

УДК 539.172:539.144.7

В.С. Бохінюк, О.М. Парлаг, В.А. Пилипченко

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНИХ СТАНІВ НА ІЗОТОПАХ ІНДІЮ В РЕАКЦІЯХ (γ, γ') , (γ, n)

На гальмівних пучках мікротрона М-10 і бетатрона Б 25/30 проведено дослідження реакцій (γ, γ') і (γ, n) на ізотопах індію, що приводять до утворення ізомерних станів. В області енергій 10-26 МеВ з кроком 0,5 МеВ поміряно ізомерні відношення для реакції $\text{In}^{113}(\gamma, n)\text{In}^{112\text{mg}}$ активаційною методикою. Методом реєстрації γ -квантів розпаду безпосередньо на пучку між імпульсами бетатрона поміряно абсолютний вихід $\text{In}^{114\text{m}}$ ($T_{1/2}=43$ мс), що утворюється в реакції $\text{In}^{115}(\gamma, n)\text{In}^{114}$. Розраховано ефективний переріз цієї реакції. Проведено вимірювання абсолютних виходів і розрахунки ефективних диференціальних перерізів реакцій $\text{In}^{113}(\gamma, \gamma')\text{In}^{113\text{m}}$ та $\text{In}^{115}(\gamma, \gamma')\text{In}^{115\text{m}}$.

Ключові слова: фотоядерна реакція, ізомерія, ізотопи індію, ефективний переріз.

Вступ

Ядерні ізомери концентруються, в основному, в області ядер з незаповненими зовнішніми оболонками. Дослідження фотоядерних реакцій на таких ядрах ускладнено, бо у хвильові функції, якими описуються стани ядер, дають внесок багато оболонкових конфігурацій. Більшість ізомерних станів ядер характеризуються як прості оболонкові, у формування яких залучені 1-2 неспарені нуклони ядра [1]. Зокрема, ізомерні пари $^{115\text{mg}}\text{In}$ та $^{113\text{mg}}\text{In}$ формуються протонними підоболонками $2p_{1/2}$ – $1g_{9/2}$, утворення ізомерних станів у цих ядрах можна уявляти як переміщення одного з протонів заповненої $2p_{1/2}$ -оболонки на вакансію у $1g_{9/2}$ -оболонці. Разом з тим такі стани дуже чутливі до домішок можливих інших станів (колективних, вібраційних) [2].

Мірою інтенсивності утворення метастабільних станів служить величина ізомерного відношення, яке характеризує ймовірність збудження метастабільного стану кінцевого ядра відносно основного стану. Ця величина сильно залежить як від енергії та спінів рівнів, так і від типу реакції, за рахунок якої утворюється ізомер. Той факт, що метастабільний і основний стани мають різну оболонкову структуру, робить їх чутливим

інструментом вивчення механізму збудження та розпаду електричного дипольного гігантського резонансу.

Тому дослідження утворення ізомерних станів під дією гамма-квантів привертає увагу і в даний час [2, 3].

Утворення ізомерних станів у фотоядерних реакціях на ізотопах індію досліджувалось у ряді робіт [4-9]. У [4] отримано ізомерне відношення (ІВ) виходу реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112}\text{In}^{\text{mg}}$ при енергії 30 МеВ: $\text{ІВ}=4.0\pm 0.5$. Для цієї ж реакції на лінійному прискорювачі електронів отримано ізомерні відношення при енергіях 20, 30, 40 МеВ, які становлять 1,9, 2,37 і 2,5 відповідно. [5]

Аналіз робіт по дослідженню (γ, γ) -реакцій в області до 16 МеВ, приведений у [6, 7], вказує на наявність в перерізі одного піку при енергії 8-9 МеВ величиною біля 1-2 мбн. Цей максимум обумовлений ростом повного перерізу фотопоглинання зі збільшенням енергії збудження ядра. Вище порогу реакції (γ, n) нейтронна емісія стає більш ймовірною, ніж фотонна, тому переріз швидко спадає, формуючи згаданий пік.

Дослідження ж реакції (γ, γ') на ядрах ^{89}Y , ^{197}Au [8] показали наявність другого максимуму в області енергій відповідно 17 і 14 МеВ, що природно пояснити резонанс-

ним поглинанням дипольних гамма-квантів. Другий максимум спостерігався і для ядер ^{103}Rh та ^{107}Ag , але зміщений до енергії близько 21 МеВ.

Так як в жодній з розглянутих робіт не проведені дослідження перерізів в енергетичній області, що охоплювала б положення обох піків, то авторами [9] роботи були зшиті результати виходів реакції $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$, отримані на ЛПЕ ІЯД АН СРСР (13-46 МеВ), з даними вимірювань на мікротроні Ужгородського відділення ІЯД АН УРСР (4-14 МеВ). На отриманій із цього виходу енергетичній залежності перерізу спостерігається лише один гострий пік з максимумом при 9 МеВ.

Зростання виходів в області 15- 30 МеВ дало можливість авторам зробити висновок, що і переріз в цій області мав би відрізнятися від нуля.

Тому, незважаючи на значний обсяг інформації про формування ізомерів на ізотопах індію, існує необхідність уточнення експериментальних даних. Це особливо актуально на даний час з огляду на перспективу досліджень з використанням мішеней та іонних пучків з ядрами в ізомерних станах [1, 2].

З цією метою у даній роботі проведено цикл вимірювань виходів (γ,γ') - і (γ,n) -реакцій на ізотопах індію в області енергій гігантського дипольного резонансу та енергій, прилеглих до нього.

Методика експерименту

Спектроскопічні характеристики ізоотопів індію подані у таблиці 1 [11].

У всіх дослідженнях використовувались зразки із природної суміші ізоотопів індію.

При опроміненні зразків як джерела γ -квантів використано:

а) мікротрон М-10 – область енергій 6-9 МеВ.

б) бетатрон Б25/30 – область енергій 11-25 МеВ.

Доза опромінення визначалась по прохідній іонізаційній камері яка калібрувалась з допомогою абсолютної

Спектроскопічні характеристики ізоотопів індію

Ізотоп	Jg	Jm	T _{1/2}	E _γ , кеВ	Квант. вихід
In ¹¹⁵	9/2+	1/2-	4.48 год	336	46
In ¹¹⁴	5+	8-	43 мс	310	42
In ¹¹³	9/2+	1/2-	1.67 год	392	64
In ¹¹²	1+	4+	20.9 хв	155	13

товстостінної алюмінієвої камери.

Розрахунки абсолютних виходів реакцій і ізомерних відношень проводились по формулах, приведених у [12, 13]. Ефективний переріз реакції розраховувався методом Пенфольда-Лейса по програмі КРОС [12].

Реакція $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$

Вимірювання виходу цієї реакції проведено в інтервалі енергій 7-25 МеВ з кроком 0,5 - 1 МеВ. Часи опромінення і вимірювання становили 10–50 хвилин, час охолодження 2–90 хв.

Так як $^{115\text{m}}\text{In}$ може утворюватись і за рахунок реакції (n, n') тому враховувалось вклад від фонових фотонейтронів.

На рис. 1 приведено залежність ефективного перерізу від енергії гамма-квантів.

Спостерігаються 2 максимуми. Перший – при енергії 10 МеВ (область порогу реакції $^{115}\text{In}(\gamma,n)^{114}\text{In}$), другий – при енергії 21 МеВ. Це узгоджується з результатами [8], але суперечить даним робіт [9], де стверджується, що існує лише один максимум у районі 9–10 МеВ, а вже, починаючи з 12 МеВ, переріз у межах похибок стає рівним нулю. Щодо першого максимуму, то отримані нами результати непогано узгоджуються з даними роботи [6], де максимальне значення перерізу 1,8 мбн, досягається при енергії 9,5 МеВ.

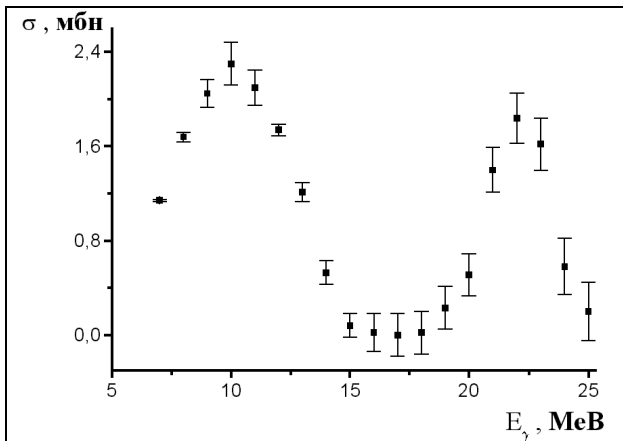


Рис 1. Залежність диференціального перерізу реакції $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ від енергії.

Реакція $^{113}\text{In}(\gamma,\gamma)^{113\text{m}}\text{In}$

Через те, що для вимірів використовувались зразки із природної суміші ізотопів, область дослідження цієї реакції обмежено енергією 17 MeV, бо конкуруюча реакція $^{115}\text{In}(\gamma,2n)^{113\text{m}}\text{In}$ має поріг 16,73 MeV. На рис. 2 приведено енергетичну залежність ефективного перерізу цієї реакції.

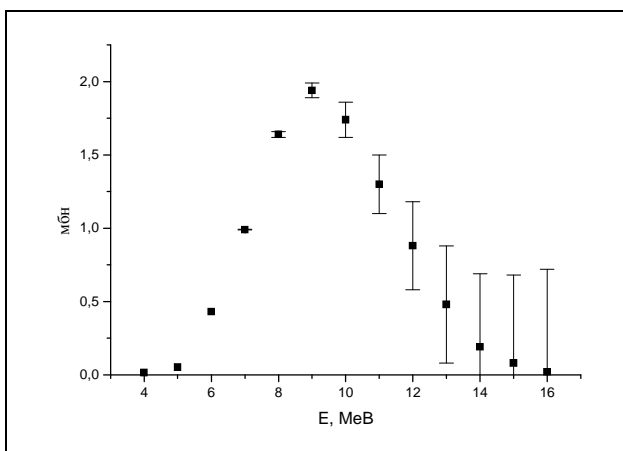


Рис. 2. Залежність диференціального перерізу реакції $^{113}\text{In}(\gamma,\gamma)^{113\text{m}}\text{In}$ від енергії.

На рис. 3 приведено також відношення виходу $^{113\text{m}}\text{In}$ до виходу $^{115\text{m}}\text{In}$. Як видно, в області енергій 7-17 MeV воно менше 1, при цьому дещо зростає в інтервалі 7-9,5 MeV, у межах похибок стає в інтервалі 9,5-15 MeV і трохи спадає до 17 MeV. Різде зростання після 17 MeV пояснюється внеском уже згаданої реакції $^{115}\text{In}(\gamma,2n)^{113\text{m}}\text{In}$.

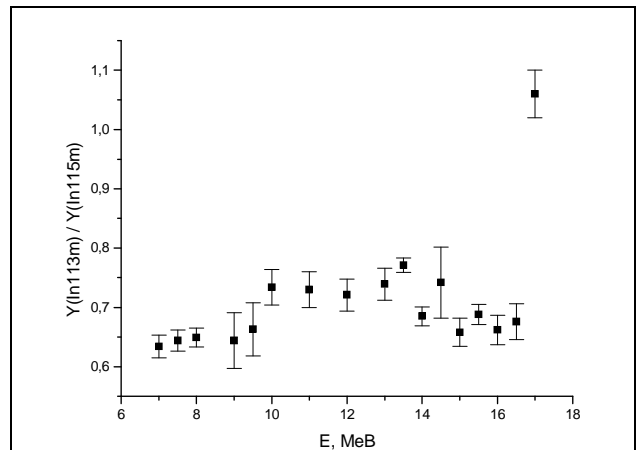


Рис. 3. Залежність відношення виходу $^{113\text{m}}\text{In}$ до виходу $^{115\text{m}}\text{In}$ від енергії.

Реакція $^{113}\text{In}(\gamma,n)^{112\text{m}}\text{In}$

В області енергій 10-26 MeV виміряно ізомерне відношення виходу реакції $^{113}\text{In}(\gamma,n)^{112\text{m}}\text{In}$. Виміри проведено з кроком 0,5 MeV. Поріг цієї реакції 9,43 MeV. Ізомерний стан ядра $^{112\text{m}}\text{In}$ розпадається з періодом напіврозпаду 20,7 хв., випромінюючи γ -кванти з енергією 155 кеВ, квантовий вихід 13 %. β^+ -розпад основного стану ($T_{1/2} = 14.4$ хв.) супроводжується випромінюванням γ -квантів з енергіями 511, 606, 618 кеВ, квантові виходи яких 44, 1,2, 5,3 % відповідно. Часи опромінення і вимірювання становили 10–20 хв., а охолодження 5-10 хв.

Результати розрахунку ізомерних відношень приведено на рис. 4.

Реакція $^{115}\text{In}(\gamma,n)^{114\text{m}}\text{In}$

Особливістю дослідження цієї реакції є те, що утворений ізомер $^{114\text{m}}\text{In}$ має період напіврозпаду 43 мс. Тому реєстрація γ -квантів розпаду з $E_\gamma = 310$ кеВ проводилась безпосередньо в пучку між імпульсами бетатрона з допомогою сцинтиляційного спектрометра. На час генерації пучка спектрометр запирався по модулюючій сітці фотопомножувача. Дана установка була успішно використана для вимірювання виходів і визначення ефективних перерізів фотозбудження ізомерних станів ^{88}Y , ^{206}Pb , ^{208}Bi , ^{202}Tl , періоди напіврозпаду яких лежать у мікросекундній області [12]. Особливості вимірювань і розрахун-

ків у випадку з ^{114m}In детально описані у роботі [14].

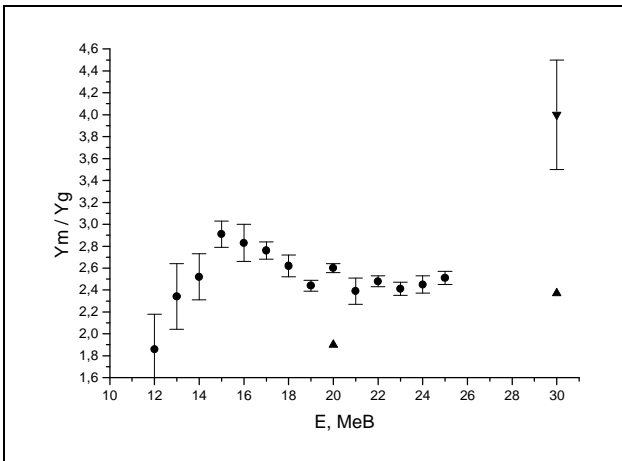


Рис. 4. Залежність ізомерного відношення Y_m / Y_g реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{gIn}$ від енергії (▲ – дані [5], ▼ – дані [4]).

На рис. 5 приведено енергетичну залежність ефективного перерізу реакції $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114m}\text{In}$

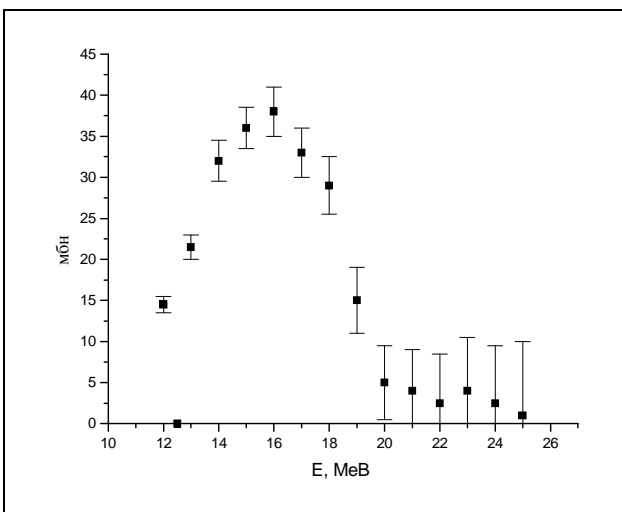


Рис. 5. Залежність диференціального перерізу реакції $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114m}\text{In}$ від енергії.

Обговорення результатів

Вимірний нами вихід реакції $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ та розрахований за ним переріз цієї реакції підтверджують наявність чіткого максимуму при енергії гамма-квантів 22 MeV. Максимум проявляється на межі гігантського дипольного резонансу з боку вищих енергій. Центр резонансу знаходиться при енергії гамма-квантів 15,8 MeV, а ширина $\Gamma \approx 5$ MeV, як це витікає з розрахунку за формулою

Лоренца [15]. У випадку перебігу реакції через проміжкове ядро, коли справедливі статистичні розрахунки, при високих енергіях збудження велика ймовірність емісії фотонейтронів практично виключає (γ, γ') -реакцію.

Отже, наявність максимуму при енергії гамма-квантів $E_\gamma \approx 22$ MeV свідчить про великий внесок у реакцію передрівноважних процесів, які спостерігалися і при вищих енергіях [16]. Характер передрівноважних процесів такий, що ймовірність емісії нейтронів за гігантським резонансом спадає швидше, ніж ймовірність гамма-випромінювання. Одною з можливих причин цього може бути кластерна структура ядер індію. При існуванні у ядрі більш-менш стійких кластерів гамма-кванти можуть передавати енергію кластерові як цілому. При цьому зменшується ймовірність зосередження значної енергії на окремому нейтроні, а, значить, і його вилітання з ядра.

Енергетичний хід перерізу реакції $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113m}\text{In}$, розрахованого за одержаним виходом до $E_{\gamma\text{max}} = 16$ MeV, подібний до перерізу на ^{115}In . Було б цікаво поширити вимірювання в область очікуваного другого максимуму.

Відношення виходу ізомера ^{113m}In (64 нейтрони) до виходу ^{115m}In (66 нейтронів) показує (рис. 3), що вихід першого систематично нижчий від виходу другого. Це, можливо, пов'язане з кореляцією величин ізомерних відношень із заселеністю нейтронної 1f9/2-підоболонки. У залежності відношення виходів від енергії, як видно, намічається структура: зростання відношення до 9,5 MeV і спад від 13,5 MeV. Однак, для точніших висновків бажано провести як виміри на розділених ізотопах індію, так і відповідні теоретичні розрахунки.

Виміряні в даній роботі ізомерні відношення для реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{gIn}$ (рис. 4) більше відповідають даним роботи [5], ніж [4]. У роботі [16] одержано суттєво вищі, ніж на рис. 4, значення ізомерних відношень при енергіях 11-12 MeV, що, можливо, вимагає додаткових експериментальних зусиль.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гангрский Ю.П. Редкие способы радиоактивного распада осколков деления. ЭЧАЯ, т.38, вып. 6, 2007, С. 1413-1447.
2. Walker P.M., Carrol J.J. Nuclear isomers: Recipes from the Past and Ingredients for the Future. Nuclear Physics News, 17, №2, 2007, P. 11-15.
3. Carrol J.J., Byrd M.J., Sinor T.W. Photo-excitation of nuclear isomers by (γ, γ') -reactions. Phys. Rev. V. 43, N3. 1991, P. 1238-1247.
4. Давыдов М.Г., Магера В.Г., Трухов А.В. Изомерные отношения выходов фотоядерных реакций. Атомная энергия, т.62, вып. 4, 1987, С. 236-243.
5. Демехина Н.А., Данагулян А.С., Карапетян Г.С. Анализ изомерных отношений в (γ, n) - и (γ, p) -реакциях в области гигантского резонанса. ЯФ, 2002, т.65, вып. 2, С. 390-395.
6. Мазур В.М., Соколюк И.В., Биган З.М. Сечение возбуждения ядерных изомеров в реакциях (γ, γ') в области 4– 15 МэВ. ЯФ, 1993, т.56, вып. 1, С. 20-25.
7. Биган В.З., Желтоножский В.А., Кирищук В.И., Мазур В.М. и др. Возбуждение изомерных состояний ядер ^{113}In – ^{195}Au в реакциях неупругого рассеяния γ -квантов. Известия РАН, Сер. физ., 2006, т.70, С. 255-257.
8. Абрамс И., Пелекис Л. Возбуждение изомерных состояний ядер гамма-лучами. Изв. АН Латв. ССР, 1968, №1, С. 19-27.
9. Джилаван Л.З., Кучер Н.П., Рыжих Г.Г. О существовании большого пика в сечении. Стаття надійшла до редакції 3.03.2011
10. Демехина Н.А., Данагулян А.С., Карапетян Г.С. Замечания к вопросу образования изомерных состояний в (γ, γ') -реакциях в районе гигантского резонанса. ЯФ, 2001, т.64, № 10, С. 1879-1881.
11. Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. New York: Wiley, 1978. – 1523p.
12. Беседа Й.З., Саболчи Н.Т., Шабалина Л.А. Исследование короткоживущих изомерных состояний таллия и иттрия, возбуждаемых в (γ, n) -реакциях. ЯФ, 1991, т.54, вып.3, С. 609-615.
13. Бохінюк В.С., Соколюк І.В. Дослідження збудження ізомерної пари непарно-непарного ядра ^{112}In в реакції (γ, n) . УФЖ, 1999, т. 44, №3, С. 308-311.
14. Беседа Й.З., Бохінюк В.С., Шабалина Л.О. Дослідження функції збудження короткоперіодного стану індію-114. УФЖ, 1995, т. 40, №6, С. 536-538.
15. Samual S. Dietrich, Barry L. Berman. Atlas of Photoneutron Cross Section Obtained with Monoenergetic Photons. Atomic Data and Nuclear Data Tables. V.38, №2, P. 199-338 (1988).
16. Маслюк В.Т., Мазур В.М., Парлаг О.О. та ін. Дослідження механізмів збудження та продуктів розпаду високозбуджених станів важких ядер на мікротроні М-30. Звіт про науково-дослідну роботу ВФЯП ІЕФ НАНУ. Ужгород, 2005. — 156 с. – С. 15.

V.S. Bohinyuk, A.M. Parlag, V.A. Pylypchenko

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

INVESTIGATION OF THE EXCITATION OF ISOMERIC STATES FOR INDIUM ISOTOPES IN THE REACTIONS

(γ, γ') , (γ, n)

On the bremsstrahlung beam of the M-10 – microtron and B 25/30 – betatron study the reactions (γ, γ') and (γ, n) on the isotopes of indium, which lead to the formation of isomeric states. By activation technique for the energy region 10-26 MeV in steps of 0.5 MeV measured isomeric ratios for the reaction of ^{113}In (γ, n) ^{112m}In . By method of detecting the decay γ -rays directly on the betatron beam was measured absolute yield ^{114m}In ($T_{1/2} = 43$ ms), which is formed in the reaction ^{115}In (γ, n) ^{114}In . Effective cross section for this reaction was calculated. The absolute yield was measured and the effective differential cross sections for ^{113}In (γ, γ') ^{113m}In and ^{115}In (γ, γ') ^{115m}In was calculated.

Key words: photonuclear reaction, isomeric state, isotopes of indium, effective cross sections.

В.С. Бохинюк, А.М. Парлаг, В.А. Пилипченко

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ИЗОТОПАХ ИНДИЯ В РЕАКЦИЯХ (γ, γ') , (γ, n)

На тормозных пучках микротрона М-10 и бетатрона Б 25/30 проведено исследование реакций (γ, γ') и (γ, n) на изотопах индия, которые приводят к образованию изомерных состояний. Активационной методикой для области энергий 10-26 МэВ с шагом 0,5 МэВ измерены изомерные отношения для реакции $\text{In}^{113}(\gamma, n)\text{In}^{112\text{mg}}$. Методом регистрации γ -квантов распада непосредственно на пучке бетатрона измерен абсолютный выход $\text{In}^{114\text{m}}$ ($T_{1/2}=43$ мс), который образуется вследствие реакции $\text{In}^{115}(\gamma, n)\text{In}^{114}$. Рассчитано эффективное сечение этой реакции. Проведены измерения абсолютных выходов и расчеты эффективных дифференциальных сечений реакций $\text{In}^{113}(\gamma, \gamma')\text{In}^{113\text{m}}$ и $\text{In}^{115}(\gamma, \gamma')\text{In}^{115\text{m}}$.

Ключевые слова: фотоядерная реакция, изомерия, изотопы индия, эффективное сечение.