

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ КАТОДА В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

И. Б. Савватимова

ФГУП «НИИ НПО "ЛУЧ"»
isavvatim@mail.ru

Представлен обзор основных результатов исследования изменения элементного и изотопного состава материалов катода, облучаемых ионами водорода и дейтерия в газовом разряде с энергиями до 1 кэВ. Основная часть результатов получена с использованием методов масс-спектрометрического анализа на палладию. Изменения изотопного и элементного состава зависели от типа ионов, параметров разряда и характера тока.

Особое внимание уделено изменению изотопного состава вольфрама, как перспективного материала для ИТЭР. Установлено образование элементов с массовыми номерами изотопов 169–180, более лёгких, чем известные изотопы вольфрама. Сопоставление данных термоионизационной масс-спектрометрии с результатами гамма-спектрометрии после эксперимента и выделение пиков с наибольшей интенсивностью импульсов позволяет сделать предположение о том, что эти пики принадлежат следующим изотомам элементов: ^{169}Yb , ^{170}Hf , ^{171}mYb , ^{172}Hf и ^{178}Yb . Возрастание интенсивности этих пиков в масс-спектрах с течением времени (от двадцати часов до нескольких месяцев) после окончания экспериментов указывает на то, что облучение ионами дейтерия с энергией около 1 кэВ в газовом разряде, вероятно, интенсифицирует процессы распада вольфрама.

Введение

Исследования по изучению характера повреждения материалов катода под воздействием облучения их ионами водорода и гелия с низкой энергией (до 1 кэВ) в плазме тлеющего разряда были начаты в лаборатории А. А. Бабад-Захряпина НИИ НПО «ЛУЧ» в 70-х годах прошлого века [1–6]. В [1–6] показано, что происходит значительное увеличение (на 1–4 порядка) плотности дефектов дислокационного типа во всём объёме монокристаллов Mo и Mo-Nb толщиной до нескольких миллиметров, а при значительных энергиях разряда и длительности облучения образуются поры. В исследованиях повреждаемости материалов облучением ионами с низкой энергией в плазме тлеющего разряда применительно к ИТЭР с помощью автоионной микроскопии [7] были обнаружены все возможные дефекты, характерные для материалов, подвергавшихся облучению в реакторе и на ускорителе. Так температурные максимумы термодесорбции гелия из однотипных материалов появлялись при одинаковых температурах как после облучения ионами с низкой энергией, так

и на ускорителе и в реакторных условиях. При этом интенсивность пиков термодесорбции коррелировала с температурой при всех условиях облучения [8], что свидетельствовало о том, что интенсивность термодесорбции определялась одинаковыми типами дефектов. Исследования физико-механических свойств материалов катода в процессе и после облучения ионами [9] показали, что значения скорости ползучести при температурах выше половины температуры плавления для монокристаллического Мо и Мо-Nb размещались на одних и тех же кривых с одинаковым углом наклона и в одном диапазоне температур. Это могло свидетельствовать о наличии в образцах одинаковых дефектов, влияющих на скорость ползучести.

Последующие исследования были направлены на изучение изменения элементного и изотопного состава материалов катода в плазме тлеющего разряда в водороде, дейтерии, аргоне и ксеноне. Образцы до и после облучения ионами исследовали различными методами масс-спектрометрии, такими как: вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), вторичной ионной масс-спектрометрии с дополнительной ионизацией нейтральных распылённых частиц (ВИНМС), искровой масс-спектрометрии (ИМС) и термоионизационной масс-спектрометрии (ТИМС), а также методами рентгеновского спектрального микроанализа (РСМА). Для радиоактивных урановых образцов регистрировали также альфа-, бета-, гамма-эмиссию и проводили гамма-спектрометрию до и после экспериментов по облучению в тлеющем разряде.

Анализ многочисленных экспериментальных результатов по облучению ионами [10–31] показал, что в облучённых материалах наблюдается появление элементов, не входящих в состав материалов катода и конструктивных элементов разрядной камеры. Изменения структуры, изотопного и элементного состава катодных образцов зависели от плотности потока ионов, интегрального потока ионов, типа облучающих ионов и ряда других условий эксперимента. Была сделана попытка качественно и количественно оценить влияние каждого из параметров на интенсивность наблюдаемых изменений состава катодов.

Показано, что максимальные изменения структуры, химического и изотопного состава происходят в «горячих точках», к которым могут быть отнесены, например, кратеры от микровзрывов, фазовые выделения в результате сегрегации, вспучивания (пузыри или блистеры) и другие новообразования. Различными методами анализа выявлено, что основными элементами, появляющимися в этих зонах в заметных количествах (до единиц процентов и более) являются Mg, O, Si, Al и Ca. Наибольшие изменения изотопных соотношений наблюдали для Fe, Ca, Si и Cr при экспериментах с импульсным током. Методом РЭДСА обнаружены новые элементы, отсутствовавшие, например, в Pd до экспериментов, такие как Cd, Sr, Sn. Методом ТИМС многократно отмечали появление моноизотопных элементов с массовыми числами 59 (Co 100 %), 55 (Mn 100 %), 45 (Sc 100%), которые также не были обнаружены в исходном Pd и фоновых измерениях. Содержание и количество новых элементов, обнаруженных методом РСМА, зависело от типа облучающих ионов, параметров разряда и примесного состава исходного материала.

Изотопный анализ различными методами масс-спектрометрии выявил значительное изменение изотопного состава по сравнению с природным изотопным составом материалов. Изотопное соотношение для разных элементов и в зависимости от условий эксперимента могло изменяться от десятков процентов до нескольких порядков [10, 13, 14]. Большая часть результатов получена на палладии, частично на титане и серебре. Позднее комплекс исследований был проведён на вольфраме.

Основная часть «новых» элементов, обнаруживаемых после облучения, была распределена на границах зерен [10] и в некоторых локальных зонах образцов [12, 13, 15, 20] и их количество составляло величину от десятых долей до нескольких атомных процентов. При этом в исходных образцах содержание отдельных примесных элементов не превышало $\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} ат.% и методом РСМА не могло быть обнаружено. Такие элементы как Sc, Ti, V, Ag, Cd, In, P, Cl, Br, Ge, As, Kr, Sr, Y, Ru, Xe были обнаружены в Pd после облучения ионами всех типов (D, H, Ar, Ar+Xe), но в различных количествах [11]. Элементы с атомным номером $Z = 26$ – 31 (Fe, Cu, Zn, Ga) обнаруживались методом РСМА преимущественно после облучения ионами дейтерия.

По результатам РСМА и радиографического исследования было сделано предположение о том, что ядерные превращения происходят наиболее интенсивно только в локальных зонах [12, 15, 24]. О прохождении ядерных превращений в этих зонах свидетельствовали различия в спектрах характеристического рентгеновского излучения, указывающие на появление «новых» элементов в разных локальных зонах одних и тех же образцов [11, 24]. Примером изменения изотопных соотношений, наблюдаемых для $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$; $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$; $^{60}\text{Ni}/^{61}\text{Ni}/^{62}$; $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$ и $^{90}\text{Zr}/^{91}\text{Zr}$ [6] служат данные, приведенные в табл. 1.

Изменение изотопного соотношения в Ag 109/107 от 3/1 до 9/1 было обнаружено в разных сериях экспериментов [13]. Так значительное изменение изотопного соотношения масс 107 и 109 в палладии после облучения дейтронами представлено на рис. 1.

Если до облучения в палладии обнаруживали только изотопы палладия с массовыми числами 104, 105, 106, 108 и 110, а изотопы серебра с массовыми числами 107 и 109 отсутствовали, то после облучения соотношение масс изотопов 107 и 109 составляло 1:3 и 1:9. Природное соотношение изотопов 107 и 109 в серебре составляет $\sim 1:1$. Методом радиографии было показано, что изотоп с массой 109 может быть изотопом Pd с массой 109 [11].

Изменение изотопного состава палладия в зависимости от облучающих ионов представлено на рис. 2. Максимальное уменьшение изотопов 105 и 106 отмечается после облучения ионами водорода, что наблюдалось и другими авторами.

Увеличение количества серебра в облучаемом палладии в зависимости от плотности тока и типа бомбардирующих ионов отмечалось методом ИМС и составляло до 250 крат (см. табл. 2). Увеличение количества серебра наблюдалось и в следующем десяти микронном слое, а в некоторых условиях и в нижележащем не облучённом образце.

Таблица 1

Изменение изотопного соотношения для ряда элементов в материале палладиевого катода после экспериментов по облучению ионами в тлеющем разряде (данные ИМС) [6]*

Но- мер об- разца	Среда газа	Сила тока, мА	Зона анали- за**	Элемент					
				B 11/10***	C 13/12	Ni 61/60	Ni 62/60	Ca 44/40	Zr 90/91
1667	H ₂	35	1		1,7			2,5	
			2		1,12			0,83	
			3		3,3			0,58	
1666	D ₂	35	1		1	1,7	1,67	0,93	1,56
			2		1			1,93	1,7
			3		1			2,87	
1670	H ₂	25	1	1,27	1,12	1,34	1,71	1,36	
			2	1,8	1,25			1,59	
1668	H ₂ +D ₂	25	1		3,35			2,23	
			2		1,6			1,1	
			3		0,69			1,1	
1671	D ₂	25	1		2,2	2,9	3,6	1,7	
			2		1,46			0,7	

Примечания к табл. 1.

* Отношение нормированных значений изотопов (приведенных к 100 % содержанию); ** 1, 2, 3 – анализируемые слои толщиной 10 мкм: 1 – слой, расположенный на глубине 0–10 мкм от облученной поверхности; 2 – слой – на глубине 10–20 мкм; 3 – слой – на глубине 0–10 мкм от поверхности нижнего (второго) образца, расположенного на расстоянии 100 мкм от облученной поверхности.

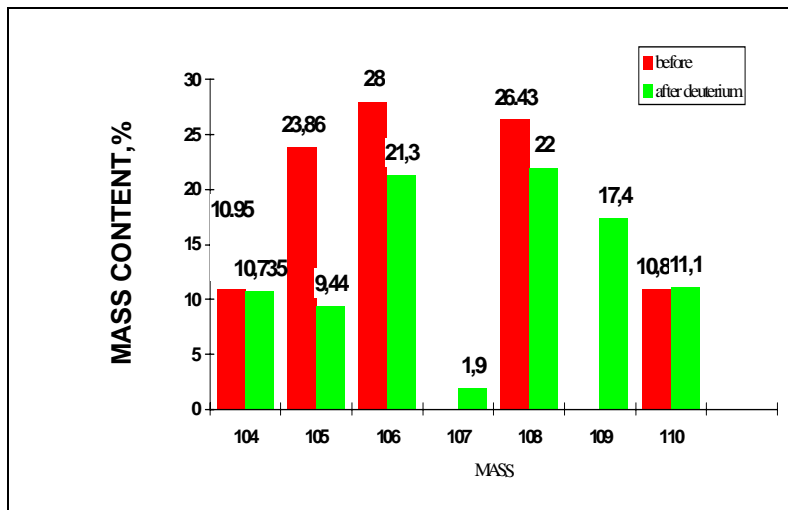


Рис. 1. Изотопный состав материала Pd-катода до и после облучения дейтронами [11]

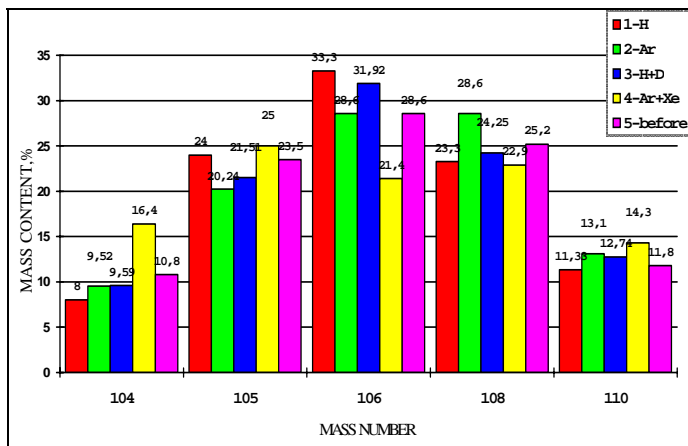


Рис. 2. Изотопный состав материала Pd-катода до и после облучения протонами, дейтронами, ионами аргона и смесью ионов аргона и ксенона приблизительно в одинаковых условиях облучения [11]

Данные табл. 3 иллюстрируют изменение изотопных соотношений для Fe, Cr, Ti в разряде, индуцируемом выпрямленным током. Для изотопов железа 56/57 изотопное соотношение изменяется до 4 раз за счёт увеличения количества изотопа 57, а для хрома – 2,5–3,8 раз в результате увеличения количества изотопов 46 и 47. По данным [15] увеличение изотопного соотношения наблюдается и при применении импульсного тока.

Результаты исследований с использованием различных методик существенно (в десятки и сотни раз) превышают возможные ошибки измерений. Следовательно, явление низкоэнергетического превращения химических элементов подтверждается данными методами и его более детальное исследование весьма актуально.

При исследовании вольфрама, облучённого ионами дейтерия, было обращено особое внимание на появление более лёгких изотопов, чем изотопы вольфрама, не обнаруживаемых в контрольном образце и никогда ранее не выявляемых в экспериментах с более лёгкими металлами, что подтверждает отсутствие аппаратной ошибки при анализах. Выявлено образование изотопов с массовыми номерами 169–181, более лёгких, чем изотопы вольфрама. При проведении серии последовательных анализов на одних и тех же образцах из фольги вольфрама после прекращения их облучения было обращено внимание на изменение во времени интенсивности образующихся лёгких изотопов. Этим фактам уделяется большее внимание в этой работе.

Таблица 2

Изменение количества серебра в палладиевом катоде тлеющего разряда (ИМС) [13]

Номер образца	Сила тока, мА	Среда газа	Место анализа *	Ag ⁺² (ppm)		Увеличение, раз
				Масса изотопа		
				107	109	
Исходный	–	–	1	1.7·10 ¹	2.2·10 ¹	–
1666	35	D ₂	1	5.0·10 ³	5.2·10 ³	~2.5·10 ²
			2	2.1·10 ³	2.2·10 ³	~1.0·10 ²
			3	< 1.5·10 ¹	< 5	–
1667**	35	H ₂	1	1.1·10 ²	7.7·10 ¹	~4
			2	< 2.0·10 ¹	< 2.0·10 ¹	–
			3	< 2.0·10 ¹	< 2.0·10 ¹	–
1668	25	H ₂ +D ₂	1	5.7·10 ²	5.6·10 ²	~2.5·10 ¹
			2	6.9·10 ²	7.4·10 ²	~3.5·10 ¹
			3	1.2·10 ²	1.3·10 ²	~5
1670	25	H ₂	1	9.7·10 ²	1.0·10 ³	~5.0·10 ¹
			2	4.5·10 ²	4.5·10 ²	~2.0·10 ¹
1671	25	D ₂	1	2.6·10 ³	2.7·10 ³	~1.2·10 ²
			2	1.8·10 ²	1.9·10 ²	~9

Примечания к табл. 2. *1, 2, 3 – номера анализируемых слоев глубиной по 10 мкм (1, 2 – верхний облученный образец; 3 – необлученный нижний образец).

**1668 – разряд в среде водорода, а затем – дейтерия.

Таблица 3

Изменение изотопных соотношений в Fe, Cr, Ti в разряде с выпрямленным током [15] (№ 1610)

Номер образца *	Элемент	Изотопы	Природное соотношение (N _n)	Соотношение после эксперимента (N exp)	K**
1	Fe	56/57	91.72/2.2 = 41.7	1.5·10 ⁴ /1.5·10 ³ = 10	4.17-увеличение Fe57
2				2.5·10 ³ /5.5·10 ¹ = 46.4	0.9
1	Cr	52/53	83.8/9.25 = 8.8	1.0·10 ⁴ /7.0·10 ² = 14.3	0.616
2				3400/3.0·10 ² = 11.3	0.78
1	Ti	48/47	73.8/7.3 = 10.12	1.2·10 ² /3.0·10 ¹ = 4	2.5-увеличение Ti 47
2				4.0·10 ² /5.5·10 ¹ = 7.3	1.4-увеличение Ti 47
1	Ti	48/46	73.8/8 = 9.82	1.2·10 ² /5.0·10 ¹ = 2.4	3.8-увеличение Ti 46
2				4.0·10 ² /6.5·10 ¹ = 6.15	1.5-увеличение Ti 46
1	Ti	48/49	73.8/13.42 = 13.42	1.2·10 ² /10 ¹ = 12	1.1
2				4.0·10 ² /4.5·10 ¹ = 8.9	1.5

Примечания к табл. 3. *1 – облучаемый верхний образец, 2 – нижний образец, расположенный под облучаемым образцом. **K = N_n/Nexp – отношение природного соотношения изотопов к соотношению их после экспериментов.

Методика экспериментов и оборудование

В состав установки входила вакуумная разрядная камера с катодом и анодом. Камеру вакуумировали до остаточного давления 10^{-2} Торр, затем заполняли рабочим газом до давления 3–10 Торр. В качестве рабочих газов использовали дейтерий, водород, аргон и ксенон. Плотность тока разряда составляла величину $10\text{--}50$ мА/см², напряжение разряда – 50–1200 В. Продолжительность горения разряда – от 1 до 40 часов, диаметр образцов ~20 мм, толщина ~100 мкм, площадь облучаемой зоны – около 1 см². Для получения данных по изменению элементного и изотопного состава по глубине использовали многослойные катоды, состоящие из нескольких слоев фольги толщиной приблизительно 100 мкм каждая. Методика исследований подробно описана в работе [13]. Система измерений позволяла регистрировать силу тока, напряжение разряда, давление газа, температуру образца, а также температуру воды, охлаждающей катод и анод, на ее входе и выходе.

Облучение ионами дейтерия проводили в разрядной камере, состоящей из двойной кварцевой трубы, ограниченной фланцами из нержавеющей стали (см. рис. 3).



Рис. 3. Газоразрядная камера с CdTe гамма-детектором [25]

Разрядная камера охлаждалась водой, проходящей между коаксиальными кварцевыми трубами, ограничивающими разрядное пространство. Фланцы и катододержатели из нержавеющей стали также охлаждались проточной водой [15]. Катод и анод, находящиеся в зоне разряда были изготовлены из молибдена. Вольфрамовая фольга толщиной ~100 мкм и диаметром ~20 мм располагалась на катоде, фиксируемая держателем, изготовленным из молибдена марки МЧВП, частично экранирующим вольфрамовую фольгу и плотно прижимающим ее к катододержателю.

Методы анализа

Анализ изотопного состава проводили с использованием масс-спектрометров «Finnegan» MAT-262 и «Triton» в области значений атомных масс 3–210. Основные оценки были сделаны для диапазоне значений атомных масс 166–206.

Температура области между анализируемой фольгой и ионизатором была равна ~ 1800 °С, при которой ионизация анализируемого материала не приводит к образованию комплексов, а образуются и регистрируются только однозарядные ионы.

Размеры образца изготавливаемого из W фольги для масс-спектрометрического анализа, были равны: ширина ~ 1 – 2 мм, длина ~ 20 мм и толщина ~ 100 микрон.

Данные, относящиеся к массам 185 и 187, соответствующие изотомам рения (Re) исключены из рассмотрения, так как Re используется в качестве катода в методе ТИМС. Спектры с минимальной интенсивностью не рассматривались в качестве значимых результатов ТИМС.

Были проведены две серии экспериментов по облучению ионами дейтерия вольфрамовой фольги. В первой серии экспериментов облучённая сторона анализировалась методом ТИМС в день окончания облучения через минимально возможное время, т. е. в течение первых ~ 2 – 4 часов, а также на следующий день и далее через каждые ~ 15 часов. Во второй серии экспериментов ТИМС анализ проводили спустя 3, 4 и 5 месяцев после проведения облучения ионами.

Анализировалась сторона, облучаемая дейтериевыми ионами. Анализируемая зона включала в себя и необлучённую экранированную часть фольги, что приводило к уменьшению вклада более лёгких изотопов при анализе. Перед каждым анализом проводилась калибровка масс-спектрометра по массе рения.

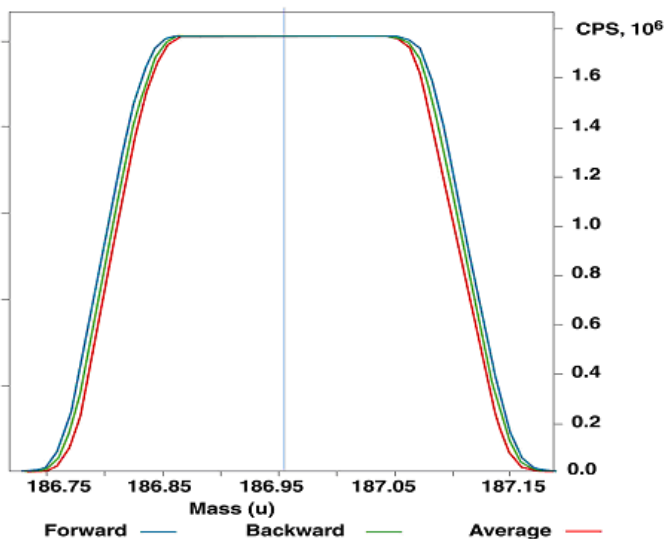


Рис. 4. Типичный калибровочный спектр по Re 187 перед анализом вольфрама [25]

На рис. 4 показан характерный калибровочный спектр, полученный по рению 187. Этот изотоп был выбран, как наиболее близкий по массе к изотопам вольфрама и часто применяемый в качестве ионизатора в анализаторе ТИМС. Спектры в ТИМС анализе хорошо воспроизводимы. Последовательная запись спектров с относительно короткими интервалами времени (например, каждые 3 минуты) показывала, что интенсивность пиков массы несколько изменяется, хотя местоположение пиков по шкале массы оставалось неизменной. Калибровка производилась перед каждым измерением, а в случае повторяющихся анализов – и в промежутках между измерениями. Пример точного определения массы изотопа приведён на спектре рис. 4, который иллюстрирует определение массы изотопа ^{187}Re с достаточно высокой точностью приближения к истинному значению. Полученное значение равно 186,95. При одновременном анализе пиков изотопов ^{185}Re и ^{187}Re наблюдалось некоторое смещение пика по массе 185, по которой калибровку не проводили, что не сказывается на определении массы изотопов.

В настоящей работе наибольшее внимание было уделено изменению изотопного состава вольфрама в интервале масс (168–200) в отношении примесных элементов, которых не было до облучения, при этом интенсивность счёта в контрольном вольфрамовом образце в этом интервале масс была равна от 5 до 20 cps (см. рис. 5).

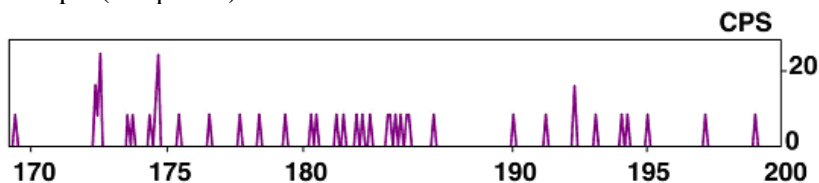


Рис. 5. Типичный масс-спектр в контрольном образце вольфрамовой фольги в диапазоне масс 170–200 [25]

Первая серия масс-спектров после эксперимента по облучению вольфрама в тлеющем разряде в среде дейтерия была получена при минимальном возможном временном интервале между окончанием облучения и началом записи первого спектра. Анализ проводился в день окончания эксперимента в течение ~2 часов, через каждые 15 минут. На следующий день через ~15 часов измерения были продолжены (см. табл. 3).

Результаты масс-спектрометрии вольфрама до и после облучения в дейтерии

Изменение изотопного состава после облучения ионами дейтерия метод ТИМС [15, 25]

Гамма-спектрометрию проводили с использованием детектора XR-100T-CdTe X-Ray & Gamma Ray с термоэлектрическим двухстадийным охлаждением и высокой эффективностью регистрации импульсов с энергиями от нескольких кэВ до сотен кэВ. Максимальная эффективность детектора наблюдалась в диапазоне 10–100 кэВ, при этом интенсивность регистрации достигала 100000 cps. Значительные различия в скорости счёта определялись условиями

эксперимента и особенно зависели от времени, прошедшего после окончания облучения.

Как можно видеть из табл. 4 значительное увеличение (до ~200 раз) количества изотопов с массами 168 и 170 наблюдалось через ~2 часа после прекращения облучения.

Таблица 4

Интенсивность счёта (в единицах cps) для более лёгких элементов в вольфрамовой фольге после отключения разряда в дейтерии (данные ТИМС анализа, серия 1) [25]

Масса изотопа	Время после окончания эксперимента*, мин.							Контрольный образец*
	84	101	137	1062	1073	1133	1150	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
168			40	30	60	2000	30	10 ± 10
170			40	55	50	1600	100	5 ± 5
171			60	95	100	100	70	5 ± 5
172			70	100	100	200	100	0
173			80	75	70	300	100	15 ± 15
174			30	55	60	200	100	5 ± 5
175			40	55	70	40	85	5 ± 5
176			40	55	40	95	75	5 ± 5
177			40	55	40	10	100	10 ± 10
180		70	10	45	100	20	30	25 ± 5
181		100	10	30	40	50		5 ± 5
189	70		20	30	10		50	5 ± 5
193	60		20	30	10		0	5 ± 5
194	70		40	65	0		10	10 ± 10

Примечания к таблице 4:

*Первый анализ был проведён через ~45 минут после окончания эксперимента. Затем каждый анализ проводился через каждые ~15 минут в течение ~2 часов. Далее через ~15 часов в течение нескольких часов через каждые 15 минут.

**Контрольный образец (столбец 9) – интенсивность счёта в контрольном образце.

Вторая серия анализов методом ТИМС была выполнена спустя 3, 4 и 5 месяцев на нескольких образцах вольфрама, а также тантала. В таблице 5 приведены результаты масс-спектрометрии, указывающие увеличение интенсивности пиков для более лёгких элементов в вольфрамовой фольге спустя 3, 4, 5

месяцев после проведения экспериментов по облучению ионами дейтерия. Данные рис. 5 и 7, а также табл. 5 указывают на то, что интенсивность пика для массы 178 увеличивается \sim в 2000 раз.

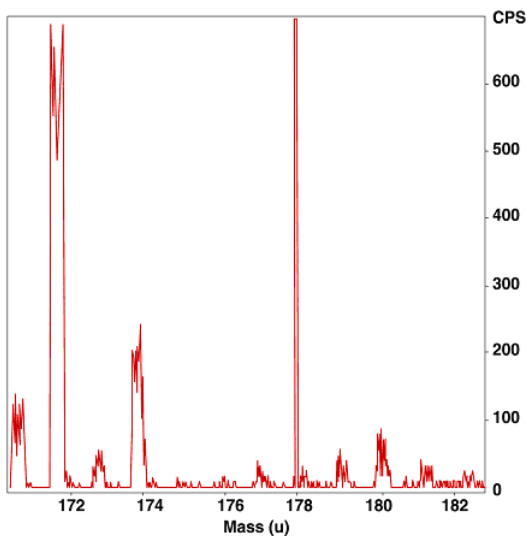


Рис. 6. Участок спектра масс вольфрама, облучённого ионами дейтерия, в диапазоне (171–183) с интенсивностью массы 172 ~ 700 cps [25]

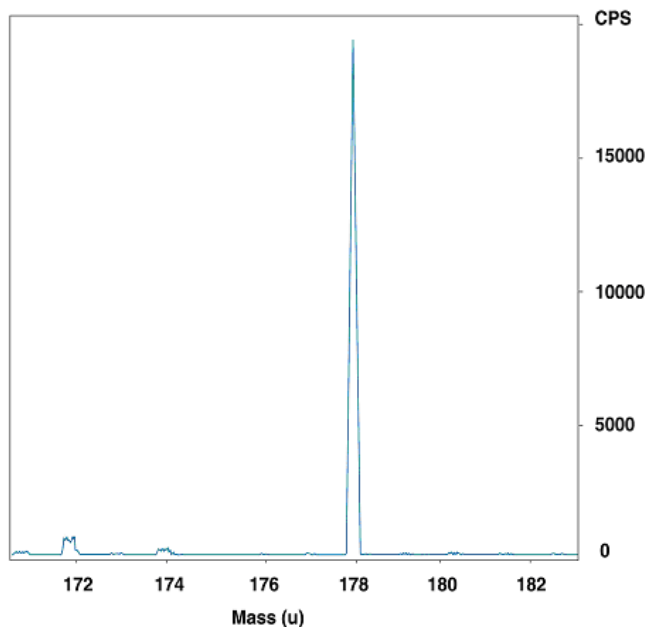


Рис. 7. Участок спектра масс в вольфрамовой фольге после облучения её ионами дейтерия с интенсивностью счёта массы 178, равной \sim 20000 cps [25]

Таблица 5

Интенсивность пиков (в единицах cps) для более лёгких элементов в вольфрамовой фольге после разряда в дейтерии (данные ТИМС анализа, серия 2) [25]

№ образца	1817				1820					1821	Контрольный
	Дата	16.3.7	16.3.7	19.3.7	20.3.07	21.4.7	21.4.7	23.4.7	14.5.7	14.05.07	
Масса	*	*	*	*	**	**	**	***	***	*	****
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
168		0			235	200	75		130		30±10
169		25			475	500	85		243		30±10
170		70			600	600			243		30±10
171	40	70	40	25	950	950	150	140	1670	45	35±10
172	80	80	55	65	5000	6000	700	15	40	55	20±10
173	400	400	300	200	200	200	50	40	488	300	25±10
174	45	50	25	46	1600	1615	230	8	0	30	15±10
175	125	170	75	70	15		15	35	300	80	20±5
177	8	8	8		30		40	130	35	0	8±1
178	15	8	0		50		19500	20	30	8	8±1
179	0	8	0		70		60	220	100	8	30±10
180	25	15	8				80	480	320	0	20±5
181			0				40	1000		120	30±5

Примечания к таблице 5:

* Столбцы 2 – 5, 11 – интенсивности счёта импульсов спустя 3 месяца после окончания экспериментов.

** Столбцы 6–8 – интенсивности счёта импульсов спустя 4 месяца после окончания экспериментов.

*** Столбцы 9–10 – интенсивности счёта импульсов спустя 5 месяца после окончания экспериментов.

**** Столбец 12 – средняя интенсивность счёта для 3–5 спектров контрольных образцов.

Из данных табл. 5 следует, что наблюдается увеличение количества более лёгких изотопов с массами меньшими, чем известные изотопы вольфрама. Если содержание стабильных изотопов в вольфраме составляет ^{180}W – 0,13 ат.%; ^{182}W – 26,3 ат.%; ^{183}W – 14,3 ат.%; ^{184}W – 30,67 ат.%; ^{186}W – 28,6 ат.%, то количество более лёгких изотопов до облучения не превышало фоновых значений. При анализе масс-спектра через 4 месяца после окончания эксперимента выяснилось, что интенсивность счёта изотопов с массовым номером 172 увеличилась в ~300 раз и достигла величины 6000 импульсов в секунду, а интенсивность счёта изотопа с массовым номером 178 увеличилась до 19500 cps, т. е. увеличилась в ~2000 раз.

Следует обратить внимание на то, что результаты повторных анализов методом ТИМС, полученные в один и тот же день, часто оказываются близ-

кими по величине интенсивности счёта. Так, например, значения интенсивности счёта для пиков масс 168–174 в спектрах, полученных через 4 месяца после облучения (см. табл. 5, колонки 6 и 7), близки между собой, а через следующие два дня существенно уменьшились. При этом интенсивность счёта для изотопа с массовым номером 178 в масс-спектре многократно возросла. Возможны два варианта объяснения данному наблюдению. По первому варианту, возможно, происходит превращение какого-либо изотопа в другой. Во втором варианте, возможно, происходит локальное образование определённого нового изотопа с уменьшением количества исходного в нем в результате, например, испарения в процессе проведения анализа.

Таким образом, после многократных экспериментов по облучению вольфрамового катода в тлеющем разряде в атмосфере дейтерия методами масс-спектрометрии обнаружено:

- появление «новых» изотопов более легких, чем изотопы W и Ta;
- изменение интенсивности пиков группы более лёгких изотопов с массовыми номерами 169–181, наблюдаемое через 2 часа после окончания облучения, а также через 3–5 месяцев после окончания экспериментов, что свидетельствует о продолжении изменения изотопного состава во времени;
- увеличение интенсивности некоторых более лёгких изотопов в 5–1000 раз (от 5–50 до 100–20000 cps) по сравнению с контрольным образцом.

Корреляция результатов гамма-спектрометрии и масс-спектрометрии.

Определение изотопов по совокупности величин энергии пиков и их интенсивности в гамма- и масс-спектрах

Гамма-спектрометрию проводили с помощью CdTe гамма-детектора как до эксперимента, так и в процессе горения газового разряда и после его прекращения. По её результатам сравнивались энергетические пики в гамма-спектрах с возможными пиками изотопов в масс-спектрах. Предполагаемые изотопы были выбраны по совокупности положения энергетических пиков для каждого изотопа и их интенсивностей, а также сопоставлением с масс-спектрометрическими данными. Полученные результаты приведены в табл. 6.

Как можно видеть из табл. 6, девять энергетических пиков соответствуют изотопу $^{172}\text{Hf}_{72}$, в том числе пик с энергией 23,4 кэВ и максимальной относительной интенсивностью 20,3 %.

Четыре пика соответствуют изотопу $^{169}\text{Yb}_{70}$, в том числе пик с энергией 63,12 кэВ и максимальной относительной интенсивностью 44,2%, $^{180\text{m}}\text{Hf}_{72}$ с типом распада – изомерный переход (IT) с энергией 57,5 кэВ, периодом полураспада $T_{1/2} = 5.47$ час, и максимальной относительной интенсивностью 48 %. Этот пик наблюдался для всех образцов.

Таблица 6

Значения энергий пиков для группы изотопов в образцах вольфрама и тантала после разряда в дейтерии* [26]

W	W	W	Ta	Изотоп	Eγ кэВ	Период полу- распа- да	Тип рас- па- да	I γ(%)	Мас- са
1817	1820	1818	1824						
кэВ									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	20,7	20,7	20,7±1	¹⁶⁹ Yb ₇₀	20,75	32d	ε	0,19	169
42±1	43	42	42,18	¹⁶⁹ Yb ₇₀	42,76	32d	ε	0,25	169
50±1	51,2	50,44	51	¹⁶⁹ Yb ₇₀	51,1	32d	ε	0,018	169
63±1	63	62,83	63,5±0,5	¹⁶⁹ Yb ₇₀	63,12	32d	ε	44,2	169
19±1	19,89	19,06	19.1	^{171m} Yb	19,39	5,25ms	IT	14,8	171
22,5±1	23,19	23,19	23.2	¹⁷² Hf ₇₂	23.4	1,87 y	ε		172
24±1	24	24,02	24,84	¹⁷² Hf ₇₂	23,93	1,87 y	ε	20,3	172
60±1	60,5	60,35	60,5±0,5	¹⁷² Hf ₇₂	60,65	1,87 y	ε	1,1	172
67±1	63	62,35	67.5	¹⁷² Hf ₇₂	67,3	1,87 y	ε	5,3	172
91±1	91±1	91,74	91	¹⁷² Hf ₇₂	91,3	1,87 y	ε	0,11	172
115±1	114	114,03	114,03	¹⁷² Hf ₇₂	114,06	1,87 y	ε	2,6	172
115±1		115	115.6	¹⁷² Hf ₇₂	116,1	1,87 y	ε	0,034	172
119±1	119	118,99	119,8	¹⁷² Hf ₇₂	119	1,87 y	ε		172
129,03	129	127,25	127.5	¹⁷² Hf ₇₂	127,9	1,87 y	ε	1,46	172
42±1	43	42	42,18	¹⁷⁸ Yb ₇₀	42,4	74m	β-	6,7	178
13±1	14,1	14,1	13,3	¹⁸⁰ Yb ₇₀	13,9	2,4m	β-		180
57±1	58,7	57,05	57,88	^{180m} Hf ₇₂	57.555	5.5h	IT	48.0	180m

Примечание к табл. 6: *окно CdTe детектора находилось на расстоянии ~1 мм от анализируемого образца [26].

В столбцах 1–4 табл. 7 представлены данные по энергиям пиков гамма-спектров, зарегистрированных для различных образцов вольфрама и тантала после различных экспериментов по облучению ионами дейтерия. В столбцах 6–9 представлены табличные значения. В колонке 10 приведены значения массы в масс-спектрах ТИМС анализа.

Как можно видеть из табл. 7, семь энергетических пиков в гамма-спектрах, полученных после окончания эксперимента в разряде дейтерия, соответствуют изотопу ¹⁷⁰Hf₇₂. В масс-спектрах (см. табл. 3 и 4) и гамма-спектрах (см. табл. 6 и 7) наблюдается также появление пиков изотопов с наибольшими периодами полураспада. Так, например, обнаруживаются изотопы – ¹⁷²Hf₇₂ с периодом полураспада 1,87 года, изотоп ¹⁷⁰Hf₇₂ с периодом 16 часов, и изотоп ¹⁷⁸Yb₇₀ с периодом 74 минуты.

Таблица 7

Энергии пиков для группы изотопов в образцах вольфрама и тантала после разряда в дейтерии [26]

W 1817 keV, кон- такт*	W 1820 keV, кон- такт	W 1818 keV, кон- такт	Ta 1824 keV, кон- такт	Изо- топ	Энергия изотопа в пике E _γ , keV	Пери- од полу- распа- да	Тип распа- да	Ин- тен- сив- ность γ(%)	Мас- са, TIMS
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
45±1	45,1	44,46	46,46	¹⁷⁰ Hf ₇₂	44,52	16,01 h	ε+β ⁺	0,32	170
55,4	54,57	55,4	55,43	¹⁷⁰ Hf ₇₂	55,2	16,01 h	ε+β ⁺	1,1	170
99,99	99	100,82	100,8	¹⁷⁰ Hf ₇₂	99,93	16,01h	ε+β ⁺	2	170
113,21	113,3	113,2	113,2	¹⁷⁰ Hf ₇₂	113,9	16,01h	ε+β ⁺	0.18	170
115,69	115,	115,7	115.6	¹⁷⁰ Hf ₇₂	115,5	16,01h	ε+β ⁺	0,2	170
133	132	132,2	132.7	¹⁷⁰ Hf ₇₂	132,2	16,01h	ε+β ⁺	0,044	170
138,81	138,5	138	138,8	¹⁷⁰ Hf ₇₂	139,2	16,01h	ε+β ⁺	0,018	170

Примечание к табл. 7.

* Слово «контакт» – означает то, что фольга вольфрама в процессе гамма-спектрометрии размещалась в контакте с Be окном детектора на расстоянии ~1 мм.

Обсуждение результатов

В описываемых экспериментах обнаружено изменение изотопного и элементного состава в различных материалах катода (Pd, Ti, W, Ta) под воздействием облучения ионами с низкой энергией в плазме тлеющего разряда с помощью различных методов анализа. Полученные результаты свидетельствуют о превращениях, происходящих с атомами химических элементов, из которых состоят материалы катодов. Изменения продолжаются и после облучения ионами, что было зафиксировано как для образцов палладия и титана (через 2–4 часа после прекращения облучения [12, 21]), так и для вольфрама [25]. Возрастание активности через 2–4 часа после прекращения облучения ионами дейтерия пакета из двух образцов фольги Ti и Pd устанавливали по увеличению степени почернения рентгеновских плёнок. Эти результаты проиллюстрированы на рис. 8.

На рис. 9 представлены данные указывающие на возрастание интенсивности пиков масс изотопов в диапазоне 168–176, полученные для вольфрамовой фольги.

К сожалению, проследить цепочки изотопных переходов в рамках имеющихся методов анализа не представляется возможным. Тем не менее, можно утверждать, что многократное получение воспроизводимых результатов в экспериментах указывает на протекание разнообразных ядерных процессов, инициируемых в условиях облучения ионами в низкотемпературной

плазме, такие как: изменение скорости распада радиоактивных ядер, трансмутация ядер, синтез более легких и более тяжелых ядер.

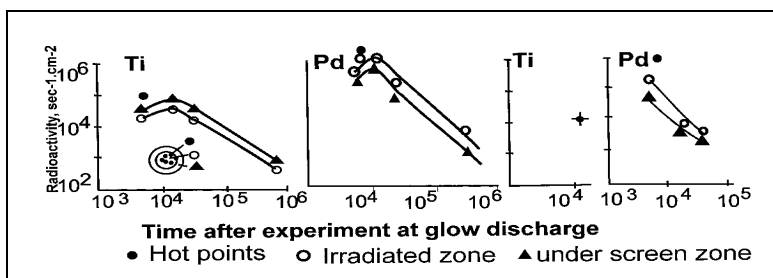


Рис. 8. Зависимость почернения рентгеновских плёнок от времени в секундах после эксперимента в контакте с фольгами, облучёнными «в пакете» Ti+Pd+Ti+Pd в одном эксперименте: черные круги – локальные почернения, светлые круги – облучённая зона, чёрные треугольники - экранированная в процессе облучения зона [21]



Рис. 9. Интенсивность счёта в масс-спектрах для более лёгких изотопов, чем известные изотопы вольфрама после прекращения облучения ионами дейтерия

В связи с представленными данными следует указать, что все стабильные изотопы вольфрама, периоды полураспада $T_{1/2}$ которых на много порядков превышают время существования Вселенной, фактически являются потенциально нестабильными. Эти значения вместе с величинами относительной распространенности в природе составляют: $^{180}_{74}\text{W}$ (0.12 %; $7.4 \cdot 10^{16}$ лет), $^{182}_{74}\text{W}$ (26.5 %; $8.3 \cdot 10^{18}$ лет), $^{183}_{74}\text{W}$ (14.31 %; $1.9 \cdot 10^{18}$ лет), $^{184}_{74}\text{W}$ (30.64 %;

$1.9 \cdot 10^{18}$ лет), и ${}_{74}^{186}\text{W}$ (28.43 %; $7.4 \cdot 10^{18}$ лет). Потенциально возможным для данных изотопов путь естественного α -радиоактивного распада можно представить, как ${}_{74}^A\text{W} \rightarrow {}_{72}^{A-4}\text{Hf} + {}_2^4\text{He} + Q_A$, где величины тепловыделений Q_A для радиоактивных α -распадов ядер вольфрама с массовыми числами A , равными 180, 182, 183, 184 и 186, составляют 2.52, 1.77, 1.68, 1.66 и 1.12 МэВ, соответственно. Поэтому выше приводимые экспериментальные данные фактически демонстрируют возможность инициирования α -распада в условиях дейтеросодержащей низкотемпературной плазмы. К настоящему времени уже накоплено достаточно большое количество экспериментальных данных, демонстрирующих возможности стороннего инициирования радиоактивных распадов.

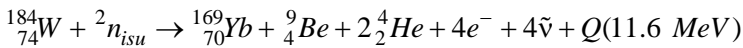
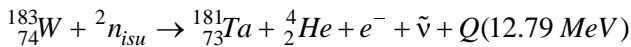
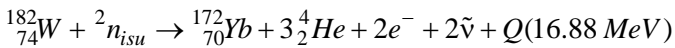
Кроме наших данных об инициировании распада изотопов урана [16–19] в условиях тлеющего разряда с урановым катодом, следует обратить внимание на инициирование распада изотопов урана при электровзрыве титановой фольги в растворе уранил сульфата UO_2SO_4 [32], а также в условиях лазерной абляции разных металлов в растворе уранил хлорида UO_2Cl_2 [33, 34]. Следует указать и на возможность инициирования β -распада Cs-137 при лазерной абляции золотой мишени в цезий содержащем водном растворе, когда за 2 часа лазерного воздействия концентрация Cs-137 уменьшилась на 70 % [35].

В настоящее время существует много гипотез и теоретических обоснований получаемых экспериментальных данных по инициированию в условиях низкотемпературной плазмы различных ядерных превращений, в том числе, радиоактивных распадов. Привлекает внимание гипотеза С. Ф. Тимашева [36, 37, 38], объясняющая комплекс экспериментальных данных с позиций ядерно-химических превращений в низкотемпературной плазме и при лазерной абляции металлов в водных средах. Ниже, в соответствии с представлениями автора предлагаемой гипотезы [36, 37, 38], предложено объяснение возможности инициирования распадов потенциально стабильных изотопов вольфрама при облучении вольфрамового катода в тлеющем разряде в атмосфере дейтерия с наличием в низкотемпературной плазме высокоэнергетичных (по химическим масштабам) электронов с кинетической энергией $E_e \sim 5$ эВ. Согласно представлениям С. Ф. Тимашева базовым процессом для инициирования ядерно-химических превращений в условиях дейтеросодержащей низкотемпературной плазмы является процесс неупругого (с рождением нейтрино ν) взаимодействия электрона с высокой (по химическим масштабам) кинетической энергии E_e (~ 5 эВ) с ядром дейтерия – дейтроном d^+ и образование ядра ${}^2n_{isu}$, которое определяется как β -динейтрон. Это ядро имеет нулевой электрический заряд, формально равное двум барионное число, нулевой лептонный заряд, а масса покоя его практически равна массе дейтерия. Принципиальное отличие такого ядра от гипотетического динейтрона, состоит в том, что ядерная материя в объеме такого ядра находится в «несбалансированном» состоянии «внутренней встряски» («in-shake-up» или isu состояние), и ее нельзя представлять в виде совокупности двух взаимодействующих нейтронов. При этом, как показал анализ разнообразных ядерно-химических превращений, инициируемых в условиях лазерной абляции металлов в водных средах

разного состава, период полураспада ${}^2n_{isu}$ может быть достаточно большим, по крайней мере, превышающим десятки минут. В частности, на этой основе удалось реализовать синтез трития при абляции ряда металлов в тяжелой воде [35]. В состоянии «внутренней встряски» в низкотемпературной плазме могут образовываться и тяжелые ядра после неупругого рассеяния на них высокоэнергетичных электронов с рождением нейтрино. Происходящее при этом нарушение внутренней организации ядерной материи, когда представление об ее состоянии как системы взаимодействующих нуклонов частично теряет смысл, выступает как фактор, определяющий неустойчивость ядра.

Можно полагать, что оба фактора: возникающая неустойчивость ядра как целостной системы и формирование его метастабильного *isu*-состояния, должны определять повышение реакционной активности такого ядра при взаимодействии с другими ядрами, а также повышение склонности к радиоактивному распаду, если такой распад возможен. Именно на этой основе оказалось возможным понять совокупность представленных выше экспериментальных данных по инициированному распаду стабильных изотопов вольфрама, а также ядер тантала, которые оказываются тоже потенциально нестабильными.

Ниже приведены примеры возможных инициированных распадов изотопов вольфрама в условиях тлеющего разряда в дейтеросодержащей среде:



Следует добавить, что вводимые понятия об *isu*-состоянии ядер должны быть достаточно долгоживущими в силу того, что релаксационная динамика таких ядер определяется слабым ядерным взаимодействием. В связи с последним замечанием следует указать на повышенную эффективность ядерно-химических процессов в низкотемпературной плазме, содержащей протий или дейтерий, в которой ядра в *isu*-состоянии, образующиеся при взаимодействии высокоэнергетичных электронов с протонами или дейтронами, оказываются нейтральными. При этом пока остаются открытыми вопросы о получении количественных оценок для вероятности образования « β -ядер». Как бы там ни было, анализ всей совокупности данных, приведенных в [10–31], а также результатов эксперимента по синтезу трития в условиях лазерной абляции [36], позволяет использовать в качестве объяснения гипотезу об инициировании ядерных превращений в низкотемпературной плазме за счет взаимодействия электронов с ядрами и определять эти процессы как ядерно-химические.

Выводы

1. Исследования с использованием методов гамма-спектрометрии и масс-спектрометрии, проведенные в процессе и после облучения тяжёлых

металлов (W и Ta) ионами в тлеющем разряде подтвердили образование в них более лёгких изотопов, чем известные изотопы W и Ta.

2. Группа более лёгких изотопов с массами от 168 до 181 с высокой интенсивностью пиков в спектрах ТИМС анализа была обнаружена в образце вольфрама после его облучения дейтронами. Более лёгкие изотопы наиболее интенсивно образовывались через ~2 часа, а изменения, проявляющиеся в возрастании интенсивности их пиков наблюдались в течение 3–5 месяцев после прекращения облучения. Увеличение интенсивности пиков масс некоторых изотопов достигало величин от 5–50 cps до 100–20000 cps, т. е. в 5–1000 раз. После прекращения экспериментов по облучению наблюдалось рентгеновское и гамма-излучение.

3. Сопоставление данных ТИМС анализа и гамма-спектрометрии позволяет сделать предположение о том, что наблюдается появление изотопов: $^{169}\text{Yb}_{70}$; $^{171\text{m}}\text{Yb}_{70}$; $^{172}\text{Hf}_{72}$; $^{178}\text{Yb}_{70}$; $^{180}\text{Yb}_{70}$; $^{180\text{m}}\text{Hf}_{72}$; $^{170}\text{Hf}_{72}$. Корреляция между данными ТИМС анализа и гамма-спектрометрии указывает на то, что тяжелые изотопы превращаются в более легкие под влиянием низкоэнергетического воздействия.

4. При использовании вольфрама, облучаемого ионами в установках ИТЭР, необходимо обращать внимание на возможность появления ядер «новых» элементов, отличных от вольфрама.

Список литературы

1. Бабад-Захряпин А. А., Савватимова И. Б., Борисов Е. В., Сенчуков А. Д. Массоперенос в монокристаллах молибдена и карбида кремния при обработке их ионами тлеющего разряда. Атомная энергия. Т. 48, вып. 2, 1980, с. 98–100.
2. Савватимова И. Б., Бабад-Захряпин А. А., Зубарев П. В., Тачкова Н. Г. Ползучесть монокристаллического молибдена при обработке ионами малых энергий. «Физика и химия обработки материалов. № 6, 1981.
3. Бабад-Захряпин А. А., Савватимова И. Б., Захаров А. П., Черников В. Н. Структура молибдена, облученного низкоэнергетическими ионами водорода и гелия при испытаниях на ползучесть. Атомная энергия. Т. 58, вып. 1, 1985.
4. Бабад-Захряпин А. А., Зубарев П. В., Савватимова И. Б., Тачкова Н. Г. Высокотемпературная ползучесть монокристаллического молибдена после ионно-термической обработки. Металлофизика. Т. 7, № 6, 1985, с. 107–109.
5. Бабад-Захряпин А. А., Савватимова И. Б. Повреждаемость металлических фольг в тлеющем разряде. Физика и химия обработки материалов. № 3, 1982, с. 17–20.
6. Черников В. Н., Савватимова И. Б., Бабад-Захряпин А. А. Структуры молибдена, облученного низкоэнергетическими ионами водорода и гелия в условиях ползучести. Атомная энергия. 1985, № 58, вып. 1, с. 24–27.
7. Бабад-Захряпин А. А., Савватимова И. Б., Суворов А. Л., Зайцев С. А., Бобков В. А., Мемелова Л. Я., Кукавадзе Е. Г. Повреждаемость вольфрама в гелиевой плазме тлеющего разряда. Атомная энергия. Т. 52, вып. 4, 1982, с. 253–258.
8. Воронцова Г. А., Залужный А. Г., Карасев В. С., Ковыршин В. Г., Савватимова И. Б., Чередниченко-Алчевский М. В. Накопление гелия в конструкционных материалах, облучаемых низкоэнергетическими ионами. Атомная энергия. Т. 69, вып. 5, 1990, с. 297–300.

9. Савватимова И. Б. Экспрессный метод оценки повреждаемости и скорости ползучести в условиях реакторного облучения методом облучения в плазме тлеющего разряда. Сборник ТРИНИТИ «Физическое моделирование изменения свойств реакторных материалов в номинальных и аварийных условиях». Апрель, 1999.
10. Savvatimova I. Kucherov Ya and Karabut A. Cathode Material Change after Deuterium Glow Discharge // «Transaction of Fusion Technology» (December 1994), v. 26, 4T (1994), pp. 389–394.
11. Savvatimova I. B., Senchukov A. D., Chernov I. P. Transmutation Phenomena in the Palladium Cathode after Ions Irradiation at the Glow Discharge. ICCF6. Proceedings. Progress in new hydrogen energy. Japan, 1996, p. 575–579.
12. Савватимова И. Б., Карабут А. Б. Радиоактивность палладиевых катодов после облучения в тлеющем разряде. Поверхность. 1996, № 1, с. 76–81.
13. Савватимова И. Б., Карабут А. Б. Продукты ядерных реакций, регистрируемые на катоде после экспериментов в тлеющем разряде в дейтерии. Поверхность. № 1, 1996, с. 63–75.
14. Savvatimova I. B. Transmutation in cathode materials exposed at glow discharge by low energy ions. Nuclear phenomena or ion irradiation result? Proceedings of ICCF7, Canada, 1998, p. 342–350.
15. Savvatimova I. B. Transmutation of Elements in Low-energy Glow Discharge and the Associated Processes J. Condensed Matter Nuclear Science. 8 (2011) 1–19.
16. Dash J., Savvatimova I., Frantz S., Weis E. and Kozima H. Effects of Glow Discharge with Hydrogen Isotope Plasmas on Radioactivity // Proc. ICENES 2002, p. 122–127 (2002).
17. Dash J., Savvatimova I. Effects of Glow Discharge with Hydrogen Isotope Plasmas on Radioactivity of Uranium Proc. ICCF10, Beijing, China, 2002.
18. Dash J., Savvatimova I. Effects of Glow Discharge with Hydrogen Isotope Plasmas on Radioactivity of Uranium, Proc. of American Nuclear Society Conference, San Diego, June, 2003.
19. Савватимова И. Б., Дэш Джон, Франц Стефан. Изменение радиоактивности урана после облучения в водородной плазме тлеющего разряда. Материалы 10-ой Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов. Москва, 2004, с. 64–75.
20. Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B. Possible Nuclear Reactions Mechanisms at Glow Discharge in Deuterium. Proceeding of the ICCF3, Nagoya, Japan, 1992, Tokyo, Japan, p. 165–168.
21. Savvatimova I. B., Karabut A. B. Radioactivity of the cathode samples after Glow Discharge Cold Fusion. Proceedings of the 5th International Conference on Cold Fusion 9-13 April, 1995- Monte-Carlo, Monaco, ICCF5, 1995, p. 209–212.
22. Savvatimova I. and Gavritenkov D. Results of analysis of Ti foil after glow discharge, Proceedings of the ICCF11/ World Scientific Pub. France, (2004), p. 438–458.
23. Savvatimova I. and Gavritenkov D. Influence of the glow discharge parameters on the structure and isotope composition of cathode materials, Proceedings of the ICCF12 (2005), World Scientific Pub. Japan, p. 231–252.
24. Savvatimova I. Creation of more light elements in tungsten irradiated by low-energy deuterium ions. ICCF13, Russia, (2008), p. 505–517.

25. Savvatimova I., Savvatimov G., Kornilova A. Decay in tungsten irradiated by low energy deuterium ions. ICCF13, Russia, (2008), p. 295–308.
26. Savvatimova I., Senchukov A., Chernov I. Transmutation Phenomena in the Palladium Cathode after Ions Irradiation at Glow Discharge. Proc., ICCF6, Japan, 1996, 575–579.
27. Savvatimova I. B., Karabut A. B. Nuclear Reaction Products Registration on the Cathode after Deuterium Glow Discharge. Surface, V. 1, Moscow: RAN, 1996, p. 63–75.
28. Savvatimova I. Transmutation in cathode materials exposed at glow discharge by low energy ions. Nuclear phenomena or ion irradiation result? Proc. ICCF-7, Canada, Vancouver, 1998, 342–350.
29. Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B. Nuclear product ratio for glow discharge in deuterium // Physics Letters A, 170, 265–272 (1992).
30. Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B. The Investigation Of Deuterium Nuclei Fusion At Glow Discharge Cathode «Fusion Technology» Vol. 20. 1991, p. 924–928.
31. Savvatimova I. B. Reproducibility of experimental in glow discharge and process accompanying deuterium ions bombardment. ICCF8, Italian Phys. Soc, Italy, 2000, p. 277.
32. Волкович А. Г., Говорун А. П., Гуляев А. А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН. 2002. № 8. С. 45–50
33. Barmina E. V., Sukhov I. A., Lepekhin N. M. et al. Application of copper vapor lasers in control of activity of Uranium isotopes // Quantum Electronics. 2013. V. 43. P. 591–596
34. Shafeev G. A. Laser-Induced nuclear decays in uranium isotopes. In: Uranium: Characteristics, Occurrence and Human Exposure / Eds. A. Ya. Vasiliev and M. Sidorov. Nova Sci. Publishers. 2012. Chapter 4. P. 117–153.
35. Barmina E. V., Simakin A. V., Shafeev G. A. // Quantum Electronics, 2014. V. 44. P. 791
36. Тимашев С. Ф., Симакин А. В., Шафеев Г. А. Ядерно-химические процессы в условиях лазерной абляции металлов в водных средах (проблемы «холодного синтеза») // Журнал физ. химии. 2014. Т. 88. № 11. С. 1805–1815.
37. Barmina E. V., Kuzmin P. G., Timashev S. F., Shafeev G. A. Laser-induced synthesis and decay of Tritium under exposure of solid targets in heavy water / <http://arxiv.org/abs/1306.0830> [physics.gen-ph].
38. Савватимова И. Б., Тимашев С. Ф. Ядерно-химические процессы инициируемого распада ядер вольфрама и тантала при воздействии дейтеросодержащей низкотемпературной плазмы на катоды из этих материалов // J. Condensed Matter Nuclear Science, in press.