однак, треба відмітити, що результати розрахунків не дозволяють поточно описати масовий спектр постнейтронних виходів важких уламків подільного ядра ^{237}Np при розглянутій енергії гальмівних фотонів 9.5 MeV (енергія збудження ~ 7.6 MeV). Це пов'язано з тонкою структурою масового спектру уламків поділу. При проведенні експериментальних досліджень по вивченню характеристик уламків поділу актинідних ядер ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{243}Am , ^{244}Cm нейтронами, встановлено наявність трьох піків на кривій масового розподілу важких фрагментів, які локалізовані у області мас 133–135, 138–140 і 143–145, завдяки присутності уламків з ядерними оболонками 82n, 86n і 88n [15].

Висновки

Методом напівпровідникової гамма-спектрометрії вперше отримані значення кумулятивних виходів уламків фотоподілу ядра ^{237}Np : $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{88}Kr , ^{91}Sr , $^{91\text{m}}\text{Y}$, ^{92}Y , ^{97}Zr , ^{97}Nb , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{105}Rh , ^{129}Sb , ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{139}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce при максимальній енергії гальмівного випромінювання ~ 9.5 МеВ. Вони добре узгоджуються з існуючими експериментальними даними та з теоретичними моделями, де процес поділу розглядається з точки зору статистичної моделі з врахуванням впливу оболонкових поправок.

Література

1. Кондратько М.Я., Коринец В.Н., Петржак К.А. и др. Выходы осколков при фотоделении ^{237}Np . // АЭ. – 1973. – Т. 35, № 3. – С. 211–213.
2. Кондратько М., Мосесов А., Петржак К. и др. Выходы продуктов фотоделения ^{237}Np . // Физика атомного ядра и элементарных частиц. Часть 2. М: ЦНИИАтоминформ. – 1983. – С. 168–172.
3. Nakamura T., Yamadera A., Kase T. et al. Product Yields for the Photofission of ^{237}Np and ^{238}U with 20 – and 30 – MeV Bremsstrahlung. // CIRIC Annual Report. – 1986. – V. 2. – P. 1–4.
4. Yamadera A., Kase T., Nakamura T. et al. Product Yields for the Photofission of ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np and ^{239}Pu . // CIRIC Annual Report. – 1988. – V. 1. – P. 1–5.
5. Парлаг О.О., Маслюк В.М., Лендел О.І., Пилипченко В.А. Виходи продуктів фотоподілу ^{237}Np при максимальній енергії гальмівного випромінювання 17.5 МеВ. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. – 2002, № 12. – С. 83–87.
6. Парлаг О.О. Масові розподіли уламків фотоподілу актинідних ядер // Зб.: Елементарні процеси в атомних системах. (ЕПАС'98). Ужгород. - 1998. – С. 161 – 167.
7. Verboven M., Jacobs E., De Frenne D. Emission of light charged particles in photon induced fission. // Phys. Rev. C. – 1994. – V. 49, No 2. – P. 991–1000.
8. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Лендел А.И, Парлаг О.А. и др. О возможности и точности измерений характеристик продуктов деления ядер методом полупроводниковой гамма-спектрометрии. // В сб.: Вопросы точности ядерной спектроскопии. Вильнюс. – 1990. – С. 143 – 148.
9. Techniques of fission yield measurements and inherent error margins // In: M. Lammer (Ed.) Compilation and evaluation of fission yield nuclear data. IAEA-TECDOC-1168. IAEA, Vienna, 2000. – P. 16 – 30.
10. Парлаг О.О., Маслюк В.Т., Лендел О.І., Пилипченко В.А. Особливості виміру кумулятивних виходів уламків фотоподілу актинідних ядер. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. – 2002, № 11. – С. 171–176.
11. G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. Third edition. John Wiley & Sons, Inc. NY. 2000. – P. 116 – 119.
12. R.B. Firestone and L.P. Ekstrum WWW Table of Radioactive Isotopes. Version 2.1, January 2004. <http://ie.lbl.gov/toi/>
13. Brosa U., Grossman S., Muller A. Nuclear Scission. // Phys. Rep. – 1990. – V. 197. – P.167–262.
14. Brosa U., Knitter H.H., Tie-shuan Fan et al. Systematics of fission-channel probabilities. // Phys. Rev. C. – 1999. – V.59, N. 2. – P.767–775.

15. Iyer R.H., Naik H., Pandey A.K., et all.
Measurement of Absolute Fission Yields
in the Fast Neutron-Induced Fission of
Actinides: ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{240}Pu ,

^{243}Am , and ^{244}Cm by Track-Etch-cum-
Gamma Spectrometry. // Nuclear Science
and Engeniering – 2000. – V. 135, N 3. –
P. 227–245.

CUMULATIVE YIELDS FOR THE PHOTOFISSION PRODUCT OF ^{237}Np WITH 9.5 MEV BREMSSTRAHLUNG

O.O. Parlag

Uzhgorod National University, Department of Nuclear Physics
9a, Kapitulna str., Uzhgorod 88000, Ukraine
E-mail: parlag@mail.uzhgorod.ua

The cumulative yields of ^{237}Np photofission at 9.5 MeV maximal bremsstrahlung energy have been investigated using the semiconductor gamma-spectroscopy.