

УДК 621.384.6

ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ ^{117m}Sn В РЕАКЦИИ (γ, γ') ПРИ $E_{\gamma} \leq 3$ МэВ**О.С. Шевченко¹, Ю.Н. Ранюк¹, А.Н. Довбня¹, Э.Л. Купленников¹, В.Ю. Пономарев²**¹ ННЦ «Харьковский физико-технический институт»
61108, Харьков, ул. Академическая 1, Украина² Институт ядерной физики Дармштадтского технического университета
D-64289, Дармштадт, Германия

Поступила в редакцию 1 сентября 2009 г.

С помощью активационной методики на пучке тормозного излучения с граничной энергией $E_{\gamma, \text{max}}$ в интервале 2,1 – 3,0 МэВ в (γ, γ') реакции измерен выход изомерного состояния ^{117m}Sn с энергией возбуждения $E_{\text{iso}} = 314,58$ кэВ. Найдено только одно промежуточное состояние (ПС), ответственное за подпитку этого изомерного уровня. Энергия возбуждения промежуточного состояния оказалась равной $(2,25 \pm 0,05)$ МэВ, а интегральное сечение фотовозбуждения изомера $(\sigma I)_{\text{iso}} = (0,022 \pm 0,002)$ эВ·б. С целью выяснения структуры ПС в рамках квазичастично-фононной модели выполнены микроскопические расчеты, которые показали, что возбуждение ПС обусловлено $E3$ -переходом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: олово, изотопы, тормозной спектр, граничная энергия, фотовозбуждение, активационная методика, изомерное состояние, интегральное сечение, квазичастично-фононная модель.

PHOTOEXCITATION OF THE ^{117m}Sn BY (γ, γ') REACTION AT $E_{\gamma} \leq 3$ MeV
O.S. Shevchenko¹, Yu.M. Ranyuk¹, A.M. Dovbnya¹, E.L. Kuplennikov¹, V.Yu. Ponomarev²¹ NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»
61108, Kharkiv, Academichna 1, Ukraine² Institute of Nuclear Physics Darmstadt Technical University
D-64289 Darmstadt, Germany

New data on photoexcitation of nuclear isomer ^{117m}Sn were received by a beam of electrons of electrostatic electron accelerator. The yield of the isomeric state ^{117m}Sn with excitation energy $E_{\text{iso}} = 314.58$ keV has been measured in $^{117}\text{Sn}(\gamma, \gamma')^{117m}\text{Sn}$ reaction by activation method with the bremsstrahlung end-point energy from 2.1 to 3.0 MeV. In this energy range only one intermediate state (IS) responsible for the isomer feeding has been found. The excitation energy of the IS (2.25 ± 0.05) MeV and photoproduction integral cross section (0.022 ± 0.002) eV·b.

KEY WORDS: lead, isotopes, bremsstrahlung spectra, end-point energy, photoexcitation, photoactivation method, isomeric state, integral cross section, quasiparticle-phonon model.

ФОТОЗБУДЖЕННЯ ^{117m}Sn В РЕАКЦІЇ (γ, γ') ПРИ $E_{\gamma} \leq 3$ МєВ
О.С. Шевченко¹, Ю.М. Ранюк¹, А.М. Довбня¹, Е.Л. Купленніков¹, В.Ю. Пономарєв²¹ ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»
61108, Харків; Академічна 1, Україна² Інститут ядерної фізики Дармштадтського технічного університету
D-64289, Дармштадт, Німеччина

На пучку електронів електростатичного прискорювача отримані нові данні про фотозбудження ядерного ізомеру ^{117m}Sn . Вихід ізомеру з енергією збудження $E_{\text{iso}} = 314,58$ кєВ було поміряно в $^{117}\text{Sn}(\gamma, \gamma')^{117m}\text{Sn}$ реакції активаційною методикою в інтервалі граничних енергій гальмівного випромінювання від 2,1 до 3,0 МєВ. В цьому енергетичному діапазоні знайдено один проміжний стан, відповідальний за ізомерне підживлення. Енергія збудження проміжного стану $(2,25 \pm 0,05)$ МєВ, інтегральний переріз фотозбудження $(0,022 \pm 0,002)$ еВ·б.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: олово, изотопи, гальмівний спектр, гранична енергія, фотозбудження, активаційна методика, ізомерний стан, інтегральний переріз, квазичастично-фононна модель.

Изомеры в атомных ядрах представляют собой уровни с полным угловым моментом J_{iso} , существенно отличающимся от основного состояния $J_{\text{g.s.}}$ ($\Delta J_{\text{iso}} = |J_{\text{g.s.}} - J_{\text{iso}}| \geq 3$). Они появляются в спектрах благодаря оболочечной структуре среднего поля и их энергия возбуждения, как правило, не превосходит нескольких сотен кэВ. По этой причине распад изомеров в основное состояние сильно затруднен. Время жизни изомеров варьируется от нескольких миллисекунд до $\sim 10^{15}$ лет. Экспериментальные исследования показали, что изомерные уровни возбуждаются в различных реакциях вызываемых протонами, α -частицами, тяжелыми ионами, при неупругом рассеянии γ -квантов на атомных ядрах (реакция (γ, γ')), а также в (γ, n) реакции путем возбуждения и каскадного распада гигантского дипольного резонанса [1, 2].

Изомерные уровни заселяются после распада промежуточных состояний с энергией 2 - 4 МэВ и конечной ветвью распада в изомерное состояние. В реакции (γ, γ') ПС возбуждаются тормозным излучением с граничной энергией 2 - 5 МэВ. Количество таких состояний мало, примерно, одно два состояния на МэВ в сферических ядрах. До сих пор анализ ПС, возбуждаемых тормозным излучением, осуществлялся, в основном, для ядер с $\Delta J_{\text{iso}} = 3, 4$, включая $E1-E2$ (или $E2-E1$) и $E2-E2$ последовательности для заселения изомеров [3 - 5].

В статье изложены наши результаты по фотообразованию изомера в ^{117}Sn (изотопное содержание 7,68 %),

стабильное состояние которого имеет спин и четность $J_{g.s.}^{\pi} = 1/2^{+}$. Изомерное состояние в этом ядре имеет энергию возбуждения $E_{iso} = 314,58$ кэВ и $J_{iso}^{\pi} = 11/2^{-}$. Таким образом, разница спинов $\Delta J_{iso} = 5$ и по крайней мере $E2 - E3$ последовательность необходима для заселения изомера из основного состояния. Период полураспада изомерного состояния достаточно велик и составляет $T_{1/2} = 13,60$ дней. Схема распада изомера представлена на рис. 1.

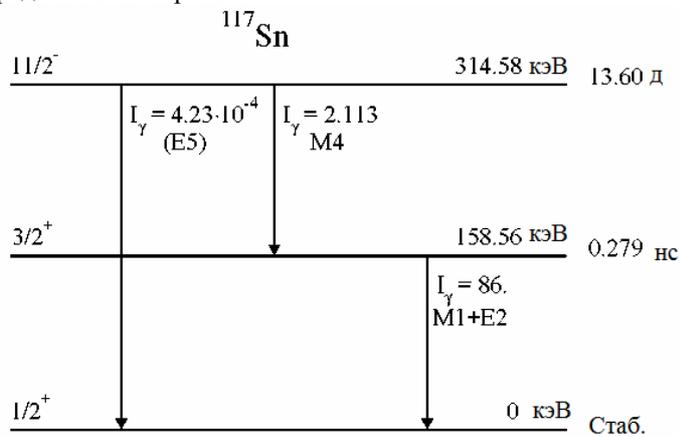


Рис. 1. Распада изомера $11/2^{-}$ в основное состояние [6].

Благодаря наличию уровня $J^{\pi} = 3/2^{+}$ при $E_{\gamma} = 158,56$ кэВ, изомер распадается преимущественно на этот уровень путём M4 внутренней конверсии с относительной вероятностью $I_{\gamma} = 2,113$ %. Для прямого распада в основное состояние $I_{\gamma} = 0,000423$ %. Уровень 158,56 кэВ распадается в основное состояние $I_{\gamma} = 86$ % посредством M1 + E2 γ -перехода.

Единственной работой, в которой было определено интегральное сечение ПС ^{117m}Sn является работа [7]. Эксперимент выполнен для тормозного излучения с граничной энергией 4 и 6 МэВ. Полученные интегральные сечения оказались равными $(3,20 \pm 0,47)$ эВ·б и $(8,80 \pm 0,26)$ эВ·б соответственно. К сожалению, полученные результаты не позволили определить энергию ПС.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Настоящий эксперимент выполнен в Национальном Научном Центре «Харьковский физико-технический институт» на электростатическом ускорителе электронов ELIAS напряжением 3 МВ с энергетическим

разрешением 50 кэВ и интенсивностью пучка до 500 мкА. Тормозной спектр генерировался путем облучения электронным пучком танталового конвертора толщиной 0,5 мм. Образцы олова естественного изотопного состава толщиной 0,2 мм и диаметром 15 мм располагались на пути тормозного пучка за конвертором. Фотоактивность измерялась с помощью Ge(Li) детектора путем определения интенсивности γ -линии 158,56 кэВ, наблюдаемой в каскаде уровней распада изомера. Использовался детектор с чувствительным объемом 50 см³ и энергетическим разрешением 2,5 кэВ для линии 1332 кэВ ^{60}Co источника. Схема активационного эксперимента и стандартная процедура его проведения описаны в [8]. Спектры, полученные для двух различных значений $E_{\gamma_{max}} = 2,1$ и 2,7 МэВ, представлены на рис. 2.

Эксперимент выполнен с интенсивностью электронного пучка 170 мкА, временем активации $t_{irr} = 240$ и 120 мин, временем «охлаждения» $t_c = 28$ и 31 мин и временем измерения спектра $t_m = 60$ мин для $E_{\gamma_{max}} = 2,1$ и 2,7 МэВ, соответственно. Спектр в нижней части рис. 2 является типичным для граничной энергии $E_{\gamma_{max}} > 2,25$ МэВ. Сильная линия 158,56 кэВ свидетельствует о том, что уровень $3/2^{+}$ при этой энергии подпитывается с ПС. Отсутствие такой линии на верхней части рис. 2 означает, что изомер не заселяется при $E_{\gamma_{max}} < 2,25$ МэВ.

Измеренный выход изомера $Y(E_{\gamma_{max}})$ представлен на рис. 3 как функция граничной

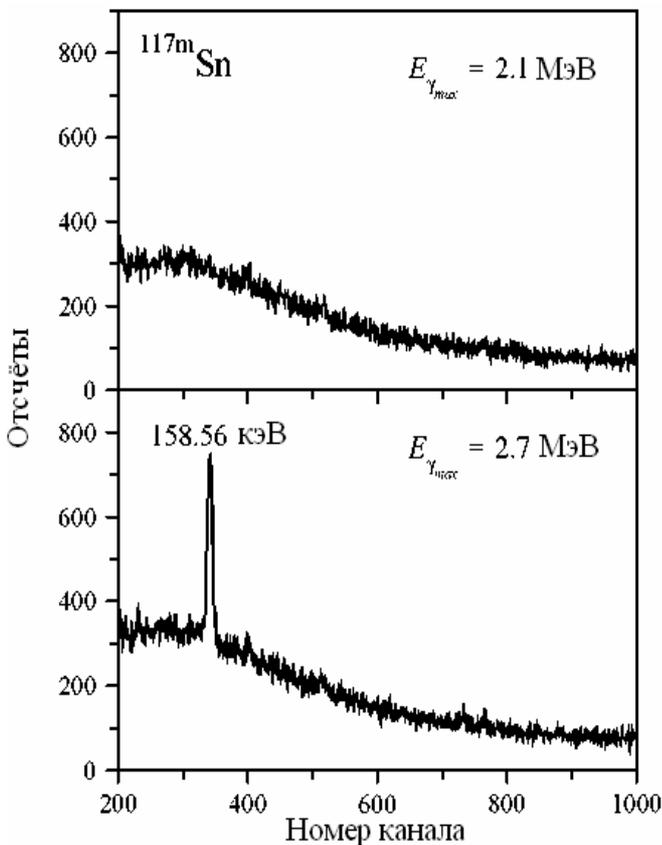


Рис. 2. γ -спектр после облучения мишени тормозным излучением с $E_{\gamma_{max}} = 2,1$ (вверху) и 2,7 МэВ (внизу).

энергии тормозного спектра. Выход определялся как количество активированных ядер N_{iso} отнесенный к числу ядер мишени N_T на см^2 и поток электронов N_e :

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

На рис. 3 указана суммарная систематическая и статистическая ошибка. Её величина составляет 10-15 %. Сплошная линия на рисунке представляет χ^2 подгонку через точки в предположении линейной зависимости выхода изомера как функции граничной энергии тормозного спектра.

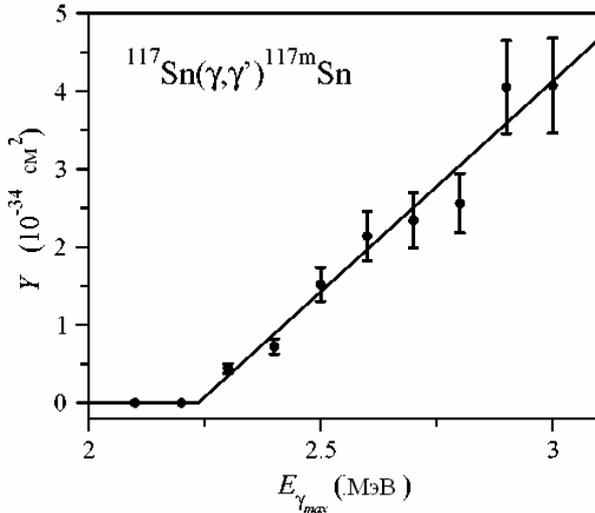


Рис. 3. Выход ^{117m}Sn изомера как функция граничной энергии тормозного спектра.

с граничной энергией $E_{\gamma_{\max}}$.

В связи с тем, что лишь одно ПС было обнаружено в настоящем эксперименте и в предположении небольшой ширины этого уровня, уравнение (2) может быть представлено в виде:

$$Y(E_{\gamma_{\max}}) = (\sigma\Gamma)_{iso} N(E_{IS}, E_{\gamma_{\max}}) \quad (3)$$

Число фотонов $N(E_{IS}, E_{\gamma_{\max}})$ с энергией изомерного состояния E_{IS} для каждого значения граничной энергии тормозного спектра на рис. 3 было рассчитано путем математического моделирования спектра с помощью GEANT 3.21 программы [9]. Количество запусков 10^7 , $E_c = 0,5$ МэВ, интервал группирования 0,01 МэВ.

Интегральное сечение заселения изомера ^{117}Sn было определено как $(0,022 \pm 0,002)$ эВ·б. Это значение на два порядка величины меньше значения $(\sigma\Gamma)_{iso}$ для заселения изомеров в ядрах с $\Delta J_{iso} = 3$ и 4 в работе [3] для ^{81}Br , ^{89}Y [10] и ^{115}In [5]. Оно было получено с помощью теоретического анализа в предположении, что ПС этих ядер возбуждаются переходом с основного состояния или не коллективным $E1$ -переходом в ^{81}Br [3] или коллективным $E2$ -переходом в ^{89}Y [10], ^{115}In [5]. Малое значение $(\sigma\Gamma)_{iso}$ в ^{117}Sn подтверждает наше предположение о том, что ПС возбуждается в этих ядрах $E3$ -переходом, что требует теоретического анализа низлежащих состояний в ^{117}Sn .

РАСЧЕТЫ В КВАЗИЧАСТИЧНО-ФОНОННОЙ МОДЕЛИ

Теоретический анализ данных был выполнен в квазичастично-фононной модели (см. подробности в [11 - 13], которая с успехом применялась при изучении заселения изомерных состояний в ядрах с $\Delta J_{iso} = 3$ и 4 [3 - 5]. Основное и возбужденные состояния ^{117}Sn описывались волновой функцией, которая включает квазичастично-, [квазичастично \otimes 1 фонон]- и [квазичастично \otimes 2 фонов]- конфигурации. Параметры модели подгонялись для воспроизведения экспериментальных $B(E2)$ и $B(E3)$ значений приведенной вероятности гамма-переходов 2^+ и 3^- состояний, соответственно, в четно-четной сердцевине ядра ^{116}Sn . Расчет хорошо воспроизводит энергию возбуждения $3/2^+$ состояния в ^{117}Sn (0,15 МэВ) и несколько превосходит энергию изомерного $11/2^-$ уровня (0,17 МэВ).

Среди большого числа возбужденных состояний в интервале 1,5 – 3,5 МэВ, найдено только одно состояние, которое связано с обоими, основным и изомерным состояниями. Это $7/2^-$ состояние с энергией возбуждения 2,44 МэВ и волновой функцией:

$$|7/2^- \rangle = 0,19 \cdot 2f_{7/2} + 0,90 [s_{1/2} \otimes 3^-]_{7/2^-} - 0,14 [1h_{11/2} \otimes 2^+]_{7/2^-} + \dots \quad (4)$$

Как известно [1], линейная зависимость выхода изомера нарушается каждый раз, когда граничная энергия тормозного излучения достигает нового ПС состояния, заселяющего изомер. Исходя из данных, представленных на рис. 3, сделан вывод о наличии только одного ПС в ^{117}Sn в энергетическом интервале 2 - 3 МэВ. Энергия возбуждения этого состояния $(2,25 \pm 0,05)$ МэВ. Полученная величина близка к энергии первого 3^- состояния 2,266 МэВ в сердцевине ядра ^{116}Sn . Это позволяет предположить, что ПС возбуждается $E3$ -переходом с основного состояния.

Выход изомера может быть также посчитан как

$$Y(E_{\gamma_{\max}}) = \int_{E_c}^{E_{\gamma_{\max}}} \sigma_{\gamma}(E_{\gamma}) N(E_{\gamma}, E_{\gamma_{\max}}) dE_{\gamma} \quad (2)$$

где E_c энергия обрезания, $\sigma_{\gamma}(E_{\gamma})$ сечение реакции как функция энергии фотона E_{γ} и $N(E_{\gamma}, E_{\gamma_{\max}})$ представляет непрерывную спектральную плотность

где 2^+ и 3^- означает нижайшее 2^+ и 3^- фоновые возбуждение ядерной сердцевины.

Это состояние действительно возбуждается $E3$ -переходом из основного во вторую компоненту его волновой функции (4). Хотя это главная компонента волновой функции, состояние распадается преимущественно в изомерное состояние с его третьей компоненты $E2$ -переходом с отношением ветвей $G_{iso}/G_{tot} = 0,97$. Расчетное значение сечения для заселения изомера в $^{117}\text{Sn}(\gamma, \gamma')$ реакции через это состояние $0,026$ эВ·б, что хорошо согласуется с экспериментальным значением. Свойства этого состояния, вытекающие из настоящего эксперимента и теоретического анализа, суммированы в табл. 1.

Таблица. Свойства ПС в ^{117}Sn , ответственного за подпитку изомера

	Энергия, МэВ	$(\sigma\Gamma)_{iso}$, эВ·б
Эксперимент	$2,25 \pm 0,05$	$0,022 \pm 0,002$
Теория	2,44	0,026

В литературе [6] есть сведения о двух уровнях в ^{117}Sn при 2160 и 2280 кэВ, оба из которых определены как $5/2^-$, $7/2^-$ из $L = 3$ перехода в $^{117}\text{Sn}(p, p')$. Очевидно, обсуждаемое выше $7/2^-$ состояние соответствует одному из них. Поэтому дополнительно проведены вычисления выхода $5/2^-$ состояния 2,50 МэВ с $[3s_{1/2} \otimes 3^-]_{5/2^-}$ конфигурацией как главной компоненты волновой функции. Оказалось, что это состояние не имеет ни одной изомерной ветви. Который из этих уровней 2160 или 2280 кэВ является «нашим» ПС можно окончательно выяснить в исследованиях ядерной резонансной флюоресценции на ^{117}Sn по энергии линии при $E_{IS} - E_{iso}$.

ВЫВОДЫ

В заключение отметим, что заселение изомера в ^{117}Sn изучалось в реакции (γ, γ') с использованием тормозного излучения в интервале граничной энергии от 2,1 до 3,0 МэВ. Только одно промежуточное состояние, заселяющее изомер, обнаружено в этом энергетическом интервале. По нашему мнению экспериментальные данные и результаты теоретического анализа дают убедительное доказательство того, что данное промежуточное состояние с энергией $(2,25 \pm 0,05)$ МэВ возбуждается в чрезвычайно селективной реакции $E3$ -переходом из основного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев, Н.П. Балабанов. Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях // ЭЧАЯ. – 1996. – Т. 27, вып. 4. – С. 1041-1076.
2. N. Tsoneva, Ch. Stoyanov, Yu. Gangrsky et al. Population of isomers in the decay of the giant dipole resonance // Phys. Rev. – 2000. – Vol. C 61. – P.044303-1 - 044303-9.
3. V.Yu. Ponomarev, A.P. Dubenskiy, V.P. Dubenskiy and E.A. Boykova The anomaly in the energy dependence of the yield of the isomer in ^{81}Br by photo-excitation as manifestation of nuclear intermediate structure // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. - 1990. – Vol.16. – P.1727-1734.
4. P. von Neumann-Cosel, A. Richer, C. Spieler et al. Resonant photoexcitation of isomers // Phys. Lett. B. 1991. – Vol.266. – P.9-13. J.J. Carrol, M. J. Byrd, D.G. Richmond et al. Photoexcitation of nuclear isomers by (γ, γ') reactions // Phys. Rev. C. - 1991. – Vol.43. – P.1238 -1247.
5. P. von Neumann-Cosel et al. The $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')$ reaction as a test of the quasi-particle photon model with complex configurations in odd-mass nuclei // Z. Phys. A. -1995. - Vol.350. – P.303 -309.
6. R.B. Firestone, S.Y. Frank Chu, CD-ROM Editor Coral M. Baglin, Editor Table of Isotopes, Eight edition: 1998. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2646P.
7. D. Belic, J. Besserer, C. Arlandini et al. The new photoactivation facility at the 4.3 Stuttgart DINAMOTRON: setup, performance, and first applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 463. - 2001. – P.26-41.
8. O.S. Shevchenko et al. Excitation of isomers in $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')$ ^{115m}In reaction // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear physics investigations. - 2005. - №6 (45). - P.30-34.
9. Application Software Group, GEANT – Detector description and simulation tool Version 3.21, CERN program library long write up W5013, (CERN, Geneva, 1994).
10. M. Huber, P. von Neumann-Cosel, A. Richter et al. Structure of intermediate states in the photoexcitation of the ^{89}Y isomer // Nucl. Phys. A. – 1993. –Vol.559. – P.253 – 265.
11. В. Г. Соловьёв Теория атомного ядра: Квазичастицы и фотоны. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
12. S. Gales, Ch. Stoyanov, A.I. Vdovin Damping of high-lying single-particle modes in heavy nuclei // Phys. Rep. – 1988. –Vol.166. – P.125-193.
13. J. Bryssinck, L. Govor, Yu. Ponomarev et al. Search for the electric dipole excitations to the $3s_{1/2} \otimes [2_1^+ \otimes 3^-]$ multiplet in // Phys Rev. C. - 2000. –Vol.62. – P.014309-1 – 14309-12.