https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-220-225
УДК 621.039.6; 539.12.04; 669.017.164

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ И УДЕРЖАНИЯ D^+ В БЕРИЛЛИДЕ ТИТАНА $Be_{12}Ti$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.С. Диков[1], Е.А. Максимкина[1*], Т.В. Кульсартов[1,2]

[1]Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
[2]Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: yelizaveta.kostoussova@gmail.com*

В рамках разработки экспериментального метода оценки накопления и удержания ионов водорода для решения материаловедческих задач термоядерного синтеза выполнено облучение высокоэнергетичными ионами D^+ образцов бериллида титана ($Be_{12}Ti$) казахстанского производства. Выбор материала обусловлен существующими концепциями термоядерных установок, в которых предполагается использование $Be_{12}Ti$ в составе материалов первой стенки, например, JA DEMO. Исследуемые образцы были подвергнуты облучению ионами D^+ с энергией 14 МэВ в двух режимах, отличающихся временем облучения, плотностью потока и суммарным флюенсом. С целью исследования механизмов накопления и выделения газов в материале образцы облученного $Be_{12}Ti$ исследовались методом термодесорбционной спектроскопии. $Be_{12}Ti$, подвергнутый длительному воздействию потока ионов D^+ при относительно меньшей плотности частиц, продемонстрировал значительно большее накопление ионов D^+. В то же время, образец, облученный кратковременно, но потоком высокой плотности накопил значительно меньшее количество газа. Результаты показывают, что методика облучения ионами D^+ в высокоэнергетическом диапазоне может быть использована в качестве экспериментального подхода для оценки накопления и удержания водорода в материалах термоядерных установок.

Ключевые слова: *бериллид титана, D^+, термодесорбционная спектроскопия, режимы облучения, десорбция*

Введение

Термоядерная энергетика – это возможность для человечества сохранить текущий уровень энергопотребления при исчерпании углеводородного топлива и запасов U235. Одной из наиболее важных проблем работы современных термоядерных реакторов является взаимодействие плазмы с материалом бланкета. В условиях работы ТЯР предполагается, что бланкет подвергается воздействию ионов водорода и гелия, нейтронной и тепловой нагрузке, поэтому материал-кандидат должен отвечать ряду требований: обладать высокой атомной плотностью, характеризоваться высокой температурой плавления (выше 1000 °C), устойчивостью к окислению, а также иметь высокий показатель умножения нейтронов. С этой точки зрения, бериллий отвечает всем вышеописанным требованиям [1], в том числе как материал-умножитель нейтронов, который также может вырабатывать тритий.

Благоприятные свойства бериллия значительно усиливаются в соединениях. Наиболее перспективные бериллид ванадия $Be_{22}V$ и бериллид титана $Be_{12}Ti$ – имеют меньшую склонность к радиационному распуханию и окислению в присутствии воды, а также более высокую температуру плавления, в отличие от чистого металлического бериллия. При этом, хотя $Be_{22}V$ демонстрирует большую атомную плотность, его эффективность размножения трития ниже, чем у $Be_{12}Ti$ в среднем, на 30-40% [1], что существенно ограничивает потенциал выработки трития бланкетом. Таким образом, $Be_{12}Ti$ может частично преодолеть ограничения чистого бериллия и бериллида ванадия, однако его поведение в условиях радиационного воздействия, накопления дефектов и взаимодействия с изотопами водорода требует дополнительной экспериментальной проверки.

Поведение бериллида титана при радиационном воздействии особенно важно оценивать с учетом условий эксплуатации бланкета термоядерного реактора. В ходе реакции D-T образуется альфа-частица и нейтрон с энергией около 14 МэВ. При оказываемом нейтронном облучении материал бланкета испытывает радиационные деформации, которые распределяются по всей толщине материала. Эти деформации приводят к распуханию материала, охрупчиванию и эрозии, загрязняющей плазму. Исследования воздействия нейтронного облучения материала бланкета критически важно для эффективной и безопасной эксплуатации ТЯР, однако облучение быстрыми нейтронами, имитирующими выход нейтронов из плазмы, является трудно осуществимым процессом. Самостоятельного источника нейтронов, способного смоделировать такое воздействие, пока не существует, а облучение в ядерных реакторах с быстрыми нейтронами, требует длительного воздействия для набора необходимого флюенса [2]. При недоступности моделирования нейтронного облучения для решения задач

практического моделирования радиационных дефектов в материалах-кандидатах для составляющих ТЯР может использоваться ионное облучение [3]. Многие исследования [2, 4, 5] демонстрируют возможность использования ионного облучения, в частности, легкими ионами [4, 5], такими, как кремний, водород и его изотопы. Например, в экспериментах, направленных на оценку пригодности вольфрама как материала дивертора ITER [4], применяется облучение изотопами водорода и гелием с «высокими» (1кэВ) и «низкими» (0,3 кэВ) энергиями.

Облучение образцов ионами D^+ 14 МэВ в данной работе рассматривается как доступный экспериментальный подход к моделированию радиационного воздействия, оказываемого на материал в ходе эксплуатации в ТЯР [6]. Поскольку облучение быстрыми нейтронами является трудно осуществимым процессом, использование легких ионов с большой энергией представляет собой наиболее обоснованную альтернативу, что подтверждает мировой опыт. Следует учитывать, что характер воздействия нейтронов и легких ионов отличается и не может считаться прямым эквивалентом, однако полученные данные о радиационных дефектах, удержании и выходе газов из материала, а также о структурных и механических изменениях могут быть полезны при оценке пригодности материала для использования в конструкциях термоядерных установок.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента на Ульбинском металлургическом заводе методом порошковой металлургии (вакуумное горячее прессование) [7] были получены два образца $Be_{12}Ti$ в форме квадратных пластин размером 5*5 мм и толщиной около 2мм, плотностью 2,26 г/см^3. Состав сплава – Be 92,3 at. %, Ti 7,69 at. %. Металлы имеют естественный изотопный состав: 9Be – at. 100%, моноизотоп 46Ti – 7,95 at. %, 47Ti – 7,95 at. %, 46Ti – 7,3 at. %, 48Ti – 73,8 at. %, 49Ti – 5,5 at. %, 50Ti – 5,4 at. %. Предварительная подготовка образцов включала последовательную ручную шлифовку наждачной бумагой с размером зерен от P600 до P2500. Продолжительность каждого этапа составляла 5-20 минут. После шлифовки образцы отполированы на сукне с использованием пасты ГОИ на основе оксида хрома, затем проведена окончательная полировка алмазной пастой с размером частиц 1 мкм и суспензией 0,3 мкм. Микроструктура поверхности образцов, как показано на рисунке 1, в целом однородна, в то же время сохраняются отдельные продольные следы механической обработки, характерные для абразивного шлифования. Кроме того, наблюдаются единичные включения.

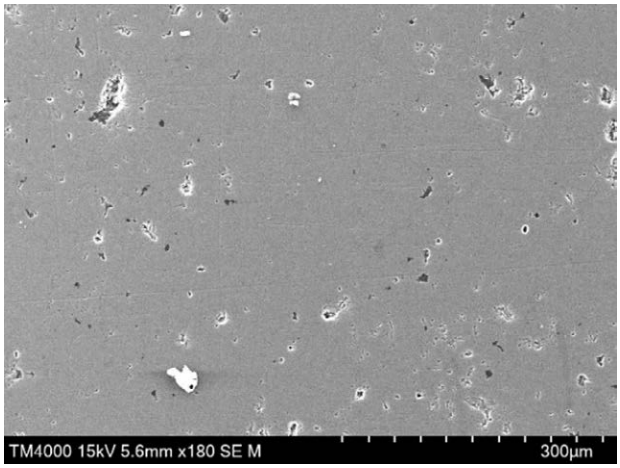


Рисунок 1. Исходная морфология образцов

Облучение подготовленных образцов производилось в циклотроне У-150М однородными пучками ионов D^+ с энергией 14 МэВ. Образцы были закреплены в мишени с помощью керамической маски, которая необходима для учета только тех частиц дейтерия, которые попали в образец. Маска представляет собой пластину с круглым отверстием диаметром 4,8 мм – непосредственный размер области облучения. Заряд пучка регистрировался цифровым интегратором тока (ORTEC Model 439, погрешность измерений прибора – около 5%). Образцы прислонены к алюминиевой подложке мишени, что обеспечивает необходимый отвод тепла. На рисунке 2 представлены фотографии образца, заключенного в мишень с теплоотводом, и мишени непосредственно в ускорителе во время фокусировки пучка.

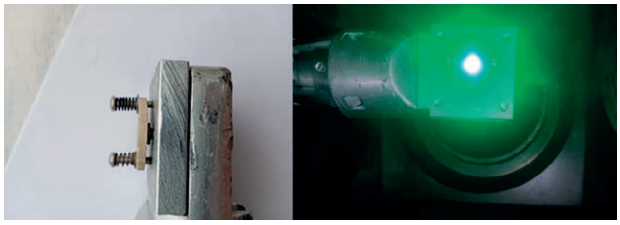


Рисунок 2. Внешний вид мишени с образцом внутри и в ускорителе

Параметры режимов облучения образцов представлены в таблице 1. Облучение проводилось в двух различных режимах для каждого из образцов: при стационарной плотности потока ионов $1{,}06\cdot10^{14}$ ион/(см^2·с) в течение 11 часов для БТ-2 и в комбинированном режиме для БТ-1, включавшем облучение при $7{,}8\cdot10^{14}$ ион/(см^2·с) в течение 22 мин с последующим снижением плотности потока до 0,7·1014 ион/(см^2·с) на 60 мин. Расчетная температура поверхности составляла около 470 К для БТ-2 и достигала 1000 К для БТ-1.Плотность потока ионов для каждого образца рассчитывалась из количества электрического заряда, переносимого пучком за единицу времени, с учетом

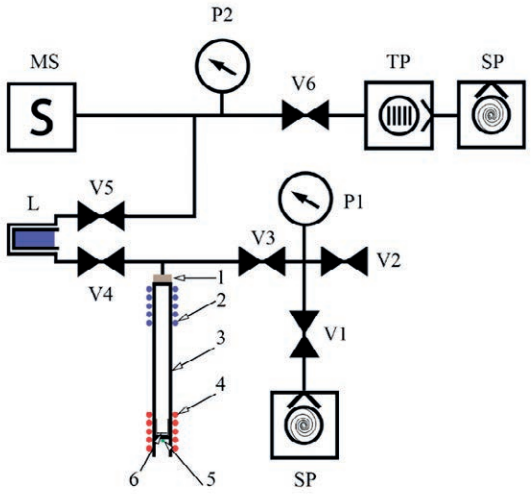
площади облучаемой поверхности. Флюенс, в свою очередь, определяется как произведение плотности потока ионов на продолжительность облучения. Как указано выше, плотность ионных пучков однородна по всей площади облучения, однако, значения различаются ввиду различия мощности потоков. Температурные условия облучения были смоделированы с применением программного комплекса Comsol Multiphysics с модулями Heat Transfer in Solids. Расчет выполнен методом конечных элементов (Finite Element Analysis). Данные о теплофизических параметрах материала взяты с портала THERPRO [8]. Результаты теплофизического моделирования также представлены в таблице 1. Теплопотери в облучательной камере не учитывались в расчетах, стенки камеры приняты за идеально изолированные. Температурная погрешность не превышает 5%.

Таблица 1. Параметры облучения образцов

	БТ-1		БТ-2
Время облучения	1 этап	2 этап	11 часов
	22 минут	60 минут	
Мощность потока	20 мкА	2 мкА	2,7 мкА
	280 Вт	28 Вт	37,8 Вт
Температура	1000K	420K	460K
Плотность потока	$7{,}84\cdot10^{14}$ i/(см$^2\cdot$с)	$0{,}786\cdot10^{14}$ i/(см$^2\cdot$с)	$1{,}06\cdot10^{14}$ i/(см$^2\cdot$с)
Флюенс	$1{,}02\cdot10^{18}$ i/см^2	$0{,}283\cdot10^{18}$ i/см^2	$4{,}2\cdot10^{18}$ i/см^2

После облучения образцы были исследованы методом термодесорбционной спектроскопии. Метод ТДС основан на контролируемом нагреве образца в вакуумной камере. В ходе этого процесса происходит высвобождение газов, удерживаемых в ловушках, образованных в материале: в вакансиях, пузырьках, и других дефектах. Выделяемые газы регистрируются масспектрометром в течение всего цикла нагрева, удержания температуры и охлаждения. Полученные температурные зависимости позволяют оценить характер накопления и десорбции газов из исследуемого материала. Схема установки ТДС представлена на рисунке 3.

Установка откалибрована по всем измеряемым газам. Коэффициенты калибровки приблизительно пропорциональны коэффициентам ионизации измеряемых молекул газа в пределах 10% погрешности. Перед проведением исследования на образцах БТ-1 и БТ-2 был проведен технический отжиг экспериментальной установки. Отжиг проводился в условиях откачки спиральным насосом при нагреве до температуры 900 °C со скоростью нагрева 10 °C/мин. Далее был выполнен стандартный бланковый эксперимент с пустым тиглем, чтобы определить фоновое газовыделение в установке и исключить его вклад из последующего анализа. Далее образцы поочередно помещались в загрузочный тигель. По достижению остаточного давления в 10^{-6} Торр начинался программируемый нагрев со скоростью 10 °C/мин до достижения температуры 900 °C. Выдержка при этой температуре составила 5 минут. Затем образцы охлаждались в естественном режиме со скоростью 20 °C/мин.



MS – квадрупольный масс-спектрометр,
TP – турбомолекулярный насос, SP – спиральный (форвакуумный) насос, L – азотная ловушка,
P1 – вакуумный датчик давления экспериментального устройства, P2 – вакуумный датчик давления в камере масс-спектрометра, V – вакуумные клапаны,
1 – загрузочный фланец экспериментального устройства, 2 – система охлаждения, 3 – экспериментальное устройство (ЭУ), 4 – нагревательный элемент,
5 – термопара, 6 – тигель с образцом [9].

Рисунок 3. Схема установки ТДС

Результаты

Анализ газовыделения проводился при скорости нагрева 10 °C/мин с регистрацией парциальных давлений по атомным массам. В библиотеке данных о расшифровке спектров для m=4 – могут быть только 2 газа: гелий и дейтерий. Бланковый эксперимент не выявил сигналов с массами, соответствующими D_2 и He, что позволяет связать их дальнейшее появление с высвобождением дейтерия из облученного $Be_{12}Ti$.

На рисунке 4 представлены спектры газовыделения D_2. Десорбция D_2 из образца БТ-1, который был подвергнут кратковременному, но крайне интенсивному облучению высокоэнергичными ионами D^+, слабо анализируется. Сигнал D_2 находятся на уровне порядка 10^{-7} Па и плавно повышается по достижении температуры около 600 К. При этом, десорбционные максимумы не прослеживаются. Газовыделение более выражено для образца БТ-2, который подвергался длительному облучению при относительно низкой плотности пучка, но при этом набравшего значитель-

но больший флюенс, чем БТ-1. На ТДС-спектре образца БТ-2 видно гораздо более объемное газовыделение после достижения температуры около 630-650 К. При этой температуре фиксируется резкий рост парциального давления с последующим широким максимумом в области около 750-850 К. Сигнал D_2 имеет четко выраженные «ступени» на 630-700 К и 720-800 К. Такой характер выхода дейтерия может указывать на наличие нескольких типов газовых ловушек. На удержание дейтерия могли также влиять исходная пористость и неоднородность поверхности образцов. Исследуемый материал был получен методом вакуумного горячего прессования порошков, а на исходной поверхности образцов наблюдались поры и несплошности. Открытые поры и развитая внутренняя поверхность могут облегчать проникновение дейтерия к внутренним поверхностям, его поверхностную рекомбинацию и последующий выход в виде D_2 и HD. Поэтому наличие взаимосвязанной открытой пористости может уменьшать остаточное содержание дейтерия после облучения. В то же время, закрытые поры, межчастичные границы и несплошности, не имеющие прямого сообщения с внешней поверхностью, могут действовать как области локального накопления молекулярного дейтерия. Заполнение таких областей способно приводить к повышению внутреннего давления, зарождению трещин и последующему скачкообразному выходу газа при ТДС-нагреве.

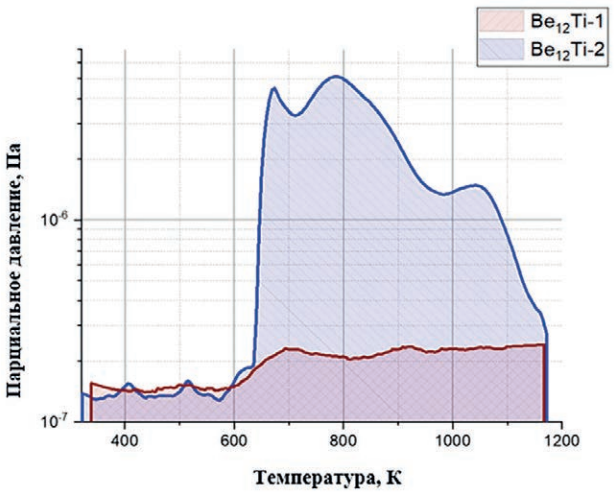


Рисунок 4. Спектры газовыделения по сигналу D_2 из образцов БТ-1 и БТ-2

Отношение интегрального выделения дейтерия, оцененное по площади под ТДС-кривыми парциального давления, для образцов БТ-2 и БТ-1 составляет ~12,4.

Для обоих образцов до температуры около 570…600 К сигнал D_2 низкий, приближен к бланковому. Далее, при достижении температуры около 650 К давление для БТ-1 повышается незначительно, и не изменяется до конца измерений, давление БТ-2 резко возрастает почти на порядок, и изменяется скачкообразно, как уже отмечено выше. Максимальная интенсивность десорбции дейтерия из БТ-2 наблюдается в интервале 650-800К, и постепенно снижается с дальнейшим повышением температуры. Это может быть связано с истощением накопленного объема дейтерия в образце. Разница в характере и объемах газовыделения напрямую связана с условиями облучения образцов: на первой стадии облучения БТ-1 плотность потока возрастала до $7{,}8 \cdot 10^{14}$ ион/(см^2·с), что приблизительно в 7,4 раза превышало значение для БТ-2 и вызывало разогрев поверхности до 1000 К. Увеличение скорости генерации дефектов при этом сопровождалось их термическим отжигом, повышением диффузионной подвижности дейтерия, его освобождением из ловушек и десорбцией непосредственно во время облучения. После снижения плотности потока температура уменьшалась приблизительно до 420 К, однако продолжительности второй стадии (60 минут) и ее флюенса было недостаточно для накопления количества дейтерия, сопоставимого с БТ-2. Таким образом, в исследованных условиях влияние вызванного высокой плотностью потока температурного разогрева преобладало над возможным увеличением удержания вследствие более интенсивного образования радиационных дефектов. Повышение плотности потока и, как следствие, температуры способствует более быстрому достижению концентрации дейтерия, необходимой для насыщения ловушек и развития кластерного механизма его удержания [10, 11].

Обсуждение

ТДС-анализ подтверждает, что удержание дейтерия в $Be_{12}Ti$ имеет дефектно-контролируемый характер. Оно определяется не только энергией падающих ионов, но и флюенсом, плотностью потока, временем облучения и температурным режимом [12, 13]. В образце БТ-1 температура во время облучения достигала около 1000 К, то есть находилась в диапазоне, достаточном для активации диффузии и выхода дейтерия из части ловушек еще на стадии облучения. Поэтому последующий ТДС-сигнал оказался слабым. Напротив, БТ-2 облучался при существенно более низкой температуре, не превышавшей ~480 К, что ограничивало подвижность дейтерия и способствовало его накоплению в радиационно-индуцированных дефектах. При облучении ионами D^+ с энергией 14 МэВ формировался глубоко распределенный профиль радиационно-индуцированной дефектной структуры.

Длительное облучение БТ-2, несмотря на меньшую плотность потока, способствовало накоплению дейтерия в объемных ловушках, связанных с вакансиями, их скоплениями, дислокационными структурами и дефектными комплексами. Резкий пик в диапазоне 630…650 К для БТ-2 можно рассматривать как открытие менее стабильных дефектных комплексов или

начало интенсивного высвобождения дейтерия из области накопления, тогда как широкий максимум при более высоких температурах может соответствовать высвобождению дейтерия из более энергетически стабильных ловушек. Для БТ-1 слабая десорбция может быть связана с тем, что при более интенсивном и термически нагруженном режиме часть дейтерия могла высвободиться еще во время облучения, и некоторые из первичных дефектов могли ослабеть. Такая интерпретация согласуется с общими представлениями о влиянии радиационных дефектов на удержание изотопов водорода и зависящем от температуры характере их высвобождения при проведении TDS-анализа [9, 14]. Следует отметить, что ТДС-измерения проводились при одной скорости нагрева 10 °C/мин. Поэтому в настоящей работе не определялись эффективные энергии активации десорбции и не проводилось однозначное отнесение отдельных максимумов к конкретным типам дефектов.

Заключение

Установлено, что длительное облучение при меньшей плотности потока и суммарно большем флюенсе приводит к значительно более выраженному накоплению дейтерия в $Be_{12}Ti$. Интегральное газовыделение из БТ-2 в 12,4 раза больше, чем в БТ-1. Многокомпонентный характер ТДС-спектров указывает на последовательную термическую активацию центров удержания дейтерия. Наличие высокотемпературных компонентов спектра может свидетельствовать о том, что при облучении высокоэнергетическими ионами (14 МэВ) формируются не только простые дефекты типа вакансий, но и глубокие ловушки: дислокационные структуры, вакансионные кластеры и объемно распределенные зоны повреждения.

Предлагаемая методика может быть использована как инструмент экспериментальной оценки способности материалов-кандидатов ТЯР накапливать и удерживать изотопы водорода в условиях высокоэнергичного облучения. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего применения данного подхода для исследования бериллидов и других перспективных материалов термоядерных установок.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR24993119).

Литература / References:

1. Hernandez-Gonzalez F. A., Pereslavtsev P. First principles review on the options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors //Fusion Engineering and Design. – 2018. – Т. 137. – С. 243-256.
2. Was G. S. et al. Emulation of reactor irradiation damage using ion beams //Scripta Materialia. – 2014. – Т. 88. – С. 33-36.
3. Roldán M. et al. Ion beam experiments to emulate nuclear fusion environment on structural materials at CMAM // Ion Beam Techniques and Applications. – IntechOpen, 2019.
4. Lee H. T. et al. Ion-driven permeation of deuterium through tungsten under simultaneous helium and deuterium irradiation //Journal of nuclear materials. – 2011. – Т. 415. – №. 1. – С. S696-S700.
5. Ogorodnikova O. V. et al. The influence of radiation damage on the plasma-induced deuterium retention in self-implanted tungsten //Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Т. 415. – №. 1. – С. S661-S666.
6. Ericsson G. Advanced neutron spectroscopy in fusion research //Journal of Fusion Energy. – 2019. – Т. 38. – №. 3. – С. 330-355.
7. Gaisin R. et al. Beryllium intermetallics: Industrial experience on development and manufacture //Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Т. 35. – С. 101444.
8. Thermo-Physical Materials Properties Database of LWRs and HWRs [Электронный ресурс] / International Atomic Energy Agency. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://nucleus.iaea.org/sites/therpro/SitePages/Basic-Search.aspx?web=1 (дата обращения: 21.02.2026).
9. Shaimerdenov A. et al. Kinetics of gas release from titanium beryllide irradiated to different neutron fluences //Fusion Engineering and Design. – 2025. – Т. 216. – С. 115069.
10. Poon M. et al. Flux dependence of deuterium retention in single crystal tungsten //Journal of nuclear materials. – 2002. – Т. 307. – С. 723-728.
11. Buzi L. et al. (2017). Surface modifications and deuterium retention in polycrystalline and single crystal tungsten as a function of particle flux and temperature. Journal of Nuclear Materials, 495, 211–219.
12. Fukumoto M. et al. Deuterium trapping in tungsten damaged by high-energy hydrogen ion irradiation //Journal of nuclear materials. – 2009. – Т. 390. – С. 572-575.
13. Wampler W. R., Doerner R. P. Deuterium retention in tungsten from exposure to plasma //Physica Scripta. – 2009. – Т. 2009. – №. T138. – С. 014037.
14. Sugimoto Y. et al. Deuterium retention properties and bubble behaviors of Be12Ti after irradiation with D+ at high temperature //Fusion Engineering and Design. – 2025. – Т. 218. – С. 115220.

ТИТАН БЕРИЛЛИДІ $Be_{12}Ti$-ДЕ ЖОҒАРЫ ЭНЕРГИЯЛЫ ИОНДЫҚ СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ӘРТҮРЛІ РЕЖИМДЕРІ КЕЗІНДЕ ДЕЙТЕРИЙДІҢ ЖИНАҚТАЛУЫ МЕН ҰСТАЛЫП ҚАЛУЫН ЭКСПЕРИМЕНТТІК БАҒАЛАУ

А. С. Диков[1], Е. А. Максимкина[1]*, Т. В. Кульсартов[1,2]

[1] Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: yelizaveta.kostoussova@gmail.com*

Термоядролық синтез материалтануының міндеттерін шешуге арналған сутегі иондарының жинақталуы мен ұсталып қалуын бағалаудың эксперименттік әдісін әзірлеу шеңберінде Қазақстанда өндірілген титан бериллиді ($Be_{12}Ti$) үлгілерін жоғары энергиялы дейтерий иондарымен сәулелендіру жүргізілді. Материалды таңдау $Be_{12}Ti$-ді JA DEMO сияқты термоядролық қондырғылардың бірінші қабырғасы материалдарының құрамында қолдану қарастырылатын қазіргі тұжырымдамалармен негізделеді. Зерттелетін үлгілер 14 МэВ энергиялы дейтерий иондарымен сәулелендірілді. Сәулелендіру екі режимде жүргізілді, олар сәулелендіру уақытымен, ағын тығыздығымен және жиынтық флюенспен ерекшеленді. Материалда газдардың жинақталу және бөліну механизмдерін зерттеу мақсатында сәулелендірілген $Be_{12}Ti$ үлгілері термиялық десорбциялық спектроскопия әдісімен зерттелді. Дейтерий ағынының салыстырмалы түрде төмен бөлшек тығыздығы жағдайында ұзақ уақыт әсеріне ұшыраған $Be_{12}Ti$ үлгісі D^+ иондарының едәуір көбірек жинақталуын көрсетті. Сонымен қатар, қысқа уақыт ішінде, бірақ жоғары тығыздықты ағынмен сәулелендірілген үлгіде газдың айтарлықтай аз мөлшері жинақталды. Алынған нәтижелер жоғары энергиялы диапазонда дейтерий иондарымен сәулелендіру әдістемесін термоядролық қондырғылар материалдарында сутегінің жинақталуы мен ұсталып қалуын бағалауға арналған эксперименттік тәсіл ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: *титан бериллиді, дейтерий, термиялық десорбциялық спектроскопия, сәулелендіру режимдері.*

EXPERIMENTAL EVALUATION OF DEUTERIUM ACCUMULATION AND RETENTION IN TITANIUM BERYLLIDE $Be_{12}Ti$ UNDER DIFFERENT MODES OF HIGH-ENERGY ION IRRADIATION

A.S. Dikov[1], Y.A. Maximkina[1] *, T.V. Kulsartov[1, 2]

[1]Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

E-mail for contacts: yelizaveta.kostoussova@gmail.com

As part of the development of an experimental method for evaluating the accumulation and retention of hydrogen ions to address materials science problems related to thermonuclear fusion, titanium beryllide ($Be_{12}Ti$) samples produced in Kazakhstan were irradiated with high-energy deuterium ions. The choice of material is justified by existing concepts of fusion facilities, in which $Be_{12}Ti$ is proposed for use as a first-wall material, for example, in JA DEMO. The investigated samples were irradiated with 14 MeV deuterium ions under two irradiation modes differing in irradiation time, particle flux density, and total fluence. To study the mechanisms of gas accumulation and release in the material, the irradiated $Be_{12}Ti$ samples were examined by thermal desorption spectroscopy. The $Be_{12}Ti$ sample exposed to a deuterium flux for a longer time at a relatively lower particle flux density demonstrated significantly higher accumulation of D^+ ions. At the same time, the sample irradiated for a shorter time but with a high-density flux resulted in significantly lower gas accumulation. The results show that the high-energy deuterium ion irradiation technique can be used as an experimental approach for evaluating hydrogen accumulation and retention in materials for fusion facilities.

Keywords: *titanium beryllide, deuterium, thermal desorption spectroscopy, irradiation modes.*