

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

УДК 539.17

**ПЕРСПЕКТИВЫ ДЕВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕРНОГО
ИЗОМЕРА ^{186m}Re В ПЛАЗМЕ**

© 2021 г. В. В. Кольцов*

АО “Радиевый институт им. В.Г. Хлопина”, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*E-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 26.11.2020 г.

Принята к публикации 07.12.2020 г.

Обсуждается перспективность исследования стимулированного девозбуждения ядерного изомера (СДЯИ) в ядре ^{186m}Re в плазме с электронной температурой θ_e порядка энергии ΔE триггерного перехода, который переводит изомерное ядро на выше лежащий уровень, откуда возможен быстрый распад в основное состояние ядра. Недавно стимулированное девозбуждение изомера ^{186m}Re было обнаружено в лазерной плазме с температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ и временем жизни около 0.3 нс. Однако вероятность $P_{\text{СДЯИ}}$ стимулированного девозбуждения изомера была очень мала, порядка $10^{-5}\%$. Для увеличения вероятности $P_{\text{СДЯИ}}$ в работе предлагается заменить лазерную плазму на плазму сильноточного электрического разряда с температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ, в частности на плазму электрического взрыва проводников, время жизни которой может быть на два порядка больше времени жизни лазерной плазмы. Для возможности выбора наиболее эффективного режима стимуляции девозбуждения ядерных изомеров получена простая формула для оценки вероятности $P_{\text{СДЯИ}}$ в зависимости от параметров плазмы. Для увеличения вероятности $P_{\text{СДЯИ}}$ также предложена подсветка плазмы фотонами частоты, резонансной триггерному переходу, и предложен режим многократного повторяющегося сильноточного электрического разряда в плазме, содержащей изомерные ядра. Отмечается, что накопленные экспериментальные и теоретические результаты позволяют уже в настоящее время приступить к разработке источника энергии на основе изомера ^{186m}Re .

Ключевые слова: стимуляция девозбуждения ядерных изомеров, лазерная плазма, плазма сильноточного электрического разряда, внутренняя электронная конверсия

DOI: 10.56304/S2079562920060329

ВВЕДЕНИЕ

Долгое время, но пока безуспешно, пытаются создать управляемый источник γ -излучения или управляемый источник энергии на основе стимулированного девозбуждения долгоживущих ядерных изомеров (далее СДЯИ) (см. например обзор [1]). В последнее время особенно широко такие работы велись с изомером $^{178m2}\text{Hf}$ [2] при облучении изомерных ядер фотонами и электронами. В частности, изомерные ядра облучали фотонами в области частот $\Delta E/\hbar$, близкой к резонансной для ядерных переходов энергии ΔE с изомерного уровня на вышележащие триггерные уровни, а также использовали более эффективный метод возбуждения триггерных уровней путем передачи на изомерные ядра энергии ΔE из электронной оболочки атомов. Переходы на триггерный уровень имеют меньшую мультитипольность, чем прямой изомерный переход, поэтому такие переходы индуцировать проще. С триггерного уровня ядро может распадаться как в основное состояние, так и обратно в изомерное состояние. Для известных

ядерных изомеров энергия триггерного перехода порядка 1 кэВ или больше. В настоящее время перспективным считается поиск СДЯИ для изомеров в плазме высокой плотности энергии с температурой электронов $\theta_e \sim \Delta E$ (здесь и далее температура в энергетических единицах). В такой плазме одновременно присутствует и интенсивное рентгеновское излучение, и интенсивные потоки электронов и ионов, и высокая степень ионизации атомов с изомерными ядрами. В плазме наиболее эффективным механизмом СДЯИ является обратная внутренняя электронная конверсия (ОВЭК), предложенная еще в 1976 г. Гольданским и Намиотом [3] для возбуждения изомерного состояния энергии 76 эВ в ядре ^{235}U . В последствие механизм ОВЭК исследовался во многих работах (см. например работы [4–6] и ссылки там.) При ОВЭК свободный электрон плазмы захватывается ионизованным атомом с изомерным ядром, избыточная энергия электрона идет не только на испускание фотона или Оже электрона, но может идти и на возбуждение триггерного ядерного перехода.

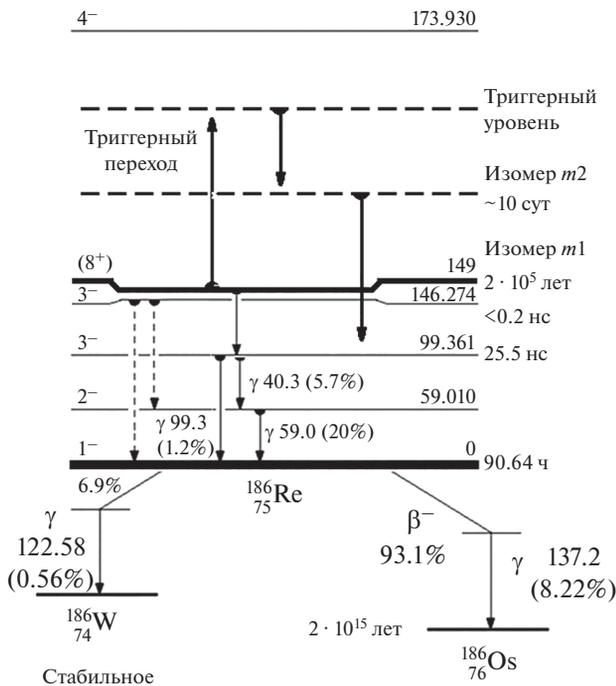


Рис. 1. Схема уровней энергии ядра ^{186}Re [7], значения энергий приведены в килоэлектронвольтах. Пунктиром обозначены триггерный уровень, через который предполагается девозбуждение в плазме изомера $^{186m1}\text{Re}$ ($T_{1/2} = 2 \cdot 10^5$ лет), и изомерный уровень $^{186m2}\text{Re}$ ($T_{1/2} \sim 10$ сут), введенный в работе [8] для объяснения временной зависимости интенсивности излучения γ -квантов 137 кэВ от вещества изомерной мишени $^{186m1}\text{Re}$ после ее лазерного облучения. Энергии этих уровней неизвестны, но для возможности их возбуждения в плазме с температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ энергия триггерного перехода должна быть не более нескольких кэВ. Первый из известных уровней над изомером $^{186m1}\text{Re}$ – это уровень 173 кэВ. Чтобы не загромождать рисунок, не показан обратный переход с триггерного уровня на изомер $^{186m1}\text{Re}$.

По порядку величины вероятность $P_{\text{ОВЭК}}$ возбуждения триггерного уровня равна [3]

$$P_{\text{ОВЭК}} \sim \lambda^2 v \tau n_E \Gamma, \quad (1)$$

где n_E – энергетическая плотность электронных состояний при резонансной энергии электронов E , $E = mv^2/2 = \Delta E - J$, m и v – масса и скорость электронов плазмы, J – потенциал ионизации атомного уровня, на который происходит захват электрона плазмы, Γ – ширина конверсионного перехода с триггерного на изомерный уровень, τ – время жизни плазмы. Сечение процесса ОВЭК по порядку величины равно λ^2 , $\lambda = \hbar/mv$ – длина волны Де-Бройля, \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π .

Перечень изомеров, подходящих для исследования их стимулированного девозбуждения в плазме, можно найти например в обзоре [1]. Но для исполь-

зования в управляемом источнике энергии наиболее интересен изомер $^{186m1}\text{Re}$ ввиду своего очень большого периода полураспада ($T_{1/2} = 2 \cdot 10^5$ лет) и большого энергозапаса (рис. 1). При девозбуждении изомера $^{186m1}\text{Re}$ выделяется около 1 МэВ энергии с учетом распада основного состояния ядра ^{186}Re , удельная энергоемкость чистого изомера $\sim 10^8$ Дж г^{-1} . В режиме хранения изомер имеет малую удельную активность. Но после стимуляции девозбуждения изомера период полураспада его основного состояния 90 ч обеспечивает высокую удельную мощность энерговыделения около 1 кВт г^{-1} , что позволит использовать его как источник энергии во многих технических устройствах. В настоящей работе рассматривается перспективность исследования стимулированного девозбуждения изомерных ядер $^{186m1}\text{Re}$ в плазме и возможность создания управляемого источника энергии на изомере $^{186m1}\text{Re}$.

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ СТИМУЛИРОВАННОГО ДЕВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИЗОМЕРОВ (СДЯИ) $^{186m1}\text{RE}$ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

До сих пор процесс СДЯИ в основном изучался в лазерной плазме. В таких экспериментах мощный световой импульс направляют на мишень – подложку с нанесенными на нее изомерными ядрами, в результате чего часть мишени превращается в плазму. Детектирование СДЯИ проводят или непосредственно в плазме по мгновенным γ -квантам, сопровождающим девозбуждение изомера, или после лазерного выстрела по “запаздывающему” излучению, возникающему при распаде промежуточного ядерного состояния, заселяемого при СДЯИ. Особенностью лазерных экспериментов является малое время жизни плазмы, определяемое только ее свободным разлетом. Кроме того, возможная масса лазерной плазмы ограничена массой вещества из объема мишени, определяемого площадью сечения светового пучка и глубиной проникновения лазерного излучения в плазму – порядка длины волны излучения.

Стимуляция ядерных переходов энергии в десятки килоэлектронвольт возможна в плазме с температурой электронов θ_e до 10 кэВ, создаваемой лазерными импульсами длительностью около 1 пс, с энергией в десятки джоулей, сфокусированными на мишени в пятно диаметром 10–100 мкм, интенсивностью более 10^{18} Вт см^{-2} . В такой плазме возбуждается рентгеновское излучение температурой несколько килоэлектронвольт, возникают интенсивные потоки протонов с энергией до 10 МэВ, с участием которых могут проходить ядерные реакции типа (p, n) [9], может происходить возбуждение ядерных изомеров [10, 11]. Для лазерной плазмы такого типа, полученной на

установке “Прогресс” Института электронно-оптического приборостроения (г. Сосновый Бор, Россия), изучали методику детектирования девозбуждения изомеров непосредственно из плазмы на примере изомера ^{110m}Ag ($T_{1/2} = 250$ сут) [12]. Этот изомер был предложен для исследования процесса СДЯИ в работе [13] и привлекателен ввиду малой энергии $M3$ перехода $\Delta E = 1128$ эВ на вышележащий триггерный уровень и принципиальной возможностью регистрации мгновенных γ -квантов, сопровождающих девозбуждение изомера. Было показано, что собственное излучение плазмы и электронные наводки при лазерном импульсе не позволяют детектировать γ -кванты девозбуждения изомеров непосредственно из плазмы с высоким энергетическим разрешением и селективностью полупроводниковым детектором γ -квантов. Поэтому в работе [12] при поиске стимулированного девозбуждения изомера $^{186m1}\text{Re}$ в плазме, образованной действием пикосекундного импульса на мишень металлического рения с $10^{-3}\%$ содержанием изомера $^{186m1}\text{Re}$, эффект искали по неравновесному излучению квантов облученной мишенью $^{186m1}\text{Re}$. Исходя из известной схемы уровней ядра ^{186}Re ожидали, что девозбуждение изомера в плазме может привести к скачкообразному — за время в несколько десятков наносекунд, заселению основного состояния ядра, тогда после лазерного выстрела интенсивность I_{137} излучения γ -квантов 137 кэВ облученным изомерным веществом будет экспоненциально спадать с периодом 90 ч до равновесного значения. Однако в эксперименте [12] изменения во времени интенсивности I_{137} не обнаружили.

Для ядерных переходов энергии не более нескольких килоэлектронвольт перспективно использование лазеров, дающих световые импульсы меньшей интенсивности, но большей длительности и энергии, которые более эффективно возбуждают триггерные переходы малой энергии. В эксперименте [8] на установке такого типа “Искра-5” в Институте экспериментальной физики РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров, Россия), исследовали возможность СДЯИ для изомера $^{186m1}\text{Re}$. Лазерный импульс энергии 300 Дж длительностью $\tau \approx 0.3$ нс попадал не мишень металлического рения с $10^{-3}\%$ содержанием изомера $^{186m1}\text{Re}$ и образовывалась плазма с температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ. После лазерного выстрела для интенсивности I_{137} излучения γ -квантов 137 кэВ облученным изомерным веществом наблюдали зависимость от времени, однако эта зависимость отличалась от ожидаемого простого экспоненциального спада. После лазерного выстрела интенсивность I_{137} вначале росла, через несколько суток достигала максимума и только потом наблюдался ее спад с периодом около 90 ч. Для объяснения такой зависимости интен-

сивности I_{137} от времени в работе [8] было предположено, что при стимулированном девозбуждении изомера $^{186m1}\text{Re}$ в плазме заселяется ранее неизвестный изомерный уровень $^{186m2}\text{Re}$, период полураспада которого около 10 сут. Амплитуда максимума интенсивности I_{137} соответствовала стимулированному девозбуждению $\sim 10^{-5}\%$ изомерных ядер $^{186m1}\text{Re}$ в лазерной плазме. Изомерный уровень $^{186m2}\text{Re}$ показан пунктиром на рисунке. Для обоснования возможности существования такого изомера в работе [8] отмечали, что ядро ^{186}Re нечетно-нечетное, имеет заметную деформацию и в таком ядре в области малых энергий можно ожидать наличие изомерных состояний по аналогии с соседними нечетно-нечетными ядрами.

Однако ввиду большого периода полураспада изомерный уровень $^{186m2}\text{Re}$ не может выступать в качестве триггерного уровня, на который происходит возбуждение изомера $^{186m1}\text{Re}$ в плазме. Для объяснения стимулированного девозбуждения изомера $^{186m1}\text{Re}$ нужно предполагать наличие еще одного на сегодня неизвестного уровня в ядре ^{186}Re , который мог бы выступать как триггерный. Таким образом, вопрос о схеме уровней ядра ^{186}Re , участвующих в стимулированном девозбуждении изомера $^{186m1}\text{Re}$, в настоящее время оказывается очень неясным. Для исследования этой схемы уровней было бы удобно получать изомер $^{186m2}\text{Re}$ независимым путем. Так, в работе [14] искали новый изомер в ядрах ^{186}Re , образованных при облучении на циклотроне мишени ^{186}W протонами энергии 15 МэВ. Наблюдавшееся отклонение от экспоненты кривой распада полученного источника ^{186}Re позволило предположить, что при образовании ^{186}Re в (p, n) реакции изомер с периодом полураспада ~ 10 сут заселяется с вероятностью $\sim 2\%$. Если в работе [14] наблюдали тот же изомер $^{186m2}\text{Re}$, который заселяется при стимулированном девозбуждении изомера $^{186m1}\text{Re}$ в плазме, то измеряя спектр электронов конверсии от полученного на циклотроне источника ^{186}Re , можно определить энергию изомера $^{186m2}\text{Re}$.

В дополнение к плазменным экспериментам в работе [8] также искали девозбуждение изомера $^{186m1}\text{Re}$ при его облучении тормозными фотонами энергии до 40 кэВ или пучком электронов энергии 10 кэВ с интегральными потоками намного большими, чем в лазерной плазме установки Искра-5. В этих экспериментах без образования плазмы не наблюдали стимулированного девозбуждения $^{186m1}\text{Re}$, что указывает на девозбуждение $^{186m1}\text{Re}$ в плазме именно по механизму обратной внутренней электронной конверсии, а например не за счет неупругого рассеяния электронов на изомерных ядрах.

В экспериментах по возбуждению ядерных уровней в плазме, образованной фотонными или электронными импульсами, в частности в работах [8, 12, 15], в которых принимал участие и автор настоящей работы, эффект СДЯИ наблюдался очень слабый и для существенного повышения эффективности СДЯИ нужны какие-то новые методы.

2. ВОЗМОЖНОСТЬ СТИМУЛЯЦИИ ДЕВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИЗОМЕРОВ (СДЯИ) В ПЛАЗМЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА (СЭР)

В качестве альтернативы экспериментам с лазерной плазмой интересно исследовать процесс СДЯИ в плазме сильноточного электрического разряда (далее СЭР), в частности в плазме электрического взрыва проводников [16]. Так же как и в лазерных экспериментах, детектирование СДЯИ можно проводить или непосредственно во время разряда по мгновенным γ -квантам, сопровождающим девозбуждение изомеров, или после разряда по “запаздывающему” излучению. Рекордные установки СЭР, такие как установка Ангара-5 в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (Москва) с максимальным разрядным током $I_{\max} = 6$ МА и максимальной длительностью импульса $\tau = 150$ нс [17] или установка “Z” Сандийских национальных лабораторий, США ($I_{\max} = 26$ МА, $\tau = 100$ нс) [18] позволяют получать плазму СЭР температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ. Такое значение температуры меньше рекордных температур в лазерной плазме и можно ожидать, что температура разрядной плазмы окажется меньше энергии триггерного перехода, через который может происходить девозбуждение ядерных изомеров. Использование современных компьютерных кодов, описывающих параметры плазмы, в принципе позволяет с высокой точностью рассчитать вероятность стимулированного девозбуждения изомера в зависимости от параметров плазмы (см. например работу [6]). Но пока таких расчетов для реальных экспериментов не сделано и здесь проведем только грубую оценку этой вероятности. Будем считать, что плазма СЭР близка к равновесной [19], распределение n_E электронов по их энергии E описывается распределением Максвелла–Больцмана, а вероятность P_J ионизации уровня с потенциалом ионизации J в атоме с изомерным ядром описывается формулой Саха в предположении одноступенчатой ионизации этого уровня (см. например [20]):

$$n_E = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{n\sqrt{E}}{\theta_e^{3/2}} e^{-E/\theta_e},$$

$$P_J = \frac{2g_i}{g_a} \left(\frac{m}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \frac{\theta_e^{3/2}}{n} e^{-J/\theta_e}. \quad (2)$$

Здесь n – концентрация электронов в плазме, $g_I \approx g_a$ – статистические веса состояний иона и нейтрального атома с изомерным ядром. Из формул (1), (2) получается следующее простое выражение для оценки вероятности $P_{\text{СДЯИ}}$ девозбуждения изомерного ядра

$$P_{\text{СДЯИ}} = P_{\text{ОВЭК}} P_J \sim \frac{1}{\pi^2} \frac{\Gamma\tau}{\hbar} e^{-\Delta E/\theta_e}. \quad (3)$$

В использованном приближении температурная зависимость вероятности $P_{\text{СДЯИ}}$ сводится только к экспоненциальной зависимости от отношения $\Delta E/\theta_e$ и для наибольшей эффективности процесса СДЯИ температура плазмы должна быть близка к энергии триггерного перехода, хотя процесс возможен и при намного меньшей температуре плазмы. Вероятность девозбуждения пропорциональна времени жизни плазмы. Такая оценка хорошо описывает результат эксперимента [15] по возбуждению изомера ^{235m}U ($\Delta E = 76$ эВ), для которого период полураспада изомера $T_{1/2} = 26$ мин соответствует ширине изомерного перехода $\Gamma \sim \hbar/T_{1/2}$. Этот эксперимент проводился на установке “Тритон” Троицкого института инновационных термоядерных исследований (г. Москва), где плазма температурой $\theta_e \approx 20$ эВ, содержащая ионы ^{235}U , создавалась облучением оксида ^{235}U электронами энергии 500 кэВ импульсом тока 150 кА длительностью 30 нс. Вероятность возбуждения изомера ^{235m}U в такой плазме была порядка $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-14}$, что близко к расчетному значению по формуле (3).

Можно ожидать, что эксперименты с плазмой СЭР окажутся более чувствительными к обнаружению СДЯИ по сравнению с лазерными экспериментами. Очень существенное преимущество такой плазмы в том, что при прохождении тока по плазме возникающее магнитное поле замедляет разлет плазмы, вследствие чего время жизни разрядной плазмы может достигать 100 нс и более [19] и согласно формуле (3) пропорционально увеличивается вероятность девозбуждения изомеров $P_{\text{СДЯИ}}$. Современные установки с сильноточным электрическим разрядом дают плазму с температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ, соответственно и исследование процесса СДЯИ в такой плазме возможно на ядерных изомерах с энергией триггерного перехода ΔE до нескольких кэВ. Как и для лазерной плазмы, такими изомерами могут быть ^{235m}U ($\Delta E = 76$ эВ) и ^{110m}Ag ($\Delta E = 1128$ эВ). Недавно в разрядной плазме с температурой $\theta_e \approx 10$ эВ для изомера ^{229m}Th ($\Delta E \approx 8$ эВ) была получена вероятность возбуждения $10^{-3}\%$ [21]. Но с практической точки зрения наибольший интерес представляет изомер $^{186m1}\text{Re}$.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ ДЕВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРА $^{186m1}\text{Re}$ В ПЛАЗМЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА СЭР

Как уже было показано в лазерном эксперименте [8], стимулирование девозбуждения изомера $^{186m1}\text{Re}$ в плазме с температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ возможно с вероятностью $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-5}\%$. Если ориентироваться на этот результат, то с учетом увеличения на два порядка величины времени жизни разрядной плазмы по сравнению с лазерной плазмой получается, что в разрядной плазме температурой $\theta_e \sim 1$ кэВ для изомера $^{186m1}\text{Re}$ вероятность девозбуждения $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-3}\%$. Эффективность стимуляции девозбуждения изомеров в плазме можно увеличить при подсветке плазмы фотонами частоты, резонансной триггерному переходу, происходящему путем обратной внутренней электронной конверсии [22]. В качестве источника излучения можно использовать излучение самой плазмы при введении в плазму химических элементов с энергией фотонов характеристического рентгеновского излучения, равной энергии триггерного перехода [23]. Однако для девозбуждения изомера $^{186m1}\text{Re}$ энергию триггерного перехода еще предстоит определить.

Для оценки перспективы использования изомера $^{186m1}\text{Re}$ существенно, что этот изотоп можно получить в виде чистого изомерного вещества. При наработке изомера в ядерном реакторе изотоп образуется в 0.3% случаев захвата нейтронов природным изотопом ^{185}Re [24]. В результате в стартовом рении образуется смесь изотопов рения, но после предварительной очистки от других химических элементов изотоп с массовым числом 186 может быть выделен из этой смеси методом газо-центрифужного разделения. Это и будет практически чистый изотоп $^{186m1}\text{Re}$, поскольку ядра ^{186}Re в основном состоянии быстро распадаются.

При одиночном электрическом разряде вероятность девозбуждения изомера $^{186m1}\text{Re}$ очень мала, но процесс стимуляции девозбуждения изомера можно сделать многократным, если использовать импульсный электрический разряд в газообразной атмосфере гексафторида рения, этот газ по-видимому также пригоден и для газо-центрифужного разделения изотопов рения. Гексафторид рения образуется из элементов при 125°C и кипит при 33.7°C . При образовании плазмы в электрическом разряде гексафторид будет разлагаться на элементарные рений и фтор, часть рения в виде металла оседает на стенки разрядной камеры, но после разряда весь рений снова можно перевести в газообразный гексафторид и разряд можно повторять. Таким образом можно провести девозбуждение большей части изомера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное рассмотрение показывает перспективность исследования стимулированного девозбуждения ядерных изомеров с энергией триггерного перехода ΔE до ~ 1 кэВ в плазме высокопоточного электрического разряда (СЭР) с электронной температурой $\theta_e \sim \Delta E$. В частности, это изомеры ^{229m}Th ($\Delta E \approx 8$ эВ), ^{235m}U ($\Delta E = 76$ эВ), ^{110m}Ag ($\Delta E = 1128$ эВ). Эксперименты с плазмой СЭР позволят исследовать механизмы девозбуждения ядерных изомеров, которые можно было бы использовать для исследования более широкого набора ядер в более горячей лазерной плазме.

Для создания источника энергии наиболее перспективен изотоп $^{186m1}\text{Re}$ (энергия триггерного перехода в настоящее время не известна) с периодом полураспада $2 \cdot 10^5$ лет, для которого уже наблюдалось стимулированное девозбуждение в лазерной плазме при $\theta_e \sim 1$ кэВ. Предложены способы увеличения эффективности стимуляции девозбуждения изомера $^{186m1}\text{Re}$ в плазме — использование долгоживущей плазмы высокопоточного электрического разряда взамен короткоживущей лазерной плазмы, подсветка плазмы с изомерными ядрами фотонным излучением, резонансным триггерному переходу, многократное повторение электрического разряда в $^{186m1}\text{Re}$ плазме. Изотоп $^{186m1}\text{Re}$ может быть получен облучением нейтронами природного рения в ядерном реакторе и может быть выделен в чистом виде методом газо-центрифужного разделения изотопов рения. Таким образом, несмотря на то, что к настоящему времени ядерные изотопные источники энергии реализовать не удалось, накопленный экспериментальный и теоретический материал, особенно экспериментальные и теоретические работы последних лет по стимулированному девозбуждению изомера $^{186m1}\text{Re}$ [8, 14, 16, 23, 24], позволяет сейчас приступить к разработке источника энергии на основе изомера $^{186m1}\text{Re}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит за сотрудничество и очень полезные и интересные обсуждения деталей и перспектив стимулированного девозбуждения ядерных изомеров доктора В.В. Ватулина и доктора Н.В. Жидкова из Российского федерального ядерного центра “Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, доктора Г.С. Волкова и доктора Е.В. Грабовского из Троицкого института инновационных и термоядерных исследований, доктора Ф.Ф. Карпешина из Метрологического института им. Д.И. Менделеева, профессора И.А. Митропольского из Санкт-Петербургского государственного университета. Автор благодарит за иррелевантные и полезные дискуссии по докладом этой работы участников семинаров в вышеперечисленных научных центрах, участников семинара члена-корреспон-

дента РАН А.А. Воробьева в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова и семинара академика РАН В.Я. Панченко в Курчатовском институте, участников конференций, на которых рассматривались представленные в настоящей работе материалы. В частности автор благодарит доктора Яна Пихала (Jan Pichal) из Чешского Технического университета в Праге, отметившего невозможность при стимулированном девозбуждении изомера $^{186m1}\text{Re}$ триггерного перехода на изомерный уровень $^{186m2}\text{Re}$ ввиду его большого времени жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Карамян С.А. // ЭЧАЯ. 2008. Т. 39 (4). С. 949. [Karamian S.A. // Phys. Part. Nucl. 2008. V. 39 (4). P. 490].
2. Collins C.B., Zoita N.C., Rusu A.C. et al. // Europhys. Lett. 2002. V. 57 (5), P. 677.
3. Гольданский В.И., Намиот В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23 (9). С. 495. [Goldanskii V.I., Namiot V.A. // JETP Lett. 1976. V. 23 (9). P. 451].
4. Tkalya E.V. // Nucl. Phys. A. 1992. V. 539 (2). P. 209.
5. Karpeshin F.F., Trzhaskovskaya M.B., Zhang J. // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 39. P. 341.
6. Wu Y., Gunst J., Keitel C. H., Pálffy A. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 052504.
7. Baglin Coral M. // Nucl. Data Sheets. 2003. V. 99. P. 1.
8. Ватулин В.В., Жидков Н.В., Римский-Корсаков А.А., Кольцов В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. С. 401. [Vatulin V.V., Jidkov N.V., Rimsky-Korsakov A.A., Koltsov V.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2017. V. 81 (10). P. 1159].
9. Андреев А.В., Гордиенко В.М., Савельев А.Б. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31(11). С. 941. [Andreev A.V., Gordienko V.M., Savel'ev A.B. // Quantum Electron. 2001. V. 31(11). P. 941].
10. Афонин В.И., Вихляев Д.А., Какшин А.Г. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 3. С. 75.
11. Андреев А.А., Платонов К.Ю., Рождественский Ю.В. и др. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40 (4). С. 349. [Andreev A.A., Platonov K.Yu., Rozhdestven-
12. skii Yu.V., et al. // Quantum Electron. 2010. V. 40 (4). P. 349].
12. Бородин В.Г., Ватулин В.В., Жидков Н.В. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10 (5). С. 480. [Borodin V. G., Vatulin V.V., Zhidkov N.V. et al. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82 (12). P. 1706].
13. Кольцов В.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82 (10). С. 92. [Koltsov V.V. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2018. V. 82 (10) P. 1320].
14. Карасев В.В., Кольцов В.В., Римский-Корсаков А.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82(10). С. 6. [Karasev V.V., Koltsov V.V., Rimsky-Korsakov A.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2018. V. 82 (10). P. 1237].
15. Арутюнян Р.В., Баранов И.Ю., Большой Л.А. и др. “Возбуждение низколежащего изомера урана-235 в плазме, создаваемой электронным пучком”. Препринт ИАЭ-5087/6. 1990. Москва: Инст. атом. энер. им. И.В. Курчатова.
16. Koltsov V.V. Proc. 68th Int. Conf. on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure (Nucleus-2018). July 2–6, 2018. Voronezh, Russia. P. 127.
17. Альбииков З.А., Велюхов Е.П., Веретенников А.Н. и др. // Атомная энергия. 1990. Т. 68 (1). С. 26. [Albikov Z.A., Velishov E.P., Veretenikov A.N. et al. // Sov. At. Energy. 1990. V. 68 (1). P. 26].
18. <https://www.sandia.gov>.
19. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. “Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках”. 1990. Москва: Энергоатомиздат.
20. Fridman A. Plasma Chemistry. 2008. New York: Cambridge Univ. Press.
21. Borisyuk P.V., Chubunova E.V., Kolachevsky N.N. et al. // arXiv:1804.00299v1 [nucl-th]. 2018.
22. Кольцов В.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83 (9). С. 1252. [Koltsov V.V. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019. V. 83(9). P. 1141].
23. Koltsov V.V. Proc. 69th Int. Conf. on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure (Nucleus-2019). July 1–5, 2019. Dubna, Russia. P. 177.
24. Seegmiller D.W., Linder M., Meyer R.A. // Nucl. Phys. A. 1972. V. 185. P. 94.

Prospects for Plasma De-Excitation of ^{186m}Re Nuclear Isomer

V. V. Koltsov*

JSC Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg, 194021 Russia

*e-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

Received November 20, 2020; revised November 26, 2020; accepted December 7, 2020

Abstract—In the paper is discussed the prospects of studying the stimulated de-excitation of the nuclear isomers (SDENI) $^{186m1}\text{Re}$ in a plasma with an electron temperature θ_e of the order of the energy ΔE of the trigger transition, this transition transfers the isomeric nucleus to a higher level, from which rapid decay into the ground state of the nucleus is possible. Recently, stimulated de-excitation of the $^{186m1}\text{Re}$ isomer was found in a laser plasma with a temperature of $\theta_e \sim 1$ keV and a lifetime of about 0.3 ns. However, the probability P_{SDENI} of the stimulated de-excitation of the isomer was very small, about $10^{-5}\%$. In order to increase the probability

P_{SDENI} , it is proposed to use instead the laser plasma the plasma of a high-current electric discharge with a temperature of $\theta_e \sim 1$ keV. In particular, it is proposed to use the plasma of the electric explosion of conductors, the lifetime of such plasma can be two orders of magnitude longer than the lifetime of the laser plasma. To select the plasma parameters for the most effective stimulation of $^{186m1}\text{Re}$ isomers de-excitation, a simple formula was derived to estimate the probability P_{SDENI} depending on the plasma parameters. In order to increase the probability P_{SDENI} , it is also suggested to irradiate the plasma with photons of the frequency resonant to the trigger transition, and a mode of multiple repetitive high-current electric discharges in a plasma containing isomeric nuclei is proposed. It is noted that the accumulated experimental and theoretical results allows already now to start developing an energy source based on the $^{186m1}\text{Re}$ isomers.

Keywords: stimulation of de-excitation of nuclear isomers, laser plasma, plasma of a high-current electric discharge, internal electron conversion