

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

УДК 539.17

**О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ СТИМУЛИРОВАННОГО  
ДЕВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕРНОГО ИЗОМЕРА  $^{186m}\text{Re}$  В ПЛАЗМЕ  
СИЛЬНОТОЧНОГО Z-ПИНЧА НА УСТАНОВКЕ “АНГАРА-5-1”**

© 2022 г. Г. С. Волков<sup>а</sup>, Е. В. Грабовский<sup>а</sup>, А. Н. Грицук<sup>а</sup>, В. В. Карасев<sup>б</sup>, В. В. Кольцов<sup>б</sup>, \*

<sup>а</sup>АО “ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (“ТРИНИТИ”), Москва, 142092 Россия

<sup>б</sup>АО “Радиовый институт им. В.Г. Хлопина”, Санкт-Петербург, 194021 Россия

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

Поступила в редакцию 25.10.2021 г.

После доработки 17.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Рассмотрена методика эксперимента по поиску стимуляции девозбуждения ядерного изомера (СДЯИ)  $^{186m}\text{Re}$  (период спонтанного полураспада изомера  $T_{1/2} = 2 \cdot 10^5$  лет) в плазме сильноточного Z-пинча. На основании недавно полученных результатов наблюдения СДЯИ для  $^{186m}\text{Re}$  в лазерной плазме показывается возможность наблюдения СДЯИ на установке “Ангара-5-1” для  $^{186m}\text{Re}$  в плазме Z-пинча с электронной температурой около 1 кэВ. Обсуждаются конструкция лайнера – набора металлических проволочек с изотопом  $^{186m}\text{Re}$ , при электрическом взрыве которых создается Z-пинч, методика внесения изомера  $^{186m}\text{Re}$  в лайнер и методика детектирования СДЯИ для  $^{186m}\text{Re}$  в плазме Z-пинча.

*Ключевые слова:* ядерные изомеры, стимуляция девозбуждения ядерных изомеров, лазерная плазма, Z-пинч, электроосаждение рения

DOI: 10.56304/S2079562922030551

**ВВЕДЕНИЕ**

Недавно в совместной работе Института экспериментальной физики в Сарове и Радиового института наблюдали стимулированное девозбуждение ядер изомера  $^{186m}\text{Re}$  ( $T_{1/2, \text{is}} = 2 \cdot 10^5$  лет) в лазерной плазме установки “Искра-5” [1]. Лазерные импульсы направляли на мишени из слоев рения толщиной около 0.1 мкм, нанесенных на вольфрамовые или на стальные подложки. Лазерный импульс имел энергию  $\sim 1$  кДж, длительность 0.3 нс, диаметр лазерного пучка 0.6 мм. Плазма с электронной температурой  $\Theta_e \sim 1$  кэВ образовывалась из рения и части подложки, масса плазмы  $\sim 10^{-6}$  г определялась диаметром лазерного пучка и толщиной  $\sim 0,1$  мкм слоя мишени, переходящего в плазму. Время жизни плазмы определялось длительностью лазерного импульса. В плазме, полученной из рениевых мишеней на вольфрамовых подложках, наблюдали эффект стимулированного девозбуждения ядер изомеров (СДЯИ)  $^{186m}\text{Re}$  с вероятностью  $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-5}\%$ , которую определяли после лазерного выстрела по степени нарушения радиоактивного равновесия между распадом изомера и основного состояния ядра  $^{186}\text{Re}$  ( $T_{1/2, \text{g}} = 90$  ч) в веществе плазмы, осевшем на стенки мишенной камеры  $\varnothing 20 \times 15$  мм. Такое на-

рушение равновесия искали по изменению во времени интенсивности  $I_{137}$   $\gamma$ -квантов 137 кэВ, излучаемых изомерным веществом после  $\beta$ -распада основного состояния ядер  $^{186}\text{Re}$ . Если в плазме происходит импульсная стимуляция девозбуждения изомера, то заселенность основного состояния ядер  $^{186}\text{Re}$  скачкообразно увеличивается и затем должен быть экспоненциальный спад интенсивности квантов 137 кэВ с периодом 90 ч до равновесного значения. В эксперименте [1] приблизительно через сутки после лазерных выстрелов начинали измерять интенсивность  $I_{137}$  после установки ампул с облученным в лазерной плазме изотопом  $^{186m}\text{Re}$  в малофоновый  $\gamma$ -спектрометр с кристаллом ОЧГ 150 см<sup>3</sup> с колодезем и действительно увидели изменение интенсивности  $I_{137}$  от времени.

По-видимому, единственным эффективным способом стимуляции девозбуждения ядерных изомеров является их возбуждение на вышележащие триггерные уровни, откуда ядро может распадаться как в основное состояние, так и обратно в изомерное состояние (см. например [2] и ссылки там). Такие триггерные переходы имеют меньшую мультипольность, чем прямые изомерные переходы на нижележащие уровни, поэтому триг-

герные переходы индуцировать проще. Наиболее эффективным способом возбуждения триггерных уровней является помещение изомерных ядер в плазму с электронной температурой порядка энергии триггерного перехода. Возбуждение триггерного уровня может идти путем обратной внутренней электронной конверсии (ОВЭК), первоначально предложенной в 1976 г. Гольданским и Намиотом [3]. В этом процессе свободный электрон плазмы захватывается ионизованным атомом с изомерным ядром, избыточная энергия электрона, равная его кинетической энергии и энергии связи электрона в атоме, идет не только на испускание фотона или Оже электрона, но в случае резонанса – совпадения электронной энергии с энергией ядерного триггерного перехода, может происходить возбуждение ядра. Процесс ОВЭК теоретически исследовался многими авторами (см. например ссылки в работе [2]), возбуждение триггерного перехода энергии 4.8 кэВ за счет ОВЭК наблюдали при торможении в свинцовой мишени изомерных ядер  $^{93m}\text{Mo}$  энергии около 800 МэВ [4].

Согласно [2], для плазмы, близкой к равновесию, вероятность возбуждения триггерного уровня и соответственно вероятность стимулированного девозбуждения ядерных изомеров можно оценить по следующей формуле

$$P_{\text{СДЯИ}} \sim \frac{1}{\pi^2} \frac{\Gamma \tau}{\hbar} e^{-\Delta E / \Theta_e}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время жизни плазмы;  $\hbar$  – постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ;  $\Gamma$  – ширина конверсионного перехода с возбуждаемого ядерного уровня в изомерное состояние ядра, связанная с периодом полураспада  $T_{1/2}$  возбуждаемого уровня соотношением  $\Gamma \sim \hbar / T_{1/2}$ .

Для возможности девозбуждения изомера в плазме в ядре рения  $^{186}\text{Re}$  должен существовать триггерный уровень и его энергия должна превышать энергию изомерного уровня не более чем на несколько кэВ, поскольку наблюдалось стимулированное девозбуждение изомера в лазерной плазме с температурой 1 кэВ. Параметры этого триггерного уровня в настоящее время неизвестны и напрямую он не наблюдался. Как было отмечено в работе [2], только расчетным путем определить параметры этого триггерного уровня невозможно, для ядер хорошо известны только те уровни энергии, которые заселяются в известных ядерных реакциях. В различных ядерных реакциях одно и то же ядро образуется в различных возбужденных состояниях, при распаде этих состояний в каскадах электромагнитных переходов могут проявляться различные уровни энергии этого ядра. Так, при образовании одного и того же ядра путем электронного захвата и бета-распада обычно проявляется различная система уровней энер-

гии этого ядра. Что же касается возбуждения изомеров, то это малоисследованный тип ядерных реакций, и в таких реакциях могут проявиться новые ядерные уровни, в том числе и новые триггерные уровни, удобные для девозбуждения изомеров. Особенно это относится к деформированным нечетно-нечетным ядрам со сложной структурой уровней, в частности к ядру  $^{186}\text{Re}$ .

Вероятность девозбуждения  $P_{\text{СДЯИ}}$  по механизму ОВЭК может быть увеличена за счет резонансной подсветки плазмы фотонами с энергией, равной энергии триггерного перехода. При резонансной подсветке плазмы с ядерными изомерами вероятность процесса СДЯИ по механизму ОВЭК увеличивается за счет увеличения в плазме концентрации резонансных электронов при ионизации резонансными фотонами атомов с изомерными ядрами или с ядрами их изотопов [5]. Увеличение вероятности  $P_{\text{СДЯИ}}$  возможно также за счет стимуляции резонансными фотонами излучения виртуального фотона, участвующего в процессе ОВЭК, аналогично рассмотренной в работе [6] резонансной стимуляции излучения виртуального фотона при прямом конверсионном ядерном переходе. В качестве возможного источника резонансного излучения в работах [2, 5] рассматривалось излучение самой плазмы при введении в плазму химических элементов с энергией характеристического рентгеновского излучения, равной энергии триггерного перехода. Интересно, что в работе [1] эффект девозбуждения наблюдали только для лазерных мишеней, в которых рений был нанесен на вольфрамовые подложки, и эффект не наблюдали для рениевых мишеней со стальной подложкой. Причина преимущества вольфрамовой подложки осталась невыясненной, возможно, возбуждаемый плазмой рентген вольфрама является резонансным для триггерного перехода в ядре  $^{186}\text{Re}$ .

В работе [1] также был проведен поиск девозбуждения изомера  $^{186m}\text{Re}$  при его облучении тормозными фотонами энергии до 40 кэВ или электронами энергии 10 кэВ с интегральными потоками намного большими, чем в лазерной плазме установки “Искра-5”. В этих экспериментах без образования плазмы не обнаружили стимулированное девозбуждение изомера  $^{186m}\text{Re}$ . Это указывает на девозбуждение изомера  $^{186m}\text{Re}$  в плазме именно по механизму ОВЭК, а например не за счет возбуждения триггерного уровня при неупругом рассеянии электронов плазмы на изомерных ядрах  $^{186m}\text{Re}$  или из-за поглощения изомерным ядром  $^{186m}\text{Re}$  рентгеновских квантов. Поскольку согласно оценке (1) девозбуждение изомеров по механизму ОВЭК в плазме зависит только от электронной температуры, то девозбуждение изомера  $^{186m}\text{Re}$  должно наблюдаться в любой плазме с температурой  $\Theta_e \sim 1$  кэВ, а не только в лазерной плазме. Вероятность девозбуж-

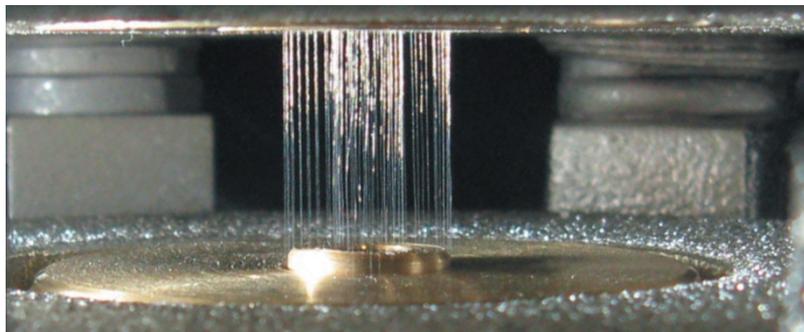


Рис. 1. Фотография композитного лайнера в разрядной камере установки “Ангара-5-1”.

дения  $P_{\text{СДЯИ}}$  пропорциональна времени жизни плазмы и для усиления эффекта в работах [2, 7] было предложено вместо лазерной плазмы использовать плазму сильноточного электрического разряда, время жизни которой за счет магнитного удержания возрастает до 10–100 нс при сохранении температуры  $\Theta_e \sim 1$  кэВ. Плазма с такими параметрами может быть получена в экспериментах с сильноточными Z-пинчами на установке “Ангара-5-1” в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ).

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте предполагается поместить изомерные ядра  $^{186m}\text{Re}$  в плазму Z-пинча с электронной температурой около 1 кэВ на максимально большое время и потом исследовать вещество плазмы на  $\gamma$ -спектрометре на предмет радиоактивного равновесия между изомерным и основным состояниями ядра  $^{186}\text{Re}$ . Однако при подготовке эксперимента возникло много неисследованных ранее методических вопросов, таких как введение в горячую плазму большой массы рения, сбор вещества плазмы для последующего  $\gamma$ -спектрометрического анализа, минимальная температура плазмы, при которой еще можно рассчитывать на наблюдение стимулированного девозбуждения изомера  $^{186m}\text{Re}$ . Эти вопросы рассматриваются в настоящей работе.

### 1.1. Получение плазмы

На установке “Ангара-5-1” высокотемпературную плотную плазму (температура  $\sim 1$  кэВ и электронная плотность  $\sim 10^{21}$  см $^{-3}$ ), содержащую тяжелые химические элементы, ранее получали при имплюзии композитного лайнера — двухкаскадной цилиндрической многопроволочной сборки при прохождении через нее импульса тока около 4 МА длительностью  $\sim 100$  нс [8, 9]. Внешний каскад диаметром 12 мм составляется из нескольких де-

сятков алюминиевых проволочек диаметром 18 мкм, а внутренний каскад диаметром 6 мм образуется из W-проволочек диаметром 6 мкм (рис. 1). Для внедрения тяжелых элементов в плотную горячую плазму необходим именно многопроволочный композитный лайнер, поскольку плазму только из тяжелых элементов сильно не нагреть из-за большой интенсивности излучения тяжелых элементов в плазме. Внешний алюминиевый каскад лайнера обеспечивает образование однородной высокотемпературной Z-пинч плазмы высокой плотности. За счет действия этой плазмы материал внутренних W-проволочек также переходит в высокотемпературную плазму, но массовая доля тяжелых элементов в плазме не должна превышать 10%. Такая конструкция лайнера подходит для экспериментов с изомером  $^{186m}\text{Re}$ . Мы выбрали внешний каскад диаметром 12 мм с погонной массой  $\sim 300$  мкг/см из шестидесяти Al-проволочек диаметром 18 мкм, а внутренний каскад диаметром 6 мм и погонной массой  $\sim 20$  мкг/см из четырех W-проволочек диаметром 6 мкм с нанесенных на них изомером  $^{186m}\text{Re}$ . Выбранное количество Al и W-проволочек близко к оптимальному для наиболее эффективного нагрева плазмы [10].

Выбор именно W-проволочек в качестве носителя изомера для первоначальных экспериментов определялся прежде всего тем, что хотелось наиболее полно повторить условия эксперимента [1], в котором уже наблюдалось девозбуждение изомера Re при образовании лазерной плазмы при облучении изомера Re именно на W-подложках. Кроме того, имеется большой опыт использования W-проволочек в лайнерах установки “Ангара-5-1”. Конечно, представляет интерес исследование девозбуждения изомера при выборе в качестве носителя изомера проволочек из более легкого материала чем вольфрам. В этом случае число проволочек с изомером в лайнере можно увеличить и соответственно увеличить и количество изомера, вносимого в лайнер.

В пробных выстрелах с лайнерами такой конструкции диагностику плазмы проводили также как и в работе [9]. Спектрографом с выпуклым кристаллом слюды радиуса 2.5 см измеряли рентгеновский спектр плазмы и из него оценивали температуру и электронную плотность плазмы. Температура и плотность подбирались так, чтобы расчетные значения отношений интенсивностей резонансных линий [H] и [He] ионов Al, а также отношений интенсивностей интеркомбинационной и резонансной линий [He] иона Al совпадали с экспериментальными. Длительность импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ) определяли по сигналам вакуумных рентгеновских фотодиодов, имеющих чувствительность в диапазоне энергий квантов 0.1–2 кэВ. Полный выход МРИ измеряли термпарным калориметром.

### 1.2. Сбор вещества плазмы

Сбор вещества плазмы для последующего определения вероятности девозбуждения  $P_{сдв}$  по нарушенному радиоактивному равновесию по методу работы [1] представляет сложную задачу. Хотя вещество плазмы Z-пинча после выстрела разлетается неизотропно — преимущественно осаждается на торцах разрядного промежутка, но и в поперечном направлении разлет плазмы также значителен. Поэтому для эффективного сбора вещества плазмы разрядный промежуток необходимо по возможности со всех сторон окружить коллектором — поверхностью, на которую собирается вещество плазмы. В силу конструкции разрядной камеры установки “Ангара-5-1” поверхности коллектора могут находиться только на достаточно большом расстоянии от разрядного промежутка — не ближе 10 см. Мы рассчитывали использовать коллектор из алюминиевой фольги толщиной около 0.5 мм, который после плазменных выстрелов можно было бы спрессовать и поместить в колодец полупроводникового детектора для измерения интенсивности  $\gamma$ -квантов энергии 137 кэВ, излучаемых  $^{186}\text{Re}$  и его изомером, осевшим на коллектор. Однако оказалось, что ударная волна, возникающая при плазменном разряде, полностью такой коллектор разрушает, поэтому для предотвращения разрушения коллектор должен быть толстостенным. Вещество плазмы с коллектора может быть извлечено либо промывкой стенок коллектора растворителем, либо механически. В настоящее время эта методика сбора вещества плазмы еще находится в разработке.

### 1.3. Введение изомера $^{186m}\text{Re}$ в лайнер

Нами была разработана методика введения в лайнер изомера  $^{186m}\text{Re}$  путем электроосаждения слоя рения на W-проволочки лайнера. Использовали тот же изомерный материал, что и в работе

[1] — перренат с  $\sim 0.001\%$  содержанием изомера по металлу, удельная активность изомера в металлическом рении  $\sim 10^4$  Бк/г. Изомер был получен при облучении в реакторе металлического природного рения нейтронами с флюенсом  $10^{20}$  см $^{-2}$  [11]. Ввиду малой концентрации изомера необходимо побольше рения ввести в лайнер, чтобы в веществе плазмы, осевшим на коллектор, изомер был виден детектором даже если в плазме не произойдет стимулированного девозбуждения изомера. Однако при этом нужно соблюсти условие общей небольшой массы тяжелых элементов в плазме — не более 10%. Поэтому мы ограничились нанесением слоя металлического рения толщиной около 0.5 мкм на W-проволочки лайнера. Тогда на четырех вольфрамовых проволочках в лайнере оказывается около 0.1 Бк изомера, масса рения в лайнере  $\sim 10$  мкг. При учете чувствительности измерения активности изомера  $^{186m}\text{Re}$  полупроводниковым детектором с колодцем  $\sim 0.1$  Бк, малая активность изомера в лайнере требует сбора вещества плазмы Z-пинча, полученной от нескольких лайнеров, и накладывает жесткие ограничения на полноту сбора вещества плазмы для его анализа на радиоактивное равновесие.

Для сборки лайнера было необходимо нанести рений на участок длиной 6 см в середине W-проволочки длиной 20 см. Следует отметить, что с тонкими W-проволочками очень неудобно работать, они легко рвутся и перепутываются. Ввиду этого мы каждую из W-проволочек длиной 20 см продевали в отдельную кварцевую трубку диаметром 9 мм и длиной 9 см. Оба конца W-проволочки закрепляли на одном из концов кварцевой трубки. При этом половина W-проволочки оказывалась внутри кварцевой трубки, а другая половина снаружи. Наборы из пяти таких кварцевых трубок с W-проволочками мы использовали в качестве катода при нанесении рения на середины W-проволочек. Электролиз проводили в стеклянном сосуде емкостью 50 мл. В качестве анода использовали Pt пластину площадью 1 см $^2$ , закрепленную на дне электролизера на платиновой проволоке. Состав электролита выбирали согласно методике [12] для электроосаждения слоя рения на вольфрам — 70 г/л серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и 40 г/л сульфата аммония. Ввиду небольшого количества изомерного материала, который был в нашем распоряжении, в электролит добавляли 1.2 г/л перрената аммония  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ , это приблизительно на порядок меньше концентрации, рекомендованной в [12]. Плотность тока выбирали около 15 мА/см $^2$ , что соответствовало значению, рекомендованному в [12], с учетом меньшей концентрации рения в электролите. Отладку процесса электролиза проводили, осаждая рений на катоды большой площади при той же плотности тока электролиза. Выход рения по току составлял око-

**Таблица 1.** Зависимость вероятности стимулированного девозбуждения изомера  $P_{\text{СДЯИ}}$  от температуры при времени жизни плазмы 30 нс согласно оценке по формуле (2)

Температура плазмы $\Theta_e$ , кэВ	$P_{\text{СДЯИ}}$ , %		
	$\Delta E = 1$ кэВ	$\Delta E = 3$ кэВ	$\Delta E = 10$ кэВ
1.0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
0.5	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8}$
0.2	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-25}$
0.1	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-42}$

ло 3%. Контроль массы осажденного рения проводили по активности изомера  $^{186m}\text{Re}$  после электролиза. Для полного восстановления до металла рения, осажденного на W-проволочках, проводили отжиг в атмосфере водорода W-проволочек с рением прямо в сборке с кварцевыми трубками. W-проволочки отсоединяли от кварцевых трубок непосредственно перед сборкой лайнера.

## 2. ПЕРСПЕКТИВЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лазерные эксперименты [1] показали вероятность  $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-5}\%$  для девозбуждения изомера  $^{186m}\text{Re}$  в плазме с температурой 1 кэВ и временем жизни 0.3 нс. Тогда для электро-разрядной плазмы, с учетом увеличения на два порядка величины времени жизни плазмы при той же температуре плазмы получается, что вероятность девозбуждения изомера  $^{186m}\text{Re}$  может достигать значения  $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-3}\%$ . При этом чувствительность экспериментов примерно такая же, как и для лазерных экспериментов, на уровне вероятности  $P_{\text{СДЯИ}} \sim 10^{-6}\%$ , если измерять эффект стимуляции по неравновесному излучению  $\gamma$ -квантов от изомерного вещества с  $^{186m}\text{Re}$  после его пребывания в плазме. Согласно оценке (1) вероятность девозбуждения изомеров  $P_{\text{СДЯИ}}$  при произвольной температуре плазмы  $\Theta_e$  можно выразить через вероятность  $P_{\text{СДЯИ}}$  при температуре  $\Theta_e = 1$  кэВ следующим образом

$$P_{\text{СДЯИ}}(\Theta_e) \sim P_{\text{СДЯИ}}(\Theta_e = 1 \text{ кэВ}) e^{-\Delta E \left( \frac{1}{\Theta_e} - \frac{1}{\Theta_{e,1 \text{ кэВ}}} \right)}. \quad (2)$$

Минимальное значение температуры  $\Theta_e$ , при которой еще можно детектировать эффект, зависит от неизвестной на сегодня энергии триггерного перехода  $\Delta E$ . Величины вероятности  $P_{\text{СДЯИ}}$  для нескольких значений температуры плазмы приведены в табл. 1 в различных предположениях о величине  $\Delta E$ .

При энергии триггерного перехода  $\Delta E \sim 1$  кэВ можно ожидать, что вплоть до температуры  $\Theta_e \sim 200$  эВ эффект стимуляции в разрядной плазме еще можно наблюдать, поскольку эффект еще остается в пределах чувствительности измерения. При больших значениях энергии триггерного перехода требования к температуре плазмы более жесткие, но в любом случае при температуре  $\Theta_e = 1$  кэВ эффект остается измеримым. Именно такая температура плазмы с изомерными ядрами  $^{186m}\text{Re}$  достижима на установке “Ангара-5-1”. Поэтому мы надеемся, что в плазме установки “Ангара-5-1” можно наблюдать стимулированное девозбуждение изомера  $^{186m}\text{Re}$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективу комплекса “Ангара-5-1” за обеспечение экспериментальных работ и благодарны доктору Н.В. Жидкову из Института экспериментальной физики (г. Саров) за полезные консультации по сбору вещества плазмы на коллектор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Vatulin V.V., Jidkov N.V., Rimsky-Korsakov A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2017. V. 81. No. 10. P. 1159. <https://doi.org/10.3103/S1062873817100252>; *Вамулин В.В., Жидков Н.В., Римский-Корсаков А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. С. 401. <https://doi.org/10.7868/S0367676517100015>
2. *Koltsov V.* // Plasma Phys. Technol. 2021. V. 8. No. 1. P. 5. <https://doi.org/10.14311/ppt.2021.1.5>
3. *Goldanskii V.I., Namiot V.A.* // Phys. Lett. B. 1976. V. 62. P. 393; *Гольданский В.И., Намиот В.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23. № 9. С. 495.
4. *Chiara C.J., Carroll J.J., Carpenter M.P., Greene J.P., Hartley D.J., Janssens R.V. F., Lane G.J., Marsh J.C., Matters D.A., Polasik M., Rzaekiewicz J., Seweryniak D., Zhu S., Bottoni S., Hayes A.B., Karamian S.A.* // Nature (London, U.K.) 2018. V. 554. P. 216. <https://doi.org/10.1038/nature25483>
5. *Koltsov V.V.* // Proc. 69th Int. Conf. Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure Nucleus-2019. July 1–5, 2019. Dubna. Russia. P. 177.
6. *Koltsov V.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019. V. 83. No. 9. P. 1144. <https://doi.org/10.3103/S1062873819090120>; *Кольцов В.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 9. С. 1252. <https://doi.org/10.1134/S0367676519090126>
7. *Koltsov V.V.* // Proc. 68th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure. Int. Conf. Nucleus-2018. July 2–5, 2018. Voronezh. Russia. P. 127.
8. *Volkov G.S., Dan'ko S.A., Zehnter P., Zaitsev V.I., Mishenskii V.O., Fedulov M.V., Chuvatin A., and Eitlicher B.* // Plasma Phys. Rep. 1999. V. 25. No. 1. P. 34; *Волков Г.С., Даныко С.А., Зентер П., Зайцев В.И., Мишенский В.О., Федулов М.В., Чуватин А., Этлихер Б.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 1. С. 34.

9. Volkov G.S., Zaitsev V.I., Grabovski E.V., Fedulov M.V., Aleksandrov V.V., Lakhtyushko N.I. // Plasma Phys. Rep. 2010. V. 36. No. 3. P. 191; Волков Г.С., Зайцев В.И., Грабовский Е.В., Федюлов М.В., Александров В.В., Лактюшко Н.И. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 3. С. 211.
10. Coverdale C.A., Deeney C., Douglas M.R., Apruzese J.P., Whitney K.G., Thornhill J.W., Davis J. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. No. 6. P. 065001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.065001>
11. Koltsov V.V. // Proc. 70th Int. Conf. Nucleus-2020 Nuclear Physics and Elementary Particle Physics: Nuclear Physics Technologies. October 11–17, 2020. P. 136.
12. Грилихес С.Я., Тихонов К.И. Электрохимические и химические покрытия. 1990. Ленинград: Химия.

## On the Possibility of Observing the Stimulated De-Excitation of the Nuclear Isomer $^{186m}\text{Re}$ in the Plasma of a High-Current Z-Pinch at the “Angara-5-1” Facility

G. S. Volkov<sup>1</sup>, E. V. Grabovski<sup>1</sup>, A. N. Gritsuk<sup>1</sup>, V. V. Karasev<sup>2</sup>, and V. V. Koltsov<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>JSC “Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Research (TRINITI)”, Moscow, 142092 Russia

<sup>2</sup>JSC “Khlopin Radium Institute”, Sankt-Petersburg, 194021 Russia

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

Received October 25, 2020; revised November 17, 2021; accepted November 22, 2021

**Abstract**—An experimental technique is considered to search for the stimulation of de-excitation of the nuclear isomer (SDENI)  $^{186m}\text{Re}$  (the half-life of the isomer  $T_{1/2} = 2 \times 10^5$  yr) in the plasma of a high-current Z-pinch. Based on the recently obtained results of the observation of the SDENI for  $^{186m}\text{Re}$  in a laser plasma, the possibility of observing the SDENI at the Angara-5-1 facility for  $^{186m}\text{Re}$  in a Z-pinch plasma with an electron temperature of about 1 keV is shown. The design of the liner – a set of metal wires with the  $^{186m}\text{Re}$  isomer, the electric explosion of which creates a Z-pinch, the method for introducing the  $^{186m}\text{Re}$  isomer into the liner, and the method for detecting the SDENI for  $^{186m}\text{Re}$  in the Z-pinch plasma are discussed.

**Keywords:** nuclear isomers, stimulation of de-excitation of nuclear isomers, laser plasma, Z-pinch, electro-deposition of rhenium