

МРНТИ 29.19.21
Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-156-3-70-82>

Исследование влияния облучения тяжелыми ионами криптона на структурно-фазовое состояние и механические свойства высокоэнтропийных диборидов

Ә.Д. Сапар^{*1,2} , И.А. Иванов¹ , А.С. Сейтбаев¹ ,
Б.С. Аманжулов¹ , Ә.М. Темір¹ 

¹ Институт ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

² Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

E-mail: *sapar_ad_1@enu.kz, i.ivanov@inp.kz, a.seitbek@inp.kz, b.amanzhulov@inp.kz, a.temir@inp.kz

Аннотация. Поскольку для ядерной и аэрокосмической техники требуется создание радиационно-стойких материалов, актуальным является исследование радиационной стойкости высокоэнтропийных боридов (ВЭБ). Они сочетают преимущества диборидов одного металла, такие как высокая температура плавления, твердость и химическая инертность, но обладают более высокой радиационной стойкостью. В данной работе проведен краткий обзор особенностей ВЭБ и методов их синтеза. Исследовано влияние облучения тяжелыми ионами криптона на структурно-фазовое состояние и механические свойства ВЭБ (TiHfZrNbTa)₂B₂, синтезированного методом искрового плазменного спекания. Расчёты методом SRIM показали, что при флюенсе $\sim 10^{15}$ см⁻² уровень повреждений достигает ~ 2.3 смещений на атом (dpa) при глубине до 12 мкм.

С помощью РЭМ-ЭДС проанализирована морфология поверхности ВЭБ и бинарных диборидов NbB₂ и TiB₂ показано, что облучение не приводит к значительным изменениям морфологии поверхности, но в TiB₂ образуются трещины.

С использованием методов рентгеновской дифракции показано, что параметры решетки всех боридов увеличиваются, где наибольшее изменение по параметру решетки *a* обнаружены у ВЭБ (0,54%), а по параметру *c* у NbB₂ (0,61%). Подобная анизотропная деформация решетки, вероятно, свидетельствует о накоплении радиационно-индуцированных дефектов вдоль одной из осей решетки.

Исследование микротвердости методом Виккерса показало, что облучение ионами криптона приводит к радиационному упрочнению высокоэнтропийного диборида (TiHfZrNbTa)₂B₂, тогда как для TiB₂ наблюдается снижение микротвер-

Поступила 21.05.2026. После доработки 1.06.2026. Принята к печати 11.06.2026. Доступно онлайн 30.09.2026.

*автор для корреспонденции

дости. В случае NbB_2 существенных изменений механических свойств в пределах погрешности измерений не выявлено.

Полученные результаты свидетельствуют о сохранении структурно-фазового состояния и механических свойств ВЭБ в исследованных условиях облучения.

Ключевые слова: высокоэнтропийный борид (ВЭБ), DC-60, метод искрового плазменного спекания (SPS), радиационная стойкость, радиационное упрочнение, керамики.

Введение

Развитие ядерной энергетики нового поколения, включая реакторы деления IV поколения (Gen-IV) и перспективные термоядерные установки, требует создания конструкционных материалов, способных сохранять структурную целостность в экстремальных условиях эксплуатации. К таким условиям относятся высокие рабочие температуры (около 1000 °C в нормальном режиме и до 1500 °C в аварийных ситуациях), а также интенсивные радиационные поля с уровнем повреждений до 50–200 смещений на атом (dpa) [1-3]. В этих условиях традиционные металлические сплавы и стали демонстрируют ограниченную стойкость вследствие радиационного охрупчивания и набухания, что обуславливает необходимость поиска альтернативных материалов. В качестве перспективных кандидатов рассматриваются ультравысокотемпературные керамики (УНТС), в частности дибориды тугоплавких металлов.

Бориды переходных металлов (TiB_2 , ZrB_2 , HfB_2 и др.) обладают уникальным сочетанием свойств, включая высокие температуры плавления (>3000 °C), высокую твердость, хорошую теплопроводность и химическую инертность [4, 5]. Благодаря высокому сечению захвата тепловых нейтронов изотопом ^{10}B данные материалы широко применяются в качестве нейтронопоглощающих элементов, включая регулирующие стержни и защитные экраны [6]. Однако их эксплуатационные возможности ограничены хрупкостью и склонностью к растрескиванию, вызванному накоплением радиационных дефектов и образованием газовых продуктов (гелий) в результате ядерных реакций [7, 8].

Перспективным направлением повышения радиационной стойкости и механической стабильности керамических материалов является применение концепции высокоэнтропийных систем, основанной на формировании многокомпонентных твердых растворов из пяти и более металлов в близких к эквимолярным соотношениям в сочетании с углеродом/бором/азотом/кислородом [3, 9]. Высокоэнтропийные дибориды (ВЭБ), впервые синтезированные в 2016 году, кристаллизуются в гексагональной структуре типа AlB_2 (рисунок 1), представляющей собой чередование жестких двумерных борных слоев и металлической подрешетки [10]. Высокая конфигурационная энтропия способствует снижению свободной энергии Гиббса и обеспечивает термодинамическую стабильность фаз при высоких температурах и давлениях.

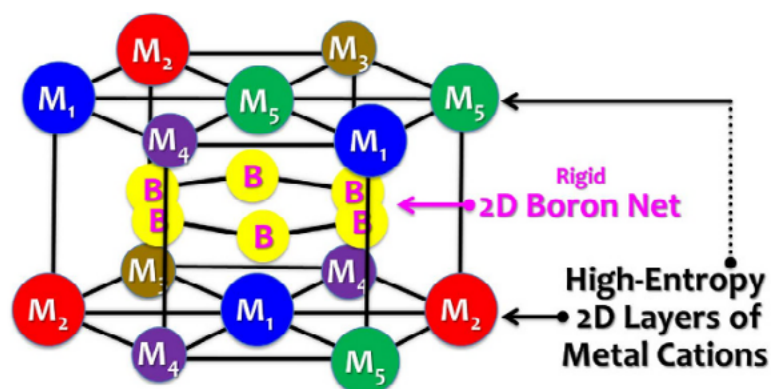


Рисунок 1. Кристаллическая структура высокоэнтропийного диборида типа AlB_2 (P6/mmm) [10]

Особый интерес представляет их потенциально высокая радиационная стойкость. Значительное искажение кристаллической решётки и эффект замедленной диффузии («sluggish diffusion») формируют сложный энергетический ландшафт, затрудняющий миграцию радиационных дефектов и подавляющий их агрегацию в крупные кластеры, поры и гелиевые пузырьки [1, 11]. В отличие от традиционных керамик, для ВЭБ также характерно подавление аморфизации и радиационно-индуцированной сегрегации элементов на границах зерен.

Степень изученности высокоэнтропийных диборидов (ВЭБ) на сегодняшний день можно охарактеризовать как стадию активного формирования научной базы: достигнуты значительные успехи в области синтеза и описания базовых свойств, однако сохраняются существенные пробелы в понимании фундаментальных механизмов и поведения этих материалов в экстремальных условиях. Интенсивное изучение ВЭБ началось сравнительно недавно – после 2016 года, однако за последние годы наблюдается стремительный рост числа публикаций, что свидетельствует о высоком научном и прикладном интересе к данным материалам. Как следует из рисунка 2, наблюдается интенсивный рост публикационной активности, отражающий возрастающий интерес к ВЭБ как перспективным материалам для экстремальных условий эксплуатации [10].

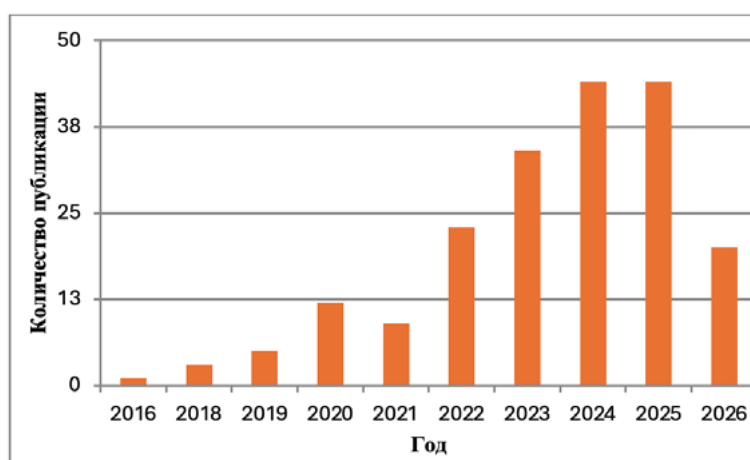


Рисунок 2. Динамика публикационной активности по высокоэнтропийным диборидам за 2016–2026 гг. (по данным Scopus)

Наиболее хорошо изучены методы синтеза и консолидации, включая высокоэнергетический шаровой помол, искровое плазменное спекание и боркарботермическое восстановление, позволяющие получать плотные однофазные материалы (92–98% от теоретической плотности) [12]. Экспериментально подтверждено формирование гексагональной структуры типа AlB_2 (P6/mmm) с равномерным распределением элементов и отсутствием сегрегации [10]. Среди эксплуатационных свойств наиболее подробно исследована окислительная стойкость: ВЭБ демонстрируют повышенную устойчивость по сравнению с большинством бинарных боридов и сохраняют структурную целостность при температурах до 1200–1500 °C [13]. Также накоплен значительный объём данных по базовым механическим характеристикам, включая твердость и модуль упругости [9]. Для состава $(Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2}Ti_{0.2}Zr_{0.2})B_2$ измеренные значения твердости – $21,82 \pm 1.0$ ГПа и модуля Юнга – 488.57 ± 1.7 ГПа, что превышает значения для двойных боридов [9]. Механические характеристики ВЭБ сопоставимы с такими диборидами как HfB_2 , где модуль Юнга составляет около 540 ГПа, а твердость составляет 29 ГПа [14] и NbB_2 , где модуль Юнга достигает около 637 ГПа, а твердость составляет 20.9 ГПа.

В последние годы активно развиваются исследования радиационной устойчивости ВЭБ. Показано, что химическое разупорядочение и искажение решётки подавляют рост дефектов и могут приводить к эффекту частичного восстановления механических свойств при высоких дозах облучения. Исследование, проведенное группой под руководством Ameuа Khanolkar и др. [9], показало, что поведение ВЭБ при облучении тяжелыми

ионами Au с энергией 10 МэВ существенно отличается от традиционных керамик и характеризуется тремя стадиями: начальным упрочнением при малых дозах (рост твердости ~10% за счёт образования точечных дефектов), последующим насыщением или деградацией свойств в более простых (четвертичных) системах и, что наиболее важно, эффектом «самозалечивания» в составе $(\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2})\text{B}_2$, проявляющимся в восстановлении твердости и модуля упругости при высоких флюенсах.

Данный эффект связывается с подавлением формирования протяжённых дефектных структур, закреплением дислокаций точечными дефектами и замедленной диффузией, обусловленной химическим беспорядком и искажением кристаллической решётки. В совокупности это препятствует деградации структуры и способствует стабилизации механических свойств [9].

Таким образом, показано, что многокомпонентность состава является эффективным механизмом повышения радиационной стойкости, обеспечивая уникальную способность ВЭБ к частичному восстановлению свойств в условиях интенсивного облучения.

Параллельно изучается поведение ВЭБ при экстремальных давлениях и температурах, где продемонстрирована их высокая фазовая стабильность и низкая сжимаемость [15]. Существенную роль играет и теоретическое моделирование (SQS Special Quasirandom Structures – специальные квазислучайные структуры, *ab initio*), позволяющее прогнозировать свойства, однако такие модели пока ограничены в учёте дефектной структуры [16]. Комплексное исследование ВЭБ $(\text{Hf},\text{Mo},\text{Nb},\text{Ta},\text{Ti})\text{B}_2$ и $(\text{Hf},\text{Mo},\text{Nb},\text{Ta},\text{Zr})\text{B}_2$ показало, что гексагональная структура типа AlB_2 сохраняет стабильность при давлениях до 9,5 ГПа и температурах до 2273 К [15]. Для состава $(\text{Hf},\text{Mo},\text{Nb},\text{Ta},\text{Ti})\text{B}_2$ экспериментально определён объёмный модуль упругости $K_0 = 276$ ГПа, что согласуется с расчётами по модели SQS (Special Quasirandom Structures – специальные квазислучайные структуры) (288 ГПа). Предел текучести при сжатии достигает ~28 ГПа при давлении 65 ГПа, а дифференциальное напряжение составляет около 8% от модуля сдвига, что указывает на высокую прочность материала [15]. Полученные результаты демонстрируют, что ВЭБ обладают высокой фазовой стабильностью и низкой сжимаемостью в экстремальных условиях, что делает их перспективными материалами для применения в ядерной и аэрокосмической технике.

Установлено, что ВЭБ демонстрируют существенно более высокую устойчивость к окислению по сравнению с большинством бинарных диборидов. В исследовании Giovanna T. и др. [17] с применением термогравиметрического анализа было установлено, что начало интенсивного окисления для TiB_2 наблюдается уже при ~450 °C, для TaB_2 – выше 600 °C, тогда как для HfB_2 и высокоэнтропийного состава – лишь при 1200–1300 °C [17]. При изотермических испытаниях (1200 °C, 4–6 ч) ВЭБ характеризуются низкой и стабильной скоростью окисления, сопоставимой с HfB_2 . Предложенный авторами ряд устойчивости имеет вид: $\text{TiB}_2 < \text{TaB}_2 < \text{HfB}_2 \approx (\text{Hf},\text{Mo},\text{Zr},\text{Nb},\text{Ti})\text{B}_2$ [17].

Повышенная жаростойкость ВЭБ объясняется эффектами многокомпонентности – химической разупорядоченностью, замедленной диффузией и формированием устойчивых защитных оксидных слоёв. Это подтверждает перспективность высокоэнтропийных диборидов для эксплуатации в воздушной среде при температурах свыше 1200 °C [17].

Несмотря на достигнутый прогресс, остаются нерешённые задачи, связанные с установлением взаимосвязей «состав–структура–свойства», а также с изучением теплофизических, электрических и высокотемпературных механических характеристик (ползучесть, трещиностойкость, усталость). Особенно ограниченными остаются данные о влиянии радиационных повреждений на механические свойства ВЭБ [9]. В частности, практически не исследовано воздействие тяжелых ионов с энергиями, характерными для осколков деления (например, криптона), на многокомпонентные боридные системы, что определяет актуальность настоящей работы.

Материалы и методы

Вопрос об устойчивости к радиационным повреждениям ВЭБ остается актуальным. Предполагается, что ВЭБ имеет высокую радиационную стойкость и высокие механические характеристики, сравнимые или превосходящие дибориды одного металла.

Образцы ВЭБ (TiHfZrNbTa) B_2 и бинарные дибориды NbB_2 и TiB_2 были получены методами твердофазного синтеза и искрового плазменного спекания в Томском политехническом университете [18]. Образцы представляли собой объемные керамические таблетки с диаметров 12,5 мм и высотой 1,8-2,7 мм для различных образцов. Данные бориды были выбраны из-за их жаростойкости, устойчивости к коррозии, а бинарные дибориды были выбраны для сравнения с ВЭБ и изучения влияния высокой энтропии и более сложного состава на радиационную стойкость.

Проведен первичный анализ образцов ВЭБ и бинарных диборидов NbB_2 и TiB_2 , где были исследованы их свойства до облучения. А также проведены расчеты с помощью программы SRIM для оценки радиационных повреждений и распределения их по глубине [19].

Для изучения морфологии и дефектов поверхности боридов проводилось исследование поверхности методом растровой электронной микроскопии на микроскопе Hitachi TM3030. Элементный состав и однородность исследуемых образцов изучались с помощью методов энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на данном микроскопе.

Анализ кристаллической структуры и фазового состава выполнялся методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance Eco при съёмке в геометрии Брегга-Брентано в диапазоне углов 2θ . Для анализа структуры образцов использовалась программа Profex [20], а для анализа фазового состава использовалась программа QualX с базой данных COD [21]. Параметры кристаллической решётки определялись по положениям дифракционных максимумов основной фазы типа AlB_2 . При интерпретации результатов учитывалось возможное влияние остаточных напряжений, микродеформаций кристаллической решётки и примесных фаз на положение и ширину дифракционных линий.

Для анализа исходной микротвердости и упрочнения проведены измерения с помощью цифрового микротвердомера (Duroline Metkon M-1) в АФ ИЯФ. Определение твердости проводилось с использованием алмазного индентера в виде пирамидки Виккерса с нагрузкой 50 Н (HV 5) для каждого образца с не менее 5 измерений. Данная нагрузка была выбрана в соответствии глубины проникновения ионов для сравнения и оценки состояния твердости приповерхностного слоя после облучения у исследуемых образцов. Во время измерения твердости индентирование проводилось в областях, удаленных от трещин и скоплений бора.

Облучение исследуемых образцов проводилось на циклотроне ДЦ-60 тяжелыми ионами криптона (Kr) с энергией 147 МэВ и флюенсом до 10^{15} см^{-2} [22]. Использование ионного облучения позволяет моделировать радиационные повреждения от осколков деления, характерные для условий эксплуатации материалов в ядерной энергетике.

Результаты и обсуждение

Для оценки величины радиационных повреждений и глубины их пика был выполнен расчет с использованием программы SRIM/TRIM для диборидов TiB_2 , NbB_2 и высокоэнтропийного диборида (ВЭБ) TiZrHfNbTaB_2 , облучённых ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 147 МэВ. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Анализ распределения энергетических потерь (Рисунок 4а) показал, что на начальном участке пробега ионов преобладают потери энергии на электронное торможение, обусловленное процессами возбуждения электронов и ионизации атомов материала. По мере проникновения вглубь мишени происходит замедление ионов, что сопровождается увеличением вклада ядерного торможения. Упругие столкновения налетающих ионов с атомами решётки приводят к их смещению из узлов решетки и формированию радиационных дефектов. Для ионов криптона, налетающих с энергией 147 МэВ, пробег ионов в TiZrHfNbTaB_2 составляет 12,84 мкм, в NbB_2 – 15,47 мкм, в TiB_2 – 16,84 мкм. Электронные потери для TiZrHfNbTaB_2 составляют $1,682 \cdot 10^4$ кэВ/мкм, а ядерные потери энергии составляют 46,90 кэВ/мкм. Для NbB_2 электронные потери составляют $1,278 \cdot 10^4$ кэВ/мкм, а ядерные потери энергии составляют 31,29 кэВ/мкм. Для TiB_2 электронные потери составляют $1,165 \cdot 10^4$ кэВ/мкм, а ядерные потери энергии составляют 24,41 кэВ/мкм. Как видно из рисунка 4б, наибольший уровень радиационных повреждений наблюдается в ВЭБ, для которого максимальное значение повреждающей дозы составило около 2,3 дпа (смещений на атом) на глубине порядка 12,84 мкм. Доля имплантированных ионов криптона незначительна и составляет менее 0,016 ат. %.

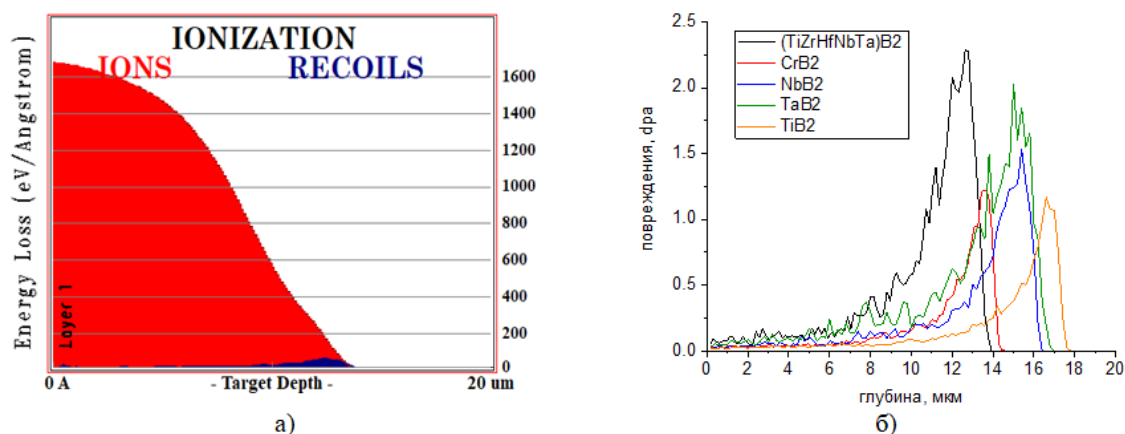


Рисунок 4. Распределение: (а) потери энергии ионов (ions) и атомов отдачи (recoils) на ионизацию в ВЭБ, (б) доза радиационных повреждений криптона в образцах TiB_2 , CrB_2 , NbB_2 , TaB_2 и $TiZrHfNbTaB_2$, облученных ионами криптона.

На Рисунке 5 представлены результаты исследования поверхности образцов. После ионного облучения в образцах не наблюдаются значительные изменения морфологии поверхности, кроме образца TiB_2 . На поверхности $TiZrHfNbTaB_2$ присутствуют тёмные области и сколы. Это указывает на перераспределение бора около темных пятен и, возможно, формирование дефектов, которые связаны с механическим или радиационным повреждением. Заметного изменения или эрозии поверхности по сравнению с исходным состоянием ВЭБ не было обнаружено. Морфологические особенности NbB_2 , такие как исходная пористость и трещины, не претерпевают значительных изменений под воздействием ионного облучения. Для TiB_2 в исходном состоянии наблюдалась зернистая структура поверхности с мелкими продолговатыми зернами. После облучения на поверхности TiB_2 была обнаружена структура с более крупными зернами и трещинами между ними, а также порами.

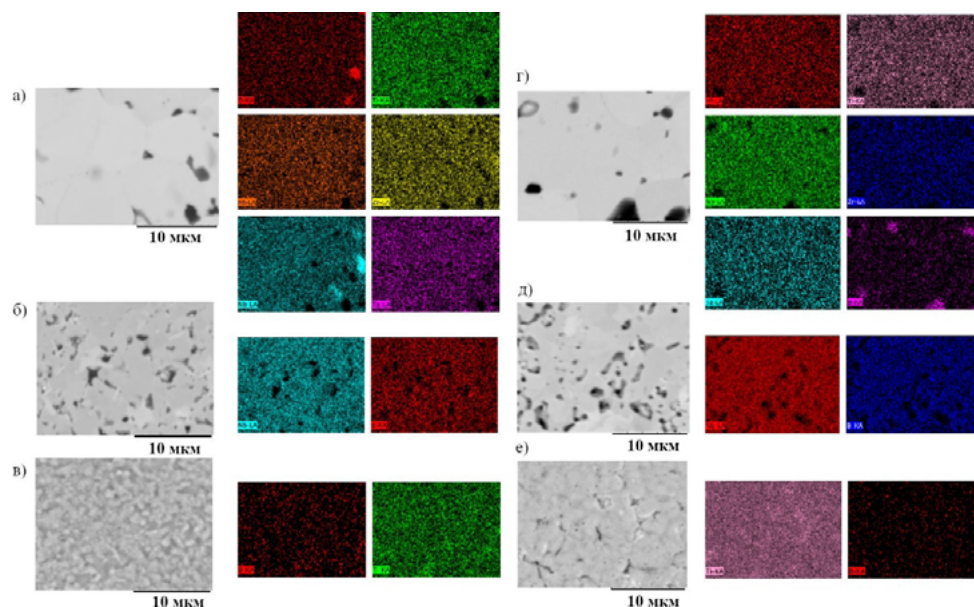


Рисунок 5. Снимки поверхности и соответствующие им карты элементов в (а-в) исходных и (г-е) облученных ионами криптона, полученные с помощью РЭМ-ЭДС образцах (а, г) $(TiHfNbZrTa)B_2$, (б, д) NbB_2 , (в, е) TiB_2 .

Анализ фазового состава и параметров кристаллической решётки был выполнен методом рентгеновской дифракции. На рисунке 6 показано, что пики исходного высокоэнтропийного диборида (TiHfZrNbTa) B_2 соответствуют фазе с гексагональной структурой типа AlB_2 . На рентгенограммах диборидов переходных металлов, таких как NbB_2 и TiB_2 , обнаружены пики примесных фаз карбидов и других фаз борида. Кроме того, в исходном TiB_2 присутствует фаза рутила (TiO_2), которая после облучения пропадает, но сформировалась фаза графита.

В таблице 1 приведены параметры решетки до и после облучения криптоном с энергией 147 МэВ. Параметры решетки всех борида увеличиваются, где наибольшее изменение по параметру решетки a обнаружены у ВЭБ (0,54%), а по параметру c у NbB_2 (0,61%). Стоит отметить, что в ВЭБ рост параметра решетки a превышает рост параметра c , что согласуется с трендами для борида с гексагональной решеткой типа TiB_2 . В NbB_2 наоборот увеличение параметра c превышает увеличение параметра a .

Увеличение параметров решетки свидетельствует о преимущественном накоплении радиационно-индуцированных дефектов вдоль одной из осей решетки и анизотропной деформации решетки. Анизотропное расширение решетки характерно для гексагональных борида, таких как TiB_2 , и связано с тем, что большая часть дефектов, например, дислокационных петель скапливается в плоскости призмы, параллельной оси a [23]

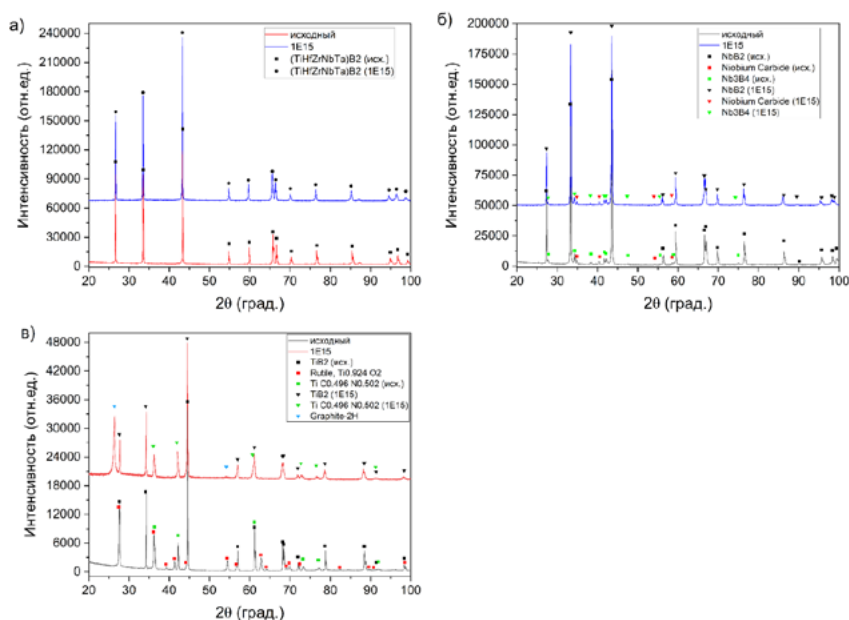


Рисунок 6. Рентгенограммы: а) ВЭБ (TiHfZrNbTa) B_2 , б) NbB_2 , в) TiB_2 .

Таблица 1. Параметры решётки исходных и облученных ионами криптона борида.

Состояние	Параметр решетки	NbB_2	TiB_2	(TiHfNbZrTa) B_2
Необлученные	a (Å)	3.10845 ± 0.00021	3.02499 ± 0.00400	3.08995 ± 0.00014
	c (Å)	3.26378 ± 0.00023	3.22761 ± 0.00430	3.34916 ± 0.00015
	a/c	0,95241	0,93722	0,92260
Kr 147 МэВ, $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$	a (Å)	3.11843 ± 0.00003	3.03826 ± 0.00008	3.10658 ± 0.00004
	c (Å)	3.28698 ± 0.00005	3.24185 ± 0.00009	3.35994 ± 0.00005
	a/c	0,94872	0,93720	0,92459

Устойчивость механических свойств боридов оценивались по изменению микротвердости. На рисунке 7 показано, что облучение приводит к эффекту радиационного упрочнения, наиболее выраженному для ВЭБ (примерно на 12%). В то же время в NbB_2 упрочнение минимальное, а в TiB_2 обнаружено уменьшение твердости на 32% от исходного. В качестве погрешности значений микротвердости использовали стандартное отклонение, рассчитанное по результатам пяти измерений для каждого образца.

Рост твердости ВЭБ, вероятно, обусловлен образованием точечных дефектов и дислокационных петель, препятствующих движению дислокаций, что согласуется с исследованием, проведенным группой ученых Khanolkar [9], где после облучения ионами Au, с энергией 10 МэВ, увеличение твердости ВЭБ ($\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}$) B_2 достигала 10%. Вероятно, это связано с тем, что в ВЭБ из-за эффекта химического разупорядочивания и замедленной диффузии, препятствующими росту дефектных структур, миграция мелких дефектов подавляется [3]. Уменьшение твердости в TiB_2 , вероятно, связано с возникновением растрескивания TiB_2 , вызванным анизотропным изменением параметром решетки [8].

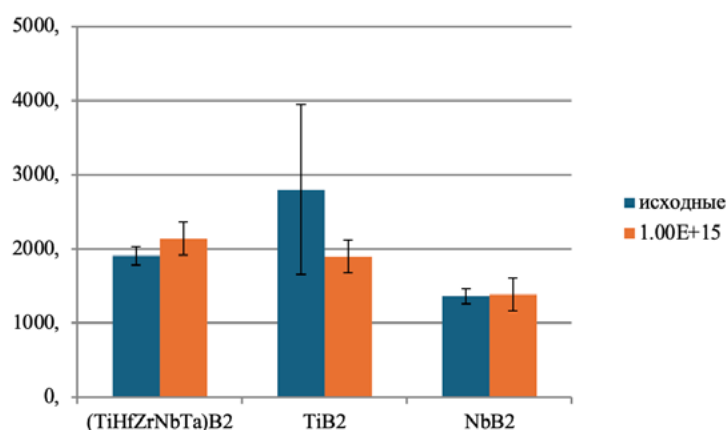


Рисунок 7. Твёрдость образцов до облучения и после облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 147 МэВ с флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Глубина индентирования – около 9-12 мкм (HV5) (область с максимальными радиационными повреждениями (dpa)).

Таким образом, в исследованных условиях облучения ВЭБ продемонстрировал более высокую устойчивость к радиационно-индуцированным изменениям структуры и механических свойств по сравнению с бинарными диборидами.

Заключение

Выполнен обзор методов получения и свойств высокоэнтропийных диборидов, в ходе которого было установлено, что ВЭБ, полученный с помощью метода SPS, имеет однофазную структуру твердого раствора с решеткой типа AlB_2 .

Определена актуальность работы в виде сравнения ВЭБ с диборидами переходных металлов. В результате обзора исследований ВЭБ было выявлено, что ВЭБ имеет улучшенные механические свойства и устойчивость к окислению по сравнению с бинарными диборидами переходных металлов. Также определена степень изученности материала ВЭБ.

В работе проведено комплексное исследование влияния облучения тяжелыми ионами криптона на структуру и механические свойства высокоэнтропийных диборидов.

Расчёты повреждающих доз с использованием программы SRIM показали, что при флюенсе порядка 10^{15} см^{-2} уровень радиационных повреждений достигает $\sim 2.3 \text{ dpa}$, при глубине повреждённого слоя - около 12 мкм.

Анализ поверхности РЭМ-ЭДС показал, что на поверхности ВЭБ присутствуют выделения бора, а в NbB_2 присутствуют поры бора и трещины. Облучение не приводит к значительному изменению морфологии поверхности боридов, кроме TiB_2 , где образуются трещины.

Установлено, что ВЭБ обладает однофазной гексагональной структурой типа AlB_2 и однородным распределением элементов. Установлено, что ВЭБ сохраняет относительную однородность распределения элементов на поверхности и структурную стабильность после облучения без выраженной сегрегации элементов.

После облучения обнаружено, что в ВЭБ преобладает увеличение параметра решетки a относительно параметра c , что вероятно связано с накоплением радиационно-индуцированных дефектов и анизотропной деформацией решётки. В NbB_2 наблюдается обратный эффект, когда увеличение параметра c преобладает над параметром a .

Показано, что ионное облучение приводит к выраженному радиационному упрочнению ВЭБ на 12%, сопровождающемуся увеличением микротвердости. В TiB_2 твердость снижается на 32%.

Таким образом, в исследованных условиях облучения ионами Kr с энергией 147 МэВ ВЭБ продемонстрировал более высокую устойчивость к радиационно-индуцированным изменениям по сравнению с бинарными аналогами, что обусловлено эффектами химической разупорядоченности и замедленной диффузии, препятствующими росту дефектных структур. Полученные результаты подтверждают перспективность их применения в условиях интенсивного радиационного воздействия.

Благодарность

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. AP23489645 «Структурно-фазовое состояние высокоэнтропийных боридных керамик, облученных высокоэнергетическими ионами до больших повреждающих доз»).

Вклад авторов

Ә.Д. Сапар – автор для корреспонденции, подготовка рукописи, сбор материалов и обзор литературы.

И.А. Иванов – формирование целей исследования, руководство и общее редактирование.

А.С. Сейтбаев – теоретическое обсуждение, подготовка графиков, редактирование текстов.

Б.С. Аманжолов – сбор материалов, анализ результатов, аналитические расчеты, редактирование текстов.

Ә.М. Темір – подготовка графиков, обсуждение, анализ результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них отсутствует какой-либо конфликт интересов, связанный с публикацией данной статьи.

Заявление об использовании генеративного ИИ и технологий, использующих ИИ, в процессе подготовки рукописи

В процессе подготовки данной статьи авторы использовали инструменты искусственного интеллекта, а именно ChatGPT для улучшения стиля текста, а также для повышения ясности формулировок. После использования этого сервиса авторы проверили и отредактировали содержание по мере необходимости и несут полную ответственность за содержание опубликованной статьи.

Список литературы

1. Y. Zhu, J. Chai, Z. Wang, T. Shen, L. Niu, S. Li, P. Jin, H. Zhang, J. Li, and M. Cui, *Microstructural damage evolution of (WTiVNbTa)C5 high-entropy carbide ceramics induced by self-ions irradiation*, Journal of the European Ceramic Society 42, 2567 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.061>

2. F. Wang, X. Yan, T. Wang, Y. Wu, L. Shao, M. Nastasi, Y. Lu, and B. Cui, *Irradiation damage in (Zr_{0.25}Ta_{0.25}Nb_{0.25}Ti_{0.25})C high-entropy carbide ceramics*, Acta Materialia 195, 739 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.06.011>
3. F. Wang, F. Monteverde, and B. Cui, *Will high-entropy carbides and borides be enabling materials for extreme environments?* International Journal of Extreme Manufacturing. 5, 022002 (2023). <https://doi.org/10.1088/2631-7990/acbd6e>
4. W. Bao, S. Robertson, J.-W. Zhao, J.-X. Liu, H. Wu, G.-J. Zhang, and F. Xu, *Structural integrity and damage of ZrB₂ ceramics after 4 MeV Au ions irradiation*, Journal of Materials Science & Technology 72, 223 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.09.019>
5. D. Rønning and Y. Tang, *Irradiation resistance of thermo-optical properties of zirconium diboride by 3 MeV electrons*, Frontiers in Space Technologies. 5, 1355258 (2024). <https://doi.org/10.3389/frspt.2024.1355258>
6. G. V. Samsonov, M. S. Koval'chenko, V. V. Ogorodnikov, and A. G. Krainii, *Investigation of the radiation stability of borides*, Soviet Atomic Energy 24, 232 (1968). <https://doi.org/10.1007/BF01114199>
7. E. U. Grinik, V. V. Ogorodnikov, and A. G. Krainy, *Fracturing of borides under neutron irradiation*, Journal of Nuclear Materials 233–237, 1349 (1996). [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00293-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00293-0)
8. A. Bhattacharya, C. M. Parish, T. Koyanagi, C. M. Petrie, D. King, G. Hilmas, W. G. Fahrenholtz, S. J. Zinkle, and Y. Katoh, *Nano-scale microstructure damage by neutron irradiations in a novel Boron-11 enriched TiB₂ ultra-high temperature ceramic*, Acta Materialia 165, 26 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.11.030>
9. A. Khanolkar, A. Datye, Y. Zhang, C. A. Dennett, W. Guo, Y. Liu, W. J. Weber, H.-T. Lin, and Y. Zhang, *Effects of irradiation damage on the hardness and elastic properties of quaternary and high entropy transition metal diborides*, Journal of Applied Physics 136, 105106 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0206224>
10. J. Gild, Y. Zhang, T. Harrington, S. Jiang, T. Hu, M. C. Quinn, W. M. Mellor, N. Zhou, K. Vecchio, and J. Luo, *High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics*, Scientific Reports 6, 37946 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep37946>
11. M. A. Tunes et al., *From high-entropy alloys to high-entropy ceramics: The radiation-resistant highly concentrated refractory carbide (CrNbTaTiW)C*, Acta Materialia 250, 118856 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118856>
12. S. Akrami, P. Edalati, M. Fuji, and K. Edalati, *High-entropy ceramics: Review of principles, production and applications*, Materials Science and Engineering: R: Reports 146, 100644 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100644>
13. I. Bogomol, E. Ferkhatly, S. Ponomarchuk, Y. Zaulychnyi, M. Karpets, and I. Solodkyi, *Ceramic eutectic composites based on B₄C directionally reinforced by high-entropy (TiZrHfNbTa)B₂ boride*, Journal of the European Ceramic Society 44, 51 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.08.028>
14. K. Sairam, J. K. Sonber, T. S. R. Ch. Murthy, C. Subramanian, R. K. Fotedar, and R. C. Hubli, *Reaction spark plasma sintering of niobium diboride*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 43, 259 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.12.011>
15. S. Iwan, C.-M. Lin, C. Perreault, K. Chakrabarty, C.-C. Chen, Y. Vohra, R. Hrubciak, G. Shen, and N. Velisavljevic, *High-Entropy Borides under Extreme Environment of Pressures and Temperatures*, Materials 15, 3239 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15093239>
16. L. Feng, W. G. Fahrenholtz, and D. W. Brenner, *High-Entropy Ultra-High-Temperature Borides and Carbides: A New Class of Materials for Extreme Environments*, Annual Review of Materials Research. 51, 165 (2021). <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-080819-121217>
17. G. Tallarita, R. Licheri, S. Garroni, S. Barbarossa, R. Orrù, and G. Cao, *High-entropy transition metal diborides by reactive and non-reactive spark plasma sintering: A comparative investigation*, Journal of the European Ceramic Society 40, 942 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.031>
18. A. Ya. Pak, P. V. Povalyaev, A. V. Vlasov, R. D. Gerasimov, Zh. S. Bolatova, A. A. Svinukhova, A. V. Spodina, and Y. Z. Vassilyeva, *Synthesis of high-entropy diboride TiZrNbHfTaB₂ by vacuum-free direct current arc plasma method*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 134, 107417 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107417>

19. Ziegler J. F., Ziegler M. D., and Biersack J. P., *SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B 268, 1818–1823 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>
20. Döbelin N. and Kleeberg R., *Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN*, J. Appl. Crystallogr. 48, 1573–1580 (2015). <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
21. Altomare A., Corriero N., Cuocci C., Falcicchio A., Moliterni A., and Rizzi R., *QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW_COD*, J. Appl. Crystallogr. 48, 598–603 (2015). <https://doi.org/10.1107/S1600576715002319>
22. M. Zdorovets, I. Ivanov, M. Koloberdin, S. Kozin, V. Alexandrenko, E. Sambaev, A. Kurakhmedov, and A. Ryskulov, *Accelerator Complex Based on DC-60 Cyclotron*, Proceedings of 24th Russian Particle Accelerator Conference (Obninsk), p. 287–289 (2014).
23. Y.-R. Lin, T. Koyanagi, D. J. Sprouster, C. M. Petrie, W. Fahrenholtz, G. E. Hilmas, and Y. Katoh, *Response of 11B enriched ZrB₂ ultra-high temperature ceramic to neutron irradiation at elevated temperatures*, Acta Materialia 276, 120111 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120111>

Ә.Д. Сапар^{*1,2}, И.А. Иванов¹, А.С. Сейтбаев¹, Б.С. Аманжулов¹, Ә.М. Темір¹

¹Қазақстан Республикасы Атом энергиясы агенттігінің Ядролық физика институты,
Алматы, Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КЕАҚ, Астана, Қазақстан
(E-mail: *sapar_ad_1@enu.kz, i.ivanov@inp.kz, a.seitbek@inp.kz, b.amanzhulov@inp.kz, a.temir@inp.kz)

Криптонның ауыр иондарымен сәулелендірудің жоғары энтропиялық диборидтердің құрылымдық-фазалық күйі мен механикалық қасиеттеріне әсерін зерттеу

Аңдатпа. Ядролық және аэроғарыштық технологиялар радиацияға төзімді материалдарды жасауды қажет ететіндіктен, жоғары энтропиялық боридтердің (ЖЭБ) радиацияға төзімділігін зерттеу өзекті болып табылады. Олар жоғары балқу температурасы, қаттылық және химиялық инерттілік сияқты бір металдан тұратын диборидтердің артықшылықтарын біріктіреді, бірақ жоғары радиациялық төзімділікті көрсетеді. Бұл мақала ЖЭБ қасиеттеріне және оларды синтездеу әдістеріне қысқаша шолу жасайды. Криптонның ауыр иондарымен сәулелендірудің ұшқынды плазмалық күйдіру (SPS) арқылы синтезделген (TiHfZrNbTa)B₂ ЖЭБ-ның құрылымдық-фазалық күйіне және механикалық қасиеттеріне әсері зерттеледі. SRIM есептеулері $\sim 10^{15}$ см⁻² флюенсте 12 мкм дейінгі тереңдікте зақымдану деңгейі шамамен 2,3 атомға ығысуға (dpa) жететінін көрсетті.

РЭМ-ЭДС көмегімен ЖЭБ және NbB₂ және TiB₂ қос диборидтерінің беттік морфологиясы талданды. Сәулелендіру беттік морфологияны айтарлықтай өзгерткен жоқ, бірақ TiB₂-де жарықтар пайда болды.

Рентгендік дифракция барлық боридтердің тор параметрлерінің артқанын көрсетті: ЖЭБ үшін ең үлкен өзгеріс тордың *a* параметрінде (0,54%) және NbB₂ үшін тордың *c* параметрінде (0,61%) болды. Тордың осындай анизотропты деформациясы сәулелендіруден туындаған ақаулардың тор осьтерінің бірі бойымен жиналуын көрсетуі мүмкін.

Виккерс әдісімен жүргізілген микротвердылықты зерттеу криптон иондарымен сәулелендірудің жоғары энтропиялы диборидтің (TiHfZrNbTa)B₂ радиациялық қатаюына әкелетінін көрсетті, ал TiB₂ үшін микротвердылықтың төмендеуі байқалды. NbB₂ жағдайында өлшеу қателігі шегінде механикалық қасиеттердің елеулі өзгерістері анықталған жоқ.

Алынған нәтижелер зерттелген сәулелендіру жағдайларында жоғары энтропиялы диборидтің (ЖЭД) құрылымдық-фазалық күйі мен механикалық қасиеттерінің сақталатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: жоғары энтропиялық борид (ЖЭБ), DC-60, ұшқынды плазмалық күйдіру (SPS), радиациялық төзімділік, радиациялық беріктендіру, керамика

A.D. Sapar^{*1,2}, I.A. Ivanov¹, A.S. Seitbayev¹, B.S. Amanzhulov¹, A.M. Temir¹

¹ Institute of Nuclear Physics of the Atomic Energy Agency of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

² NJSC L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

(E-mail: *sapar_ad_1@enu.kz, i.ivanov@inp.kz, a.seitbek@inp.kz, b.amanzhulov@inp.kz, a.temir@inp.kz)

Study of the Effect of Heavy Krypton Ion Irradiation on the Structural-Phase State and Mechanical Properties of High-Entropy Diborides

Abstract. Since nuclear and aerospace technology require the creation of radiation-resistant materials, studying the radiation resistance of high-entropy borides (HEBs) is relevant. They combine the advantages of single-metal diborides, such as high melting point, hardness, and chemical inertness, but exhibit superior radiation resistance. This paper provides a brief overview of the characteristics of HEBs and their synthesis methods. The effect of heavy krypton ion irradiation on the structural and phase state and mechanical properties of (TiHfZrNbTa)B₂ HEB synthesized by spark plasma sintering is studied. SRIM calculations showed that at a fluence of $\sim 10^{15}$ cm⁻², the damage level reaches ~ 2.3 displacements per atom (dpa) at a depth of up to 12 μ m.

Using SEM-EDS, the surface morphology of HEB and the binary diborides NbB₂ and TiB₂ was analyzed. Irradiation did not significantly alter the surface morphology, but cracks formed in TiB₂.

X-ray diffraction analysis showed that the lattice parameters of all borides increased, with the largest change in the lattice parameter *a* for HEB (0,54%) and in the lattice parameter *c* for NbB₂ (0,61%). This anisotropic lattice deformation likely indicates the accumulation of radiation-induced defects along one of the lattice axes.

Microhardness measurements performed using the Vickers method showed that krypton ion irradiation leads to radiation-induced hardening of the high-entropy diboride (TiHfZrNbTa)B₂, whereas a decrease in microhardness was observed for TiB₂. In the case of NbB₂, no significant changes in mechanical properties were detected within the measurement uncertainty.

The obtained results demonstrate that the high-entropy diboride (HEB) maintains its structural-phase stability and mechanical performance under the investigated irradiation conditions.

Keywords: high-entropy boride (HEB), DC-60, spark plasma sintering (SPS), radiation resistance, radiation hardening, ceramics

Сведения об авторах:

Ә.Д. Сапар – автор для корреспонденции, докторант PhD кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; начальник службы ВЧ-систем и ЭЦР-источника, АФ РГП на ПХВ Институт ядерной физики, Астана, Казахстан.

И.А. Иванов – PhD, ассоц. профессор, начальник циклотрона ДЦ-60, АФ РГП на ПХВ Институт ядерной физики, Астана, Казахстан.

А.С. Сейтбаев – PhD, руководитель проекта, инженер службы управления, АФ РГП на ПХВ Институт ядерной физики, Астана, Казахстан.

Б.С. Аманжулов – инженер службы управления, АФ РГП на ПХВ Институт ядерной физики, Астана, Казахстан.

Ә.М. Темір – PhD, инженер технологической службы, АФ РГП на ПХВ Институт ядерной физики, Астана, Казахстан.

Ә.Д. Сапар – хат-хабар авторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының PhD докторанты, Астана, Қазақстан; «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК Астана филиалының ЖЖ-жүйелері және ЭЦР-көздері қызметінің бастығы, Астана, Қазақстан.

И.А. Иванов – PhD, қауымдастырылған профессор, «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК Астана филиалының ДЦ-60 циклотронының бастығы.

А.С. Сейтбаев – PhD, жоба жетекшісі, «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК Астана филиалының басқару қызметінің инженері, Астана, Қазақстан.

Б.С. Аманжулов – «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК Астана филиалының технологиялық қызметінің инженері, Астана, Қазақстан.

Ә.М. Темір – PhD, «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК Астана филиалының технологиялық қызметінің инженері, Астана, Қазақстан.

A.D. Sapar – the corresponding author, PhD doctoral student of the Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; Head of the RF Systems and ECR Ion Source Service, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics RSE on REM, Astana, Kazakhstan.

I.A. Ivanov – PhD, Associate Professor, Head of the DC-60 Cyclotron, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics RSE on REM, Astana, Kazakhstan.

A.S. Seithbayev – PhD, Project Leader, Engineer of the Control Service, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics RSE on REM, Astana, Kazakhstan.

B.S. Amanzhulov – Engineer of the Technological Service, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics RSE on REM, Astana, Kazakhstan.

A.M. Temir – PhD, Engineer of the Technological Service, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics RSE on REM, Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).