

УДК 621.384.6

ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРОВ ^{115}In И ^{113}In ПРИ ЭНЕРГИИ ДО 3,0 МЭВ**О.С. Шевченко, А.Н. Довбня, Ю.Н. Ранюк, А.А. Немашкало, И.Г. Гончаров,
В.Н. Борисенко, В.И. Нога, И.И. Шаповал, Э.Л. Купленников***Украинский Национальный Научный Центр "Харьковский физико-технический институт"*

Поступила в редакцию 16 ноября 2005 г.

Измерен выход изомерных состояний в ядрах ^{115}In и ^{113}In , образующихся в (γ, γ') реакции с помощью тормозного излучения с граничной энергией в интервале 1,0–3,0 МэВ и определены интегральные фотоактивационные сечения для некоторых промежуточных уровней. Полученные интегральные сечения анализируются совместно с данными о низкоэнергетических процессах рассеяния фотонов. Показано, что выход ^{115m}In и ^{113m}In резко возрастает в интервале граничной энергии 1,6–3,0 МэВ, что, по-видимому, обусловлено наличием интенсивных активационных уровней 1999 и 2420 кэВ для изотопа ^{115}In и 1802 и 2378 кэВ для изотопа ^{113}In .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотообразование изомеров, индий-115, индий-113, тормозное излучение, кривые выхода, интегральные сечения, активационная методика, германий-литиевый гамма детектор, электростатический ускоритель

В настоящее время наблюдается значительный интерес к исследованию возбуждения и девозбуждения ядерных изомеров в области энергии фотонов $E_\gamma \leq 3$ МэВ. Этот интерес инициирован появлением таких новых задач, как природа коллективных $M1$ [1] и $E1$ переходов с увеличенной вероятностью в тяжелых деформированных ядрах [2], возможность создания γ -лазеров [3] и ядерных квантовых генераторов [4], проблемы синтеза ядер во Вселенной и др. [5]. Наряду с фундаментальными аспектами изучение возбуждения изомеров в (γ, γ') реакциях представляет практический интерес, поскольку около 80% используемых в медицине и 40% в активационном анализе радионуклидов – изомеры.

Проведение экспериментов в указанной области энергий имеет свои особенности: малые сечения взаимодействия фотонов с ядрами (на несколько порядков ниже, чем в «гигантском» резонансе) и дискретный характер поглощения фотонов ядром. Эти особенности обуславливают привлекательность исследований ввиду их большой информативности и возможности надежной интерпретации получаемых данных, но они же, особенно малая величина сечений, затрудняют проведение экспериментов [6, 7]. Существенный прогресс в этих исследованиях был достигнут только в последнюю декаду прошлого века благодаря сооружению ускорителей электронов с интенсивностью пучка выше 100 микроампер.

С запуском в Национальном научном центре "Харьковский физико-технический институт" (ННЦ ХФТИ) электростатического ускорителя электронов ELIAS на энергию до 3 МэВ и интенсивностью пучка электронов до 500 мкА появилась возможность проведения исследования фотообразования изомеров при низких энергиях [8, 9].

Настоящая работа посвящена изучению возбуждения изомеров ^{113m}In и ^{115m}In в (γ, γ') реакциях. Оба изотопа представлены в естественном индии: $^{115}\text{In} - 95,7\%$, $^{113}\text{In} - 4,3\%$, что позволяет проводить облучение обоих изотопов одновременно, сводя к минимуму относительную ошибку измерений.

Реакция $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ в настоящее время хорошо изучена и даже предлагается в качестве мониторинговой для измерения потока фотонов низкой энергии [10, 11]. Мы провели ее исследование главным образом для того, чтобы проверить надежность используемой экспериментальной методики и, что очень важно, корректность способа обработки экспериментальных данных. Что касается реакции $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113m}\text{In}$, то она практически не изучена несмотря на то, что изотоп ^{113}In всегда присутствует при изучении реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ и использовании мишени естественного изотопного состава. В какой-то мере это можно объяснить тем, что распространенность изотопа ^{113}In в 22 раза меньше, чем изотопа ^{115}In .

Ядра ^{113}In и ^{115}In имеет близкую структуру. Их первые уровни, являющиеся изомерными состояниями с энергией 336 и 392 кэВ соответственно, имеют спин и четность $J^\pi = 1/2^-$ и периоды полураспада $T_{1/2} = 4,49$ и 1,66 час. Основные состояния имеют спин $J^\pi = 9/2^+$. Изотоп ^{115m}In распадается с относительной вероятностью 45,8%, - $^{113m}\text{In} - 64,2\%$, оба путем $M4$ γ -перехода в основное состояние [12, 13].

ВЫХОД ИЗОМЕРОВ

Эксперимент проведен с использованием активационной методики на электростатическом ускорителе электронов ELIAS на напряжение до 3,0 МВ. Блок-схема установки детально описана в работе [8]. Пучок электронов диаметром 2 мм и током до 200 мкА тормозился в охлаждаемом проточной водой танталовом радиаторе толщиной 0,5 мм. Суммарный поток электронов, попавших на радиатор, определялся с помощью устройства типа цилиндра Фарадея. Напряжение на кондукторе генератора (кинетическая энергия пучка

электронов) измерялась роторным вольтметром, который калибровался с помощью реакции фоторасщепления бериллия. Неопределенность калибровки 50 кВ [9].

Измерения на изотопах индия выполнены в интервале энергий электронного пучка 1,0 – 3,0 МэВ с шагом 0,2 МэВ. Наведенная в мишени активность измерялась с помощью Ge(Li) γ -спектрометра с рабочим объемом около 40 см³, который был соединен с 4096 канальным анализатором импульсов. Полученные γ -спектры обрабатывались с помощью персонального компьютера. На рис. 1 приведен типичный спектр излучения активированной индиевой мишени.

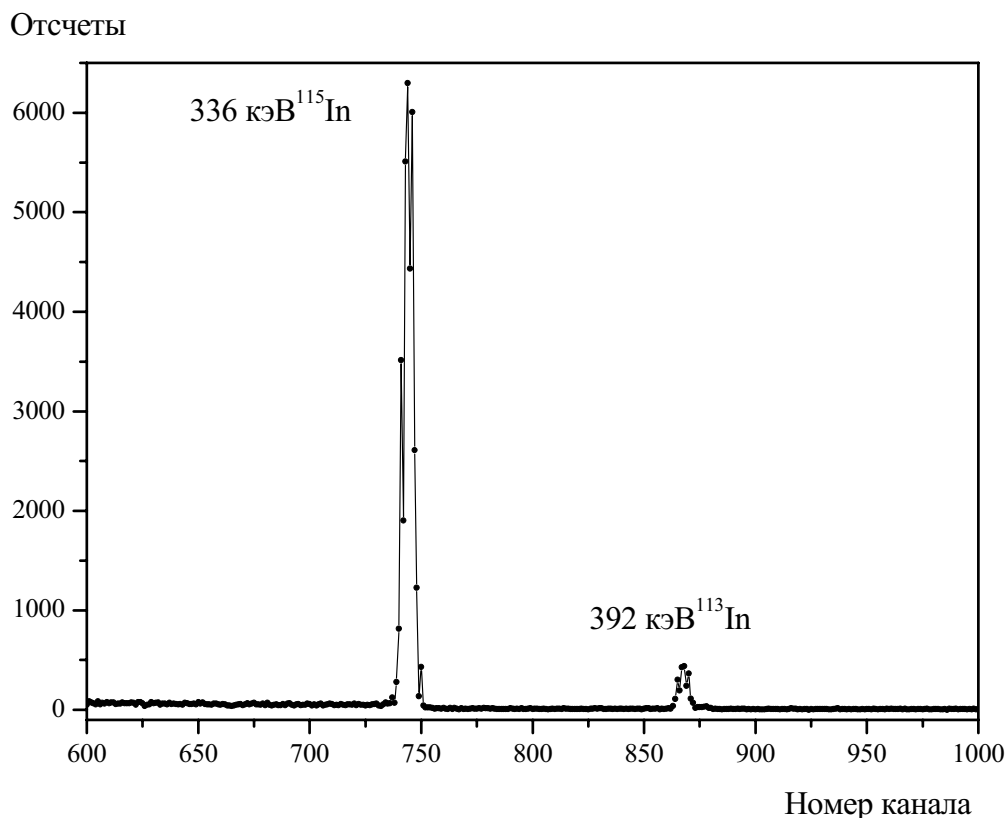


Рис. 1. Спектр излучения естественного индия, облученного тормозными γ -квантами с граничной энергией 3 МэВ, при токе электронов 50 мкА. Время облучения 60 мин.

На рис. 2 представлен выход $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113\text{m}}\text{In}$ и $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ реакций в зависимости от граничной энергии тормозного спектра фотонов $E_{\gamma\text{max}}$. Выход изомера $Y(E_{\gamma\text{max}})$ определялся согласно соотношению:

$$Y(E_{\gamma\text{max}}) = \frac{N_{\text{iso}}(E_{\gamma\text{max}})}{N_e N_T}, \quad (1)$$

где N_{iso} - количество образовавшихся в мишени ядер изомера, N_e - число попавших на радиатор электронов, N_T - количество ядер на см² мишени. Ошибка в определении выхода представляет собой сумму систематической и статистической ошибок. Систематическая ошибка является суммой ошибки определения эффективности детектора фотонов, измерения потока электронов и толщины мишеней.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ

Заселение изомера происходит путем поглощения фотонов с возбуждением промежуточных (или активационных) уровней и их последующим распадом непосредственно или через каскад в изомерное состояние. Функция выхода изомера может быть представлена в виде:

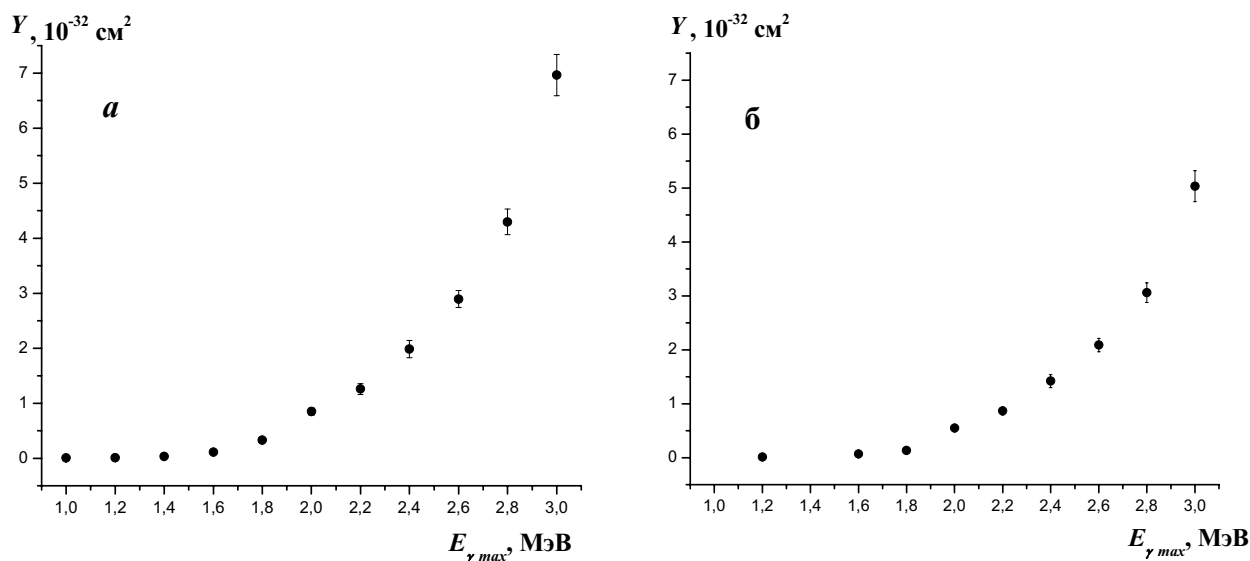


Рис. 2. Выход изомеров ^{115m}In (а) и ^{113m}In (б) в зависимости от граничной энергии тормозного спектра

$$Y(E_{\gamma \max}) = N_T \int_{E_{th}}^{E_{\gamma \max}} \sigma(E_\gamma) N_\gamma(E_\gamma, E_{\gamma \max}) dE_\gamma, \quad (2)$$

где $\sigma(E_\gamma)$ - сечение исследуемой фотоядерной реакции при энергии γ -квантов E_γ , $N_\gamma(E_\gamma, E_{\gamma \max})$ - спектральная интенсивность фотонного поля для граничной энергии $E_{\gamma \max}$, E_{th} - пороговая энергия.

Из-за малой ширины активационных резонансов $N_\gamma(E_\gamma, E_{\gamma \max})$ можно считать постоянной величиной в пределах одного резонанса, а уравнение (2) заменить системой уравнений:

$$Y_i = \sum_j (\sigma\Gamma)_{iso}^j N_i^j, \quad (3)$$

где Y_i - выход изомера в i -й точке по $E_{\gamma \max}$, j - номер активационного уровня исходного ядра. $(\sigma\Gamma)_{iso}^j$ - интегральное сечение активации изомера через j -й уровень, которое надлежит определить в эксперименте, N_i^j - число фотонов тормозного спектра в единичном энергетическом интервале с энергией равной энергии j -го активационного уровня и с i -ой граничной энергией тормозного излучения.

Выход Y_i представляет собой нарастающую с энергией функцию с изломами при энергиях фотонов, равных энергии возбуждения очередного активационного уровня или групп близко расположенных уровней. В промежутках между активационными уровнями энергетическая зависимость Y_i представляет собой близкие к прямым отрезки. Активационный эксперимент не позволяет надежно определить места изломов энергетической зависимости выхода, т.е., другими словами, положение активационных уровней. Мы воспользовались данными об уровнях, приведенными в таблице [13], выбрав из них только те, которые возбуждаются в (γ, γ') реакциях и могут быть активационными, т.е. уровни, претерпевающие непосредственный или каскадный распад в изомерное и одновременно прямой распад в основное состояния.

Интегральные сечения $(\sigma\Gamma)_{iso}^j$ определялись как параметры уравнения (3) при подгонке к экспериментальным точкам выхода подобно тому, как это делалось в работах [10, 11]. При этом спектр фотонов тормозного излучения электронов в танталовом радиаторе рассчитывался с помощью программы GEANT 3.21. Статистика составляла 10^7 запусков, интервал группирования 1 кэВ, энергия обрезания каскада по фотонам и электронам составляла 0,5 МэВ. Ошибки в определении интегральных сечений представляют собой сумму статистических и систематических ошибок.

Кроме измерений интегральных сечений, мы выполнили также расчеты сечений возбуждения промежуточных уровней на основе табличных данных о временах жизни и вероятностях парциальных распадов уровней, которые представлены ниже в табл. 1 и 2. Формализм этого метода подробно изложен в работах [11, 15].

$$(\sigma\Gamma)_{iso}^j = \pi^2 \left(\frac{\hbar c}{E_j} \right)^2 \frac{2J_{is} + 1}{2J_o + 1} b_o b_{iso} \Gamma, \quad (4)$$

где $J_{o, is}$ - спины основного и промежуточного состояний, Γ - полная ширина и b_o, b_{iso} - парциальные ширины перехода в основное и изомерное состояние соответственно. E_j - энергия промежуточного уровня.

Таблица 1. Промежуточные уровни и интегральные сечения, наблюдаемые при фотоактивации ^{115}In

E_{IS} , КэВ	J^π	Настоящая работа ($\sigma\Gamma)_{iso}$, эВ·б	[10] эВ·б	[14] эВ·б	$T_{1/2}$, псек	b_o , %	b_{iso} , %	($\sigma\Gamma)_{iso}$, эВ·б
Осн. Сост.	$9/2^+$				$6 \cdot 10^{14}$ лет			
336	$1/2^-$				4,486 час.			
934	$7/2^+$			0,0085(40)	57(5)	99,8(3)	0,2(1)	0,00006(1)
941	$5/2^+$		0,008(3)		15,1(1,4)	89,8(6)	10,2(2)	0,0072(8)
1078	$5/2^+$	0,10(4)		0,115(4)	0,99(5)	83,4(6)	15,7(4)	0,119(8)
1449	$9/2^+$		0,140(41)		0,35(4)	85,0(7)	0,14(7)	0,0028(5)
1463	$7/2^+$				0,063(10)	94,2(7)	0,9(1)	0,087(15)
1487	$9/2^+$				0,44(6)	79,8(6)	0,4(1)	0,005(1)
1497	$7/2^+$	0,62(25)	0,78(27)	0,59(20)	0,20(2)	78,1(8)	21,9(8)	0,626(75)
1608	$7/2^+$	0,25 (15)	0,25(12)	0,25(15)	0,113(9)	69,2(7)	4,9(2)	0,166(30)
1999	$7/2^+$	0,96(40)	1,12(39)					
2420	-	1,70(60)	1,83(63)					
2950			3,1(13)					

Таблица 2. Промежуточные уровни и интегральные сечения, наблюдаемые при фотоактивации ^{113}In

E_{IS} , кэВ	J^π	Настоящая работа ($\sigma\Gamma)_{iso}$, эВ·б	[14] эВ·б	[15] эВ·б	$T_{1/2}$, псек	b_o , %	b_{iso} , %	($\sigma\Gamma)_{iso}$, эВ·б
Осн. сост.	$9/2^+$							
392	$1/2^-$							
1010			0,012(8)					
1024	$5/2^+$				3,6(3)	89,5	10,5	0,026(7)
1131	$5/2^+$		0,075(4)		0,97(7)	85,0	14,1	0,10(1)
1191	$7/2^+$					98,0	0,28	
1229				0,081(1)				
1580			0,89(5)					
1802		1,41(40)						
2378		2,91(51)						

Схема низкоэнергетических уровней изотопа ^{115}In хорошо известна [13]. В области энергий возбуждения до 3-х МэВ у изотопа наблюдается 52 уровня возбуждения. Из них вклад в изомерное состояние ^{115m}In могут внести 11 уровней. Характеристики активационных уровней ^{115}In и схемы их распада представлены на рис. 3. В табл. 1 приведены интегральные сечения, полученные в настоящей работе, экспериментальные результаты ($\sigma\Gamma)_{iso}^j$ других работ [10, 14, 15], а также значения констант b_o, b_{iso} из уравнения (4). В последней колонке даны расчетные значения интегральных сечений.

Первым активационным уровнем изотопа ^{115}In является уровень 934 кэВ со спином $7/2^+$ и вероятностью парциального распада в изомер 0,5%. Уровень 941 кэВ заселяется путем возбуждения основного состояния $E2$ переходом и распадается с вероятностью 11,4% в изомерное состояние 336 кэВ посредством γ - γ каскада через уровень 597 кэВ. Эти два активационных уровня вносят малый вклад в выход изомера, который практически не заметен в эксперименте (рис. 2а). Несущественным является также вклад последующих 4-х уровней.

Следующими уровнями, дающими заметный вклад в заселение изомера, согласно полученным нами результатам и данным работы [10] являются уровни с энергиями возбуждения 1497, 1608, 1999, 2420 и 2950 кэВ. Можно утверждать, что значения интегральных сечений, полученные в разных работах, в пределах ошибок эксперимента совпадают между собой. Полученные экспериментальные и расчетные значения также

согласуются. К сожалению, характеристики уровней 2420 и 2950 недостаточно известны для того, чтобы можно было путем расчета оценить их вклад в сечение возбуждения изомера и сравнить с экспериментом.

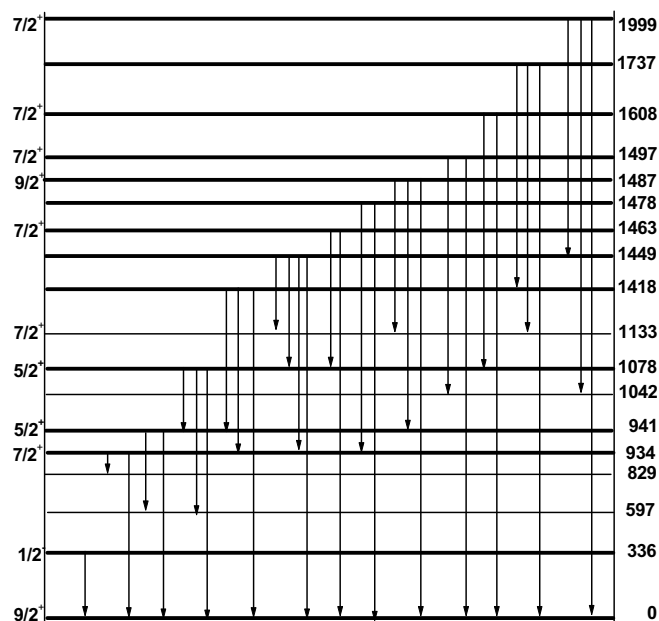


Рис. 3. Упрощенная схема уровней ^{115}In . Вероятные активационные уровни выделены жирными линиями. Справа от рисунка приведены энергии уровней в кэВ, слева – известные для соответствующих уровней спины и четности. Стрелками обозначены электромагнитные переходы между уровнями и в основное состояние.

Примерно такая же картина наблюдается в измерениях выхода изомера ^{113m}In . В этом изотопе до энергии 3 МэВ наблюдается 92 уровня возбуждения, из которых, по-видимому, только 12 могут быть активационными. Энергия активационных уровней E_{IS} и интегральные сечения $(\sigma\Gamma)_{iso}^j$, полученные нами путем подгонки уравнения (3) к экспериментальной кривой выхода, представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, сведения о спектроскопических характеристиках уровней более скудные, чем в случае ^{115}In , что также не дает возможности провести необходимые расчеты и сравнение с экспериментальными данными. Упрощенная схема уровней представлена на рис. 4.

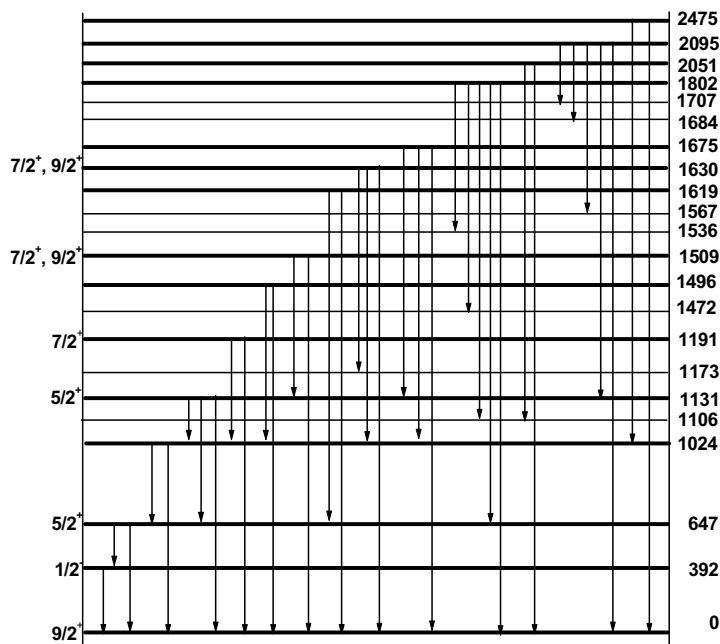


Рис. 4. Упрощенная схема уровней ^{113}In . Вероятные активационные уровни выделены жирными линиями. Справа от рисунка приведены энергии уровней в кэВ, слева – известные для соответствующих уровней спины и четности. Стрелками обозначены электромагнитные переходы между уровнями и в основное состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Функции возбуждения $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113\text{m}}\text{In}$ и $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ реакций измерены на электростатическом ускорителе электронов ELIAS с использованием интенсивного пучка γ -квантов с энергией $E_\gamma = 1,0\text{--}3,0$ МэВ и активационной методики. Показано, что выход реакции для обоих изотопов ведет себя подобным образом и резко возрастает в интервале граничной энергии 1,6–3,0 МэВ, что, по-видимому, обусловлено наличием интенсивных активационных уровней 1999 и 2420 кэВ для изотопа ^{115}In и 1802 и 2378 кэВ для изотопа ^{113}In .

Полученные зависимости выхода изомерных состояний в ядрах ^{113}In и ^{115}In от граничной энергии фотонов, использовались, чтобы выделить интегральные фотоактивационные сечения для некоторых промежуточных уровней. Результаты эксперимента согласуются с аналогичными данными других научных центров, использующих разную геометрию эксперимента и источники фотонов.

Учитывая характеристики уровней ^{113}In и ^{115}In , приведенные в литературе, там, где были известны времена жизни промежуточных уровней и вероятности перехода в основное и изомерное состояния, проведены расчеты соответствующих интегральных сечений.

Согласие полученных результатов с данными других авторов и теоретическими расчетами показывает, что ввод в эксплуатацию прецизионного, сильноточного (до 500 мкА) ускорителя электронов ELIAS на энергию 0,5–3,0 МэВ позволяет, в принципе, с успехом изучать как резонансное поглощение фотонов ядрами, так и исследовать неупругое (γ, γ') рассеяние на ядерных мишенях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Richter A. Electron Scattering and elementary excitations //Nucl. Phys. - 1991. - V. A522. - P. 139-166.
2. Collins C.B., Eberhard C.D., Glesener J.W. and Anderson J.A. Depopulation of the isomeric state $^{180\text{m}}\text{Ta}$ by the reaction $^{180\text{m}}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$ //Phys. Rev. - 1988. - V. C37. - P. 2267-2269.
3. Collins C.B., Lee F.W., Shemwell D.M., DePaola B.D., Olariu S., Popescu Ioan-Iovitz. The Coherent and Incoherent Pumping of Gamma-Ray Laser with Intense Optical Radiation //J. Appl. Phys. - 1982. - V. 53. - P. 4645.-4651.
4. Collins C.B., Davanloo F. Accelerated Emission of Gamma Rays from the 31-yr Isomer of ^{178}Hf Induced by X-ray Irradiation //Phys. Rev. Lett. - 1999. - V. 82. - N 4. - P. 695-698.
5. Collins C.B., Carrol J.J., Sinor T.W. at al. Resonant excitation of the $^{180\text{m}}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$ //Phys. Rev. - 1990. - V.42. - P. 1813-1816.
6. Гангрский Ю.П., Тончев А.П., Балабанов Н.П. Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях. //ЭЧАЯ. - 1996. - Т.27. - В. 4. - С. 1043-1098.
7. Гангрский Ю.П., Мазур В.М. Рассеяние γ -квантов ядрами и возбуждение изомерных состояний //ЭЧАЯ. - 2002. - Т. 33. - В. 1. - С. 159-200.
8. Шевченко О.С., Раныук Ю.Н., Гостищев В.Н. и др. Мониторингирование низкоэнергетических пучков тормозного излучения с помощью реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ //ВАНТ, сер: Физ. рад. поврежд. и рад. матер. (85). - 2004. - № 3. - С. 108-111.
9. Астахов А.М., Баранков Д.Ю., Борисенко В.Н. и др. Градуировка роторного вольтметра электростатического генератора ELIAS //ВАНТ, сер: Физ. рад. поврежд. и рад. матер. (85). - № 6. - С. 127-1128.
10. Belic D., Besserer J., Arlandini C. at al. The new photoactivation facility at the 4.3 MV Stuttgart Dynamitron: setup, performance, and first applications. //Nucl. Instr. and Meth. - 2001. - V. A463. - P. 26-41.
11. P. von Neumann-Cosel, Huxel N., Richter A. at all. Absolute calibration of low energy, thick target bremsstrahlung. //Nucl. Instr. and Meth. - 1994. - V. A338. - P. 425-431.
12. Firestone R.B. Table of Isotopes. V.S. Shirley (Ed.). Wiley. New York, 1996.
13. Kneissl U. Photoactivation and Photon-Scattering Experiments of Astrophysical Relevance. //Progress in Particle and Nuclear Physics. - 2001. - V. 46. - P. 79-88.
14. Booth B.C., Brownson J. Electron and Photon Excitation of Nuclear Isomers //Nucl. Phys. - 1967. - V. A98. - P. 529-541.
15. Krčmar M., Ljubičić A., Logan B.A. at al. Photoactivation of isomeric levels in ^{113}In and ^{87}Sr //Phys. Rev. - 1986. - V.C33. - N. 1. - P. 293-295.

^{115}IN AND ^{113}IN ISOMERS PHOTOEXCITATION TO ENERGY 3.0 MEV

O.S. Shevchenko, A.N. Dovbnya, Yu.N. Ranyuk, A.A. Nemashkalo, I.G. Goncharov, V.N. Borisenko, V.I. Noga, I.I. Shapoval, E.L. Kuplennikov

National Science center "Kharkov Institute of Physics and Technology",
Ukraine, 61108, Kharkov, Akademicheskaya str. 1.

The yield of isomeric states in ^{115}In and ^{113}In produced by the (γ, γ') reaction have been measured in the bremsstrahlung with end point energy range of 1.0–3.0 MeV by activation method and integrated photoactivation cross sections for some intermediate states has been deduced. The integrated cross sections results are analyzed in combination with data from low-energy photon scattering (γ, γ') reaction. It was shown, that $^{115\text{m}}\text{In}$ and $^{113\text{m}}\text{In}$ yields are sharply grow up at the end point energy range of 1600–3000 keV and that it probably connected with existence of intensive activating levels at the energy of 1999 and 2420 for ^{115}In and 1802 and 2378 keV for ^{113}In .

KEY WORDS: isomers photoproduction, indium-115, indium-113, bremsstrahlung irradiation, germanium-lithium gamma detector, electrostatic accelerator