

УДК 539.2; 538.9-405; 548
Обзорная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-156-3-50-69>

Высокоэнтропийные оксидные керамики: структура, методы синтеза и области применения

И. З. Жуматаева* 

Лаборатория физики твердого тела, Институт ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

E-mail: inesh.zhumatayeva@gmail.com

Аннотация. Высокоэнтропийные материалы представляют собой новый класс многоэлементных материалов, созданных путем смешивания пяти или более компонентов. Благодаря выраженным высокоэнтропийным эффектам данные материалы обладают уникальными физико-химическими свойствами. В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к высокоэнтропийным материалам, что подтверждается увеличением числа научных публикаций, посвящённых высокоэнтропийным сплавам, керамикам и оксидам.

В данной обзорной статье систематизированы современные представления о высокоэнтропийных оксидных керамиках (ВЭОК): представлены данные для понимания основных типов кристаллических структур — каменная соль, флюорит, перовскит, пироклор, шпинель и т.п.; рассмотрены принципы синтеза ВЭОК и способы их применения. Показана роль высокой конфигурационной энтропии в стабилизации однофазных состояний, влияние химической сложности на искажение кристаллической решетки, диффузионные процессы и формирование так называемого «эффекта коктейля».

В работе представлены основные методы синтеза ВЭОК: твердофазные, жидкофазные и газофазные методы, а также их влияние на фазовый состав, микроструктуру и свойства материалов. Обзор охватывает современные исследования механических, термодинамических, каталитических и электроэнергетических характеристик высокоэнтропийных оксидов (ВЭО), а также их применение в конструкционных материалах и покрытиях; рассмотрены перспективные области применения высокоэнтропийных оксидных керамик, такие как теплозащитные покрытия, каталитические системы, электро- и ионопроводящие материалы, а также материалы для эксплуатации в экстремальных условиях.

Проведённый анализ позволяет выявить взаимосвязи между структурой, методами синтеза и свойствами высокоэнтропийных оксидов, что создает основу для разработки новых материалов с заданными характеристиками.

Поступила 12.02.2026. После доработки 12.03.2026. Принята к печати 31.03.2026. Доступно онлайн 30.09.2026.

*автор для корреспонденции

Ключевые слова: высокоэнтропийные оксидные керамики, конфигурационная энтропия, методы синтеза, кристаллическая структура, функциональные свойства, теплозащитные покрытия.

Введение

Высокоэнтропийные материалы – новый класс однофазных материалов, привлекающий внимание исследователей благодаря своим уникальным характеристикам по сравнению с традиционными системами. Интерес к данному классу материалов привлекает все больше внимания ученых из-за их свойств и характеристик. Согласно проведенному анализу, результаты которого представлены на рисунке 1, количество публикаций и исследований в этой сфере с каждым годом увеличивается.

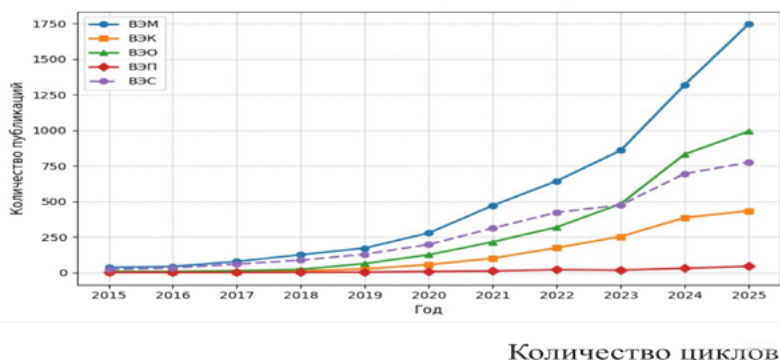


Рисунок 1. Динамика количества научных публикаций по годам, где ВЭМ – высокоэнтропийные материалы, ВЭК – керамики, ВЭО – оксиды, ВЭП – перовскиты, ВЭС – сплавы

Примечание: составлено на основе данных [1]

Высокоэнтропийные материалы обычно состоят из пяти или более элементов с эквивалентным или близким к эквивалентному составом, где содержание каждого основного элемента находится в диапазоне 5–35 ат. %. Такое многокомпонентное сочетание приводит к повышенной дислокации кристаллической решётки из-за различий в атомных радиусах, а также к формированию высокой энтропии смешения и широкому спектру типов элементов. Эти факторы обуславливают появление характерных эффектов высокоэнтропийных материалов: диффузионных эффектов динамического гистерезиса, термодинамического эффекта высокой энтропии, структурного искажения решётки и так называемого «эффекта коктейля», когда сочетание большого числа элементов приводит к синергетическим свойствам, недоступным традиционным материалам [2].

В процессе изучения высокоэнтропийных материалов было выявлено значительное количество высокоэнтропийных керамик (ВЭК) с различными типами кристаллических структур: оксиды, нитриды, силициды, бориды, карбиды, сульфиды, фосфиды. (рис. 2). Активное развитие ВЭК обусловлено сочетанием свойств, характерных для высокоэнтропийных сплавов и классических керамик, включая высокую твердость, высокую температуру плавления, высокую коррозионную стойкость и исключительную термическую стабильность. Высокая химическая сложность в сочетании с упорядоченной кристаллической структурой формирует уникальный набор свойств, который часто описывается как «неупорядоченный химический состав при упорядоченной структуре», что обеспечивает повышенную стабильность и улучшенные физико-химические характеристики материала. Благодаря высокой термической, механической и химической устойчивости, а также специфическим электронным и структурным особенностям, высокоэнтропийные оксидные керамики демонстрируют значительный потенциал применения в областях, связанных с воз-

действием высоких температур и механических нагрузок, а также в световых и электрических процессах, системах хранения энергии и каталитических реакциях [3].

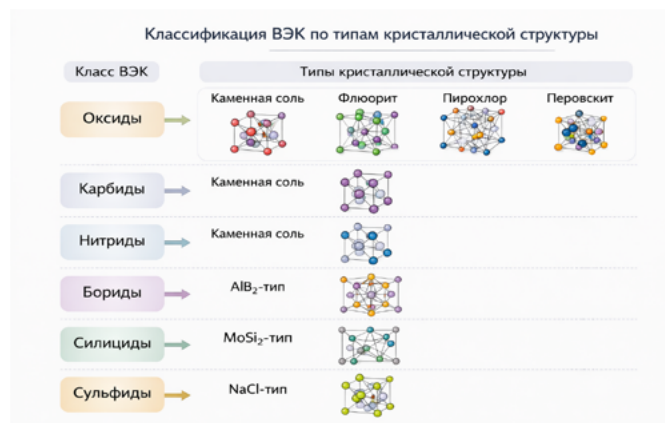


Рисунок 2. Виды высокоэнтропийной керамики по типам кристаллической структуры

Вдохновленные концепцией высокоэнтропийных материалов и сплавов, ученые активно применяют её для синтеза высокоэнтропийной керамики, что привело к появлению целого ряда различных структур: каменная соль, перовскит, флюорит, шпинель, пироклор, биксбиит, муллит, рутил, силикат, алюминат редкоземельного элемента и др. Эти открытия существенно расширили область применения ВЭК, понимание их возможностей и сфер применения, а также создали теоретическую и экспериментальную основу для разработки новых функциональных керамических материалов [4].

1. Виды высокоэнтропийных оксидных керамик

Существует различные виды ВЭОК, в зависимости от строения кристаллической решетки, их можно разделить на подтипы: каменная соль, флюорит, шпинель, перовскит, биксбиит и др. Отличия в типе решетки, валентных состояниях катионов и степени локальных искажений существенно влияют на свойства материала и область их применения. В случае оксидов ключевую роль играет возможность объединять в кристаллической решётке несколько катионов в близких мольных долях, сохраняя при этом устойчивую оксидную подрешетку. Такой подход открывает путь к созданию материалов с уникальными комбинациями электрических, магнитных, каталитических и термических свойств. Разнообразие возможных структурных вариантов делает высокоэнтропийные оксиды широкой и гибкой основой для создания новых материалов.

1.1 Структура типа каменной соли

Одной наиболее изученных ВЭОК является керамика типа каменной соли в силу своей простоты процесса синтеза и раннего открытия. Классическим представителем данной структуры является $(\text{MgCoNiCuZn})\text{O}$ [6]. Данная ионная кристаллическая структура относится к типу АВ, где ионы А и В занимают одинаковые позиции в гранецентрированной кубической решетке, где каждый катион А окружен шестью анионами В, образуя октаэдрическую координацию. Соотношение радиусов положительных и отрицательных ионов составляет приблизительно 0.53, что соответствует кубической кристаллической системе с пространственной группой Fm-3m (рис. 3(а-а1)).

1.2 Структура типа флюорита

ВЭОК типа флюорита обладают кубической системой с пространственной группой Fm-3m (рис.3(б)). Классическими представителями данного типа являются три вида: $(\text{Ce}\{\text{RE}\})_{0.2-8}(\text{ZrHfCe}\{\text{M}\})\text{O}_{2-8}$ и $\text{RE}_2\text{TM}_2\text{O}_7$, где RE — редкоземельные элементы (La, Ce, Y, Yb и др.), М — металлы, а ТМ — переходные металлы (Ti, Zr, Hf). Значение δ зависит от заряда катионов.

С использованием твердофазных реакций были получены новые 6-катионные однофазные высокоэнтропийные флюоритовые оксиды (ВЭФО) $(\text{Ce}_{0.16}\text{Zr}_{0.16}\text{La}_{0.16}\text{Sm}_{0.16}\text{Nd}_{0.16}\text{Y}_{0.16})\text{O}_{2-8}$ (CZLSNYO), проведено детальное исследование их структуры и механических свойств. CZLSNYO демонстрирует однофазную

кубическую флюоритовую структуру с гладкой поверхностью и четкими границами зерен после спекания при 1400–1600 °С в течение 12 часов. Рассчитанная концентрация Ce^{3+} составляет $22,23\% \pm 1,11\%$, $\delta = 0,3519 \pm 0,0176$, что соответствует номинальному составу 01.6481 ± 0.0176 . С повышением температуры спекания средний размер зерна сначала увеличивается, а затем уменьшается; динамика твердости по Виккерсу совпадает с изменением размера зерен. По сравнению с 5-катионными ВЭФО, 6-катионные CZLSNYO, спеченные при 1500 °С, обладают высокой твердостью (16,32 ГПа) и вязкостью разрушения (8,07 МПа $\text{м}^{1/2}$) благодаря увеличению конфигурационной энтропии системы и высокой твердости элемента Y, что реализует эффект «коктейля» [9].

1.3 Структура типа перовскит

Перовскитные ВЭОК являются одной из активно исследуемых групп ВЭК. Эти материалы могут иметь различные кристаллические модификации: кубическую, тетрагональную, орторомбическую и гексагональную (рис. 3(с)). Структура перовскита представлена формулой ABO_3 , где катион А окружён 12 атомами кислорода, катион В — 6 атомами, а кислород формирует октаэдры. Возможны различные варианты легирования катионов в позициях А и В: они могут быть легированы как отдельно, так и одновременно в обеих позициях, что приводит к значительным различиям в физических и химических характеристиках. Существует два основных типа составов: $(\{\text{Sr}, \text{Ba}\}) (\{\text{M}\}) \text{O}_3$, где М включает 6–7 различных металлов, и $(\{\text{RE}\}) (\{\text{TM}\}) \text{O}_3$, в которых на позиции А находятся редкоземельные элементы, а на позиции В — переходные металлы. Согласно ранним исследованиям, формирование перовскита происходит при коэффициенте толерантности в диапазоне 0,98–1,02. Однофазную структуру удастся получить не всегда, так как она может разрушаться под влиянием энтальпийных эффектов; оптимальная температура спекания для образования перовскита составляет 1423–1673 К. Перовскитные ВЭОК демонстрируют отличные электрические, диэлектрические и электрохимические свойства.

В работе [11] было спроектировано и исследовано конформное покрытие с высокоэнтропийной структурой перовскита $\text{PrNi}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (PNMCFC) для современного воздушного электрода $\text{PrBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$. Сформированный гибридный воздушный электрод (PNMCFC-PBC) демонстрирует более быструю кинетику поверхностного кислорода и более стабильную фазовую структуру в воздухе с высокой влажностью, чем непокрытый электрод, конформное покрытие смягчает сегрегацию Ba на границе раздела и улучшает реакции, связанные с кислородом, повышая общую стабильность и электрокаталитические характеристики.

1.4 Структура типа шпинель

Шпинельные ВЭОК обладают структурой типа AB_2O_4 , где катион А окружен четырьмя атомами кислорода, катион В окружен шестью атомами кислорода, атомы кислорода формируют кубическую плотную упаковку и относятся к пространственной группе Fd-3m. Получить однофазный шпинельный высокоэнтропийный оксид довольно сложно. Во многих составах наблюдается смесь фаз — шпинель + структура типа каменной соли. При температурах 900–1100 °С часть материалов склонна переходить в фазу ВЭОК типа каменной соли.

В работе [12] методом модифицированного растворо-горючего синтеза при температуре выше 623 К был получен нанокристаллический высокоэнтропийный оксид состава $(\text{CoCrFeMnNi})_3\text{O}_4$ со шпинельной структурой и пространственной группой Fd-3m. Установлено, что с повышением температуры синтеза размер кристаллитов увеличивается от 5,3 до 43,8 нм, параметр кристаллической решетки уменьшается с 8,354 до 8,287 Å, а степень искажения решетки сначала снижается, а затем незначительно возрастает. Магнитные измерения показали, что все полученные порошки проявляют ферромагнитное поведение при комнатной температуре.

1.5 Структура типа пироксид

Структура ВЭОК типа пироксид такая же, как и у флюорита $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$, где А – редкоземельный элемент, а В — переходный металл, могут иметь как кубическую, так и орторомбическую решетку с пространственной группой Fd-3m и Imma (рис. 3(d)). Пироксид можно рассматривать как разновидность структуры флюорита, в которой не хватает части анионов (примерно 1/8 тетраэдрических позиций пустые), ионы расположены более упорядоченно.

Результаты, представленные в работах [13,14] показывают существование пирохлорных высоко-энтропийных оксидных керамик с двухфазной структурой, включающей, например, фазы пирохлора и флюорита. Установлено, что фазовая стабильность в таких системах в значительной степени определяется соотношением ионных радиусов катионов r_a/r_b : при $1,46 \leq r_a/r_b \leq 1,78$ формируется пирохлорная структура, при $r_a/r_b < 1,46$ — флюоритовая, а при $r_a/r_b > 1,78$ — моноклинная, что указывает на сложный механизм фазообразования.

1.6 Структура типа биксбиит

ВЭОК типа биксбиит обладают структурой Re_2O_3 , где Re — редкоземельные элементы с пространственной группой — Ia-3 (рис.3(e)). Данный тип керамики близок по симметрии к флюориту, но с пропущенными или искаженными положениями анионов.

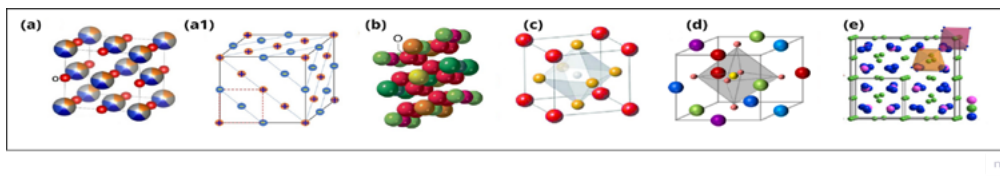


Рисунок 3. Типы кристаллических структур ВЭОК: (a и a1) — тип каменная соль, схема магнитной структуры, где + спин вверх, - спин вниз[7]; (b) — тип флюорита [8]; (c) — тип перовскита [10]; (d) — тип пирохлора [15]; (e) — тип биксбиита [15]

Методы синтеза

Структурное разнообразие ВЭОК способствует развитию различных методов синтеза, которые включают в себя как комбинированные, так и простые. Выбор подходящего способа зависит от распределения элементов, стабильности фаз, требуемого размера и формы частиц, а также желаемых свойств и области применения. При этом важно учитывать и внешние параметры: температуру, длительность обработки и сложность процесса. Кроме того, комбинирование нескольких методов может повышать эффективность и качество синтеза. В зависимости от условий методы синтеза ВЭО можно разделить на три основных типа: твердофазный, жидкофазный и газифазный методы. В таблице 1 представлена информация, показывающая достоинства и недостатки трех методов.

2.1 Метод твердой фазы

Твердофазный синтез — классический метод получения новых материалов, основанный на диффузии твердых компонентов при высокой температуре с образованием новых фаз. В качестве исходных соединений используют оксиды, карбонаты, нитраты или оксалаты металлов; их смешивают с помощью шаровых мельниц, планетарного измельчения или механической активации, а для улучшения контакта часто прессуют в таблетки. Образцы затем подвергают термическому воздействию при 800–1600 °С, что обеспечивает диффузию ионов, формирование фаз, рост зерен и уплотнение материала. При необходимости проводят повторное измельчение и отжиг для повышения однородности и завершения реакции.

Твердофазный синтез можно разделить на несколько типов:

- обычное спекание (CS);
- классический нагрев в печи, искровое плазменное спекание (SPS);
- быстрое спекание током и давлением, реакционное импульсное спекание (RFS);
- сверхбыстрое спекание вспышкой реакции, ультрабыстрое высокотемпературное спекание (UHS);
- мгновенный нагрев до очень высокой температуры, микроволновое спекание (MWS) – нагрев за счет микроволн.

В работе [16] был исследован и синтезирован высокоэнтропийный оксид $(\text{Y}_x\text{Er}_{1-x})_2(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Ge}_{0.2}\text{Sn}_{0.2})_2\text{O}_7$, $x = 0,01-0,05, 0,1$ с однофазной структурой флюорита методом твердофазного механохимического синтеза. Образец показал высокую термическую стабильность при 1500 °С в течение 5 ч, твердость по Виккерсу составила 9–10 ГПа. Благодаря эффекту высокой энтропии коэффициент теплового расширения

образцов составляет от 12,4879 до $13,0633 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Образец с $x = 0,03$ показывает наибольшую интенсивность флуоресценции и низкую теплопроводность.

2.1.1 Метод CS

Метод CS (обычное спекание) отличается простой аппаратурой, низкой стоимостью и хорошей пригодностью для промышленного использования. Такие традиционные методы позволяют получать большие объемы материала при низких производственных затратах.

В работе [17] исследованы магнитные и магнитокалорические свойства высокоэнтропийных перовскитных оксидов $((R_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Eu}_{0.2}\text{Dy}_{0.2}\text{Tb}_{0.2})\text{CrO}_3, R = \text{Pr, Nd, Sm})$, синтезированные методом твердофазного спекания. Все образцы имели однофазную орторомбическую структуру, проявляли слабые антиферромагнитные свойства и демонстрировали переход из антиферромагнитного состояния в парамагнитное при низких температурах. Максимальные изменения магнитной энтропии составили 12,8, 13,1 и 13,6 Дж·кг⁻¹·К⁻¹, при этом относительная охлаждающая способность достигала 153,05, 143,71 и 149,15 Дж·кг⁻¹ соответственно. Анализ диаграмм Аррота подтвердил наличие фазовых переходов второго рода и выявил особенности спинового упорядочения и магнитного обменного взаимодействия вблизи температур фазовых переходов.

У метода есть существенный недостаток: длительное спекание приводит к росту крупных зерен в материале, что снижает его прочность, вязкость и ухудшает свойства.

2.1.2 Метод SPS

Метод SPS – это одна из самых распространенных технологий уплотнения материалов. Её также называют искровым плазменным спеканием, спеканием на постоянном токе или спеканием с помощью электрического поля. В этом методе к порошку подается низкое напряжение и импульсный постоянный ток, который создает очень быстрое локальное нагревание. Благодаря этому сырой порошок почти мгновенно уплотняется в плотный объемный образец [18].

С помощью искрового плазменного спекания, была синтезирована алюминийсодержащая высокоэнтропийная $(\text{Ti,Ta,Nb,Zr,V,Al}_x)(\text{C,N})$ ($x = 0,1,2,3,4$ ат.%) карбонитридная керамика. Исследовалось влияние содержания Al на микроструктуру, механические свойства и стойкость к окислению. Исследованная керамика сохранила центрально-кубический решетку с измельченными зернами и равномерно распределенными зернами AlN. Наблюдалось увеличение твердости и трещиностойкости керамики за счет измельчения зерна. При увеличении содержания Al с концентрацией 0 % до 2% твердость по Виккерсу увеличилась с 22,96 ГПа до 24,16 ГПа соответственно. Аналогичным образом, при увеличении содержания концентрации Al до 3 % трещиностойкость увеличилась до 3,03 МПа·м², также улучшилось сопротивление высокотемпературному окислению [19].

Быстрое нагревание ускоряет уплотнение и при этом подавляет рост зерен, если энергия активации уплотнения выше, чем энергия активации роста зерен. В результате можно получить плотный материал с мелкой структурой, что улучшает его свойства.

2.1.3 Реакционное импульсное спекание (RFS)

Новый малозатратный метод спекания, при котором на образец подается внешний электрический ток на определенной стадии нагрева. Когда электрическое поле достигает нужного уровня, ток резко увеличивается, образец быстро нагревается, уплотняется и проявляет люминесцентные свойства. Температура, при которой ток начинает резко расти, называется критической, которая ниже, чем при обычном спекании.

Таким образом, главное преимущество RFS — очень высокая скорость реакции и низкое энергопотребление. Нагрев идет не от внешней печи, за счет тока внутри образца. Однако есть недостаток: из-за сложностей с управлением теплом структура материала может быть неравномерной.

2.1.4 Ультрабыстрое высокотемпературное спекание (UHS)

Суть технологии заключается в том, что графитовое волокно под действием электрического тока выделяет очень много тепла (тепло Джоуля). Это тепло быстро разогревает всю систему спекания до очень высоких температур – до 3000 °C.

Главные особенности данного метода заключаются в очень высокой температуре, очень быстром нагреве и охлаждении, а также в равномерном распределении температуры. Весь процесс может занимать всего около 10 секунд, что намного быстрее традиционных методов.

2.1.5 Микроволновое спекание

Метод, при котором материал нагревается микроволнами определенной длины волны. Микроволны взаимодействуют с внутренней структурой материала, из-за чего он начинает нагреваться изнутри. В электромагнитном поле материал теряет энергию и в результате нагревается до температуры спекания, что приводит к его уплотнению. Это отличается от традиционных методов, где материал нагревается снаружи за счёт конвекции, теплопроводности или излучения. В обычном нагреве тепло сначала поступает к поверхности, а затем медленно проникает внутрь, процесс занимает много времени, и получить мелкозернистую структуру трудно.

В работе [20] методом микроволнового спекания был синтезирован гетероструктурный катализатор с наночастицами ВЭО на нанол листах оксида графена. Материал продемонстрировал высокую каталитическую активность и долговечность при реакции выделения кислорода. Формирование кристаллической фазы с равномерным распределением элементов и прочным соединением с подложкой обеспечило эффективность катализатора, обусловленную саморегулируемой электронной структурой, высокой концентрацией кислородных вакансий и доступной электролиту активной поверхностью.

2.2 Метод жидкой фазы

Благодаря хорошей способности металлических катионов равномерно распределяться в жидкой фазе, методы жидкофазного синтеза позволяют получать высокочистые и высококачественные порошки высокоэнтропийных оксидов при относительно низких температурах. К жидкофазным методам относят широкий спектр технологий, включая:

- золь–гель метод (SG),
- самораспространяющийся растворный синтез / растворное горение (SC),
- распылительный пиролиз (SP),
- электроспиннинг (ES),
- гидротермальный синтез (HT),
- ко-преципитация (CP),
- ультразвуковой (сонохимический) метод (SB),
- пламенно-распылительный пиролиз (FSP),
- сольво- и гидротермальный синтез.
- Часто для улучшения свойств образцов используют не один метод, а комбинацию нескольких из перечисленных.

2.2.1 Золь–гель метод (SG)

Золь–гель метод основан на превращении жидкого коллоидного раствора (золя) в трехмерную сетчатую структуру (гель). Этот универсальный метод позволяет контролировать химический состав и структуру на наноуровне, что делает его эффективным для создания керамики, порошков и покрытий.

2.2.2 Самораспространяющийся растворный синтез / растворное горение (SC)

Самораспространяющийся метод горения (SC) стал одним из самых популярных способов получения оксидных порошков, который использует сильные тепловыделяющие реакции между металлами и неметаллами для синтеза нанокерамических материалов.

В работе [21] был получен (Mg, Co, Ni, Cu, Zn) O — это оксид с пятью элементами в равных долях, показывающий хорошие диэлектрические свойства и способности к встраиванию ионов. В данной работе было решено объединить преимущества методов золь–гель (SG) и горения (SC). Так появился новый метод — SGSC (рис. 8). Меняя параметры (температуру, время, атмосферу), можно точно контролировать форму, размер и кристаллическую структуру конечного материала. Однако у метода SGSC есть ограничение — нужно тщательно подбирать ионы металлов и комплексообразующие агенты, иначе нужные комплексы не образуются.

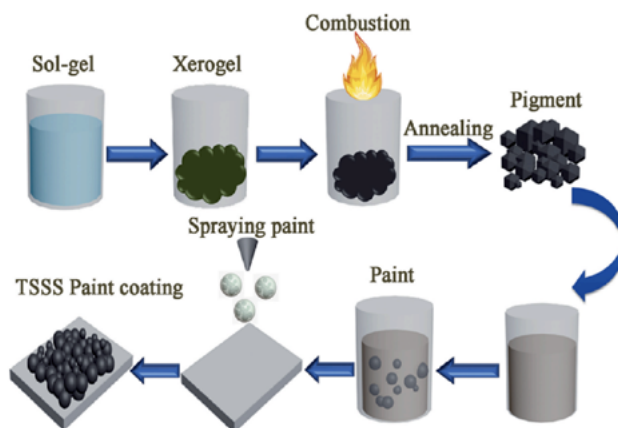


Fig. 13. Schematic diagram of SGSC preparation process [94].

Рисунок 4. Схематическое представление SGSC - метода [22].

2.2.3 Распылительный пиролиз (SP)

В зависимости от источника энергии разложения технология распылительного пиролиза подразделяется на пиролиз в пламени (Flame Spray Pyrolysis, FSP) и распылительный пиролиз с небулизацией (Nebulized Spray Pyrolysis, NSP). Распылительный пиролиз представляет собой непрерывную и высокопроизводительную технологию, не требующую сверхвысокого вакуума и позволяющую за счет быстрого охлаждения стабилизировать метастабильные фазы, а также эффективно контролировать размер, форму и химическую однородность частиц, что делает метод перспективным для промышленного применения. Пиролиз в пламени является широко используемым способом получения оксидных нанопорошков, при котором жидкие прекурсоры и кислород вводятся в зону пламени и быстро реагируют с образованием наночастиц простых, сложных и высокоэнтропийных оксидов.

2.2.4 Электроспиннинг (Electrospinning, ES)

Электроспиннинг — это особый метод, при котором из полимерного раствора получают очень тонкие волокна с помощью электрического поля. К игле с раствором и коллекторам подключают высокое напряжение. Электростатическая сила становится сильнее, чем поверхностное натяжение жидкости. Из-за этого капля на кончике иглы вытягивается: сначала она превращается в конус, а потом — в тонкую струю, струя вытягивается, становится тоньше и твердеет, превращаясь в волокно. Поэтому электроспиннинг подходит для получения волокнистых высокоэнтропийных оксидных керамик.

2.3 Метод газовой фазы

На данный момент методом газовой фазы получают в основном тонкие пленки ВЭОК. Газофазный метод подразумевает под собой метод, в котором исходные компоненты находятся в газовой или паровой форме и далее при определенных условиях (высокотемпературном плазменном разряде, термическом разложении, осаждении) формируются твердые частицы или пленки. Основные технологии — это пульс-лазерное осаждение (лазерное напыление) (PLD) и магнетронное напыление (реактивное магнетронное распыление) (MSD).

Лазерное напыление использует мощные лазеры, которые испаряют, плавят и ионизируют материал с поверхности мишени, создавая плазменное облако. Частицы из этого облака осаждаются на подложку и формируют тонкую плёнку. Такой способ подходит для получения как простых, так и сложных оксидов с ферроэлектрическими, ферромагнитными и диэлектрическими свойствами.

В методе реактивного магнетронного распыления используются химические реакции между частицами, которые выбиваются с поверхности мишени, и кислородом, который вводится для образования оксидных пленок.

В томском университете разрабатывают сплавы на основе карбидов и оксидов, которые могут применяться для защиты техники в авиации при высоких температурах (до 2000 °C). Материалы представляют

собой сплав из нескольких элементов, нанесенных методом магнетронного напыления. Были использованы оксиды гафния, циркония, церия, иттрия. Использование метода энтропийной стабилизации позволяет улучшить термические свойства керамики. В последующем этапе будут использованы карбиды гафния, циркония, церия, иттрия, так как карбиды обладают большей температурой плавления чем оксиды, но при этом легче окисляются [23].

Таблица 1. Достоинства и недостатки методов синтеза ВЭОК [24, 25, 26]

Метод синтеза	Достоинства	Недостатки	Пример	Применение
Твердофазный	-высокая химическая стабильность конечных материалов, -возможность получения крупногабаритных керамических образцов, -простота аппаратуры, -хорошая масштабируемость	-необходима высокая температура, -длительное время синтеза, -ограниченный контроль над размером частиц, возможны неоднородности, если смесь плохо перемешана.	$(\text{Zr}_{0.185}\text{Hf}_{0.185}\text{Ce}_{0.185}\text{Y}_{0.185}\text{Er}_{0.185}\text{Ti}_{0.075})\text{O}_{1.815-x}$ wt% YSZ ($x = 0, 2, 4, 6, 8$) $(\text{Co}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.2})\text{O}$	Материалы для Космических аппаратов В качестве катода в керамическом топливном элементе
Жидкофазный	-высокая гомогенность распределения катионов на стадии исходного раствора -возможность низкотемпературной подготовки исходной смеси -контроль морфологии и размера частиц, -высокая производительность и масштабируемость у аэрозольных методов -быстрая генерация пористого порошка	-органические добавки и связующие в некоторых методах требуют полного удаления -сложность поддержания постоянного химического состава при выпадении осадка -склонность к агломерации при последующей термообработке	$\text{Sr}(\text{Cr}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.2})\text{O}_3$ $(\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Yb}_{0.2}\text{Y}_{0.2})_3\text{NbO}_7$	Материалы для поглощения волн Тепловые/экологические барьерные покрытия
Газофазный	-Высокая чистота и плотность пленок / покрытий -Газообразные прекурсоры могут «обтекать» поверхности, обеспечивая равномерное покрытие -Универсальность материалов и широкий диапазон применимости. -Хорошая адгезия покрытия к подложке и высокая надёжность -Возможность тонкого контроля свойств: стехиометрии, структуры, толщины, морфологии.	-Высокая температура процесса и ограничения на подложки. -Зависимость от свойств прекурсоров — летучих, часто токсичных и агрессивных газов. -Сложность контроля над многокомпонентными системами. -Не очень высокая скорость осаждения - низкая производительность. -Высокая стоимость оборудования и эксплуатационных расходов.	$(\text{Al Co Cr Fe Mn Ni})\text{O}$	Керамические конденсаторы

Применение

Высокоэнтропийные оксиды (ВЭО) — это керамические материалы, в которых на одну катионную подрешетку вводят пять и более различных ионов в близких мольных долях, что обеспечивает высокую конфигурационную энтропию и образование единой термодинамически стабильной фазы. Их уникальные свойства — повышенная фазовая стабильность при высоких температурах, локальные искажения решётки, решетчатая дезординация и замедленная диффузия атомов — делают ВЭО привлекательными для различных приложений (таблица 2). Многообразие катионов позволяет «тонко настраивать» электро-

химические, каталитические, тепловые и механические характеристики, недостижимые в бинарных или трехкомпонентных оксидах [27].

ВЭОК демонстрируют значительный потенциал применения благодаря высокой термохимической и механической стабильности, устойчивости к коррозии и износу, а также возможности тонкой настройки свойств через состав. В энергетике и электрохимии их используют для электродов и мембран в аккумуляторах и суперконденсаторах, а также как перспективные термоэлектрические, диэлектрические материалы и материалы для тепловых и атмосферных барьеров в авиакосмической технике (рис. 9).



Рисунок 5. Практическое применение ВЭОК

Однако вместе с перспективами связаны и научно-технические проблемы, а именно: контролируемое получение однородных фаз в промышленных масштабах, понимание роли локальной химической неоднородности в рабочих механизмах (например, каталитических или ионных), трудность прогнозирования свойств: из-за большого количества элементов поведение материала сложно смоделировать, а также долгосрочная стабильность в рабочих условиях остаются предметом активных исследований. Эти вопросы требуют сочетания экспериментальной оптимизации синтеза, продвинутого структурного, химического анализа и вычислительного моделирования, квантово-химических расчетов и машинного обучения.

В работе [28] представлен алгоритм, который позволяет прогнозировать структурную и термодинамическую стабильности ВЭО с перовскитоподобной структурой. Для обеспечения стабильности используются специальные расчеты с заданным допуском и октаэдрическими факторами. Этот метод может быть расширен для прогнозирования стабильности различных высокоэнтропийных материалов. В данном исследовании, с помощью нового алгоритмического подхода, ставится цель восполнить пробел в данных по соединениям с высокой энтропией и минимизировать необходимость эмпирического отбора комбинаций металлов.

В силу своих свойств: пониженная теплопроводность, высокая фазовая стабильность, устойчивость к спеканию при длительном нагреве, устойчивость к коррозии и окислению ВЭОК чаще рассматривают в качестве термобарьерных, теплоизоляционных покрытий, защитные и износостойкие покрытия

В работе [29] был синтезирован высокоэнтропийный порошок цирконата $(\text{La}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Y}_{0.2}\text{Yb}_{0.2}\text{Lu}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ методом плазменного напыления из раствора-прекурсора без давления, который обладает высокой сферичностью и равномерным распределением состава. Данный материал предполагается использовать в качестве термобарьерных покрытий, используемые для защиты высокотемпературных компонентов газовых турбин и которые должны обладать низкой теплопроводностью, устойчивостью к спеканию и высокотемпературной стабильностью. Фазовые структуры, термические и механические свойства образцов исследовались с использованием различных методов. Результаты показали, что исследуемый материал имеет дефектную двухфазную структуру флюорита-пирохлора и обладает низкой теплопроводностью около $1,09 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ при 1400°C , скорость роста зерна $3,6 \times 10^{-4} \text{ мкм/ч}$, а также демонстрирует превосходными механическими свойствами, включая высокую твердость ($10,03 \pm 0,32 \text{ ГПа}$) и трещиностойкость ($1,04 \pm 0,17 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$).

Таблица 2. Виды, методы синтеза и применение ВЭОК

Образец	Кристаллическая структура	Методы синтеза	Применение	Ссылка
$(Y_{0.2}Yb_{0.2}Lu_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2})_3Al_5O_{12}$ Y_2O_3 , Yb_2O_3 , Lu_2O_3 , Eu_2O_3 и Er_2O_3	Редкоземельный алюминат	Атмосферное плазменное напыление	Теплобарьерные покрытия	[30]
$Sr(Cr_{0.2}Mn_{0.2}Fe_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2})O_3$	Перовскит	Мокрохимический метод	Материалы для поглощения волны	[31]
$(Zr_{0.185}Hf_{0.185}Ce_{0.185}Y_{0.185}Er_{0.185}Ti_{0.075})O_{1.815-x}$ wt% YSZ (x = 0, 2, 4, 6, 8)	Флюорит	Метод твердофазного синтеза	Материалы для космических аппаратов	[32]
$La(Co_{0.2}Al_{0.2}Fe_{0.2}Mn_{0.2}Cu_{0.2})O_3$	Перовскит	Капельно-кальцинационный метод	Активатор для очистки воды	[33]
$(Co_{0.2}Cu_{0.2}Ni_{0.2}Mg_{0.2}Zn_{0.2})O$	Каменная соль	Твердофазный механохимический синтез	В качестве катода в керамическом топливном элементе	[34]
$Ba_{0.2}Na_{0.2}Bi_{0.2}Sr_{0.2}Ca_{0.2}Nb_{0.08}Ti_{0.9}O_3$ $[(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}]_{0.98}La_{0.02}TiO_3$	Перовскит	Метод цитратного горения	Материал для высокоомощных конденсаторов	[35]
$(Ba_{0.2}Bi_{0.2}K_{0.2}Ln_{0.2}Na_{0.2})TiO_3$	Перовскит		Диэлектрические накопители энергии	[36]
$(HfNbTaTiZr)O_x$	Флюорит	Импульсное лазерное осаждение	Широкий спектр применения	[37]
$(Bi_{0.2}Na_{0.2}Ba_{0.2}Sr_{0.2}Ca_{0.2})TiO_3$ (BNBSCT)	Перовскит	Метод ленточного литья	Керамические конденсаторы	[38]
$(AlCoCrFeMnNi)O$	Каменная соль	Метод импульсного лазерного облучения	Керамические конденсаторы	[39]
$(Nd_{0.2}Sm_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Y_{0.2})NbO_7$	Пироклор	Золь-гель метод и технология высокотемпературного спекания	Тепловые/экологические барьерные покрытия	[40]
$(Y_{0.2}La_{0.2}Gd_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2})_2O_3$	Биксбиит	Термобарическое прессование нанопорошков	Оптическое приложение	[41]
$(Lu_{0.2}Y_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Er_{0.2})_2O_3$	Биксбиит	Вакуумное спекание	Оптическое приложение	[42]
$La_2[(TiZrSnHfGe)_{(1-2x)/5}(NbGa)_x]2O_7$ (x = 0.129, 0.143, 0.157, 0.171)	Пироклор	Метод твердофазного синтеза	Материал с диэлектрическими свойствами	[43]
$(R_{0.2}Gd_{0.2}Eu_{0.2}Dy_{0.2}Tb_{0.2})CrO_3$, R = Pr, Nd and Sm	Перовскит	Метод твердофазного синтеза	Низкотемпературный магнитный охлаждающий материал	[17]
$(Zr_{0.2}Ti_{0.2}Ce_{0.2}Mn_{0.2}M_{0.2})O_{2-\delta}$ (M = Mg/Ca)	Флюорит	Спекание при точном контроле температуры	Топливные элементы, катализаторы с дефицитом кислорода и катализаторы, основанные на окислительно-восстановительных, реакция	[44]

$(\text{Al}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Cr}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Zn}_{0.2})_3\text{O}_4$	Шпинель	Метод твердофазного синтеза	обратимых магнитоактивных композитов, таких как магнитореологические эластомеры	[45]
$\text{ZrHfCeYEr}_{(1-x)/5}\text{Ti}_x\text{O}_{2.5}$	Флюорит	Метод твердофазного синтеза	Материалы для космических аппаратов.	[46]

В работе [24] с помощью твердофазной реакции был синтезирован неизотропный высокоэнтропийный титанат $(\text{La}_{0.3}\text{K}_{0.1}\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.2})\text{TiO}_{3+\delta}$ – материала для теплозащитного покрытия. В результате проведенных работ исследуемый материал продемонстрировал высокий коэффициент теплового расширения, равный $12,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а также выраженные теплоизоляционные свойства с низкой теплопроводностью $1,46 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ при 1200°C , значительную упругую анизотропию и более высокую стойкость к расширению микротрещин по сравнению с однокомпонентным аналогом, хорошие механические свойства с твердостью по Виккерсу $11,5 \text{ ГПа}$.

В работе [47] был синтезирован алюминат редкоземельного элемента $(\text{La}_{0.25}\text{Sm}_{0.25}\text{Gd}_{0.25}\text{Ho}_{0.25})\text{AlO}_3$ методом энтропийно-управляемого дизайна, который перспективен для использования в теплозащитных покрытиях благодаря высокой термической стабильности и низкой теплопроводности. Были проведены работы по исследованию фазового состава, механических и термических свойств, результаты которых показывают, что материал обладает повышенной пластичностью с модулем сдвига $114,63 \text{ ГПа}$ и пониженной теплопроводностью $4,11 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ при комнатной температуре и коэффициент теплового расширения $10,10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ от 25°C до 1300°C .

Заключение

Высокоэнтропийные оксидные керамики сформировались как самостоятельный и быстро развивающийся вид материалов, который благодаря сочетанию многокомпонентного химического состава вызывает большой интерес. Проведенный анализ литературы показывает, что принцип высокой конфигурационной энтропии позволяет расширить традиционные границы проектирования оксидных керамик, обеспечивая достижение фазовой стабильности, термической устойчивости и функциональной настраиваемости, что недоступно для двойных и тройных систем.

Современные исследования подтверждают перспективность ВЭОК в широком спектре применений — от конструкционных и термобарьерных материалов до функциональных, каталитических и энергетических систем. При этом особый интерес представляют направления, связанные с эксплуатацией материалов в экстремальных условиях — при высоких температурах, в агрессивных средах, под действием тепловых ударов и радиационного облучения. Так, высокоэнтропийные флюоритные и пироксеновые оксиды на основе систем $(\text{La-Nd-Sm-Gd-Dy})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ демонстрируют повышенную фазовую стабильность и пониженную теплопроводность, что делает их перспективными для применения в качестве термобарьерных покрытий в газотурбинных установках [6,48]. Кроме того, высокоэнтропийные оксиды с регулируемой концентрацией кислородных вакансий проявляют устойчивость к окислительно-восстановительным циклам и могут использоваться в электрохимических устройствах, работающих при повышенных температурах, включая твердооксидные топливные элементы и кислородные мембраны [49].

За счёт варьирования элементного состава и концентрации компонентов появляется возможность управления структурными и электрохимическими свойствами, что является одновременно и преимуществом, и задачей, требующей дальнейшего изучения. Также следует отметить, что большинство продемонстрированных преимуществ ВЭОК в настоящее время подтверждено преимущественно в лабораторных условиях, тогда как вопросы масштабируемости, воспроизводимости и долгосрочной стабильности свойств остаются предметом активных исследований. В этой связи дальнейшее развитие исследований в области высокоэнтропийных оксидных керамик предполагает детальное рассмотрение вопросов мас-

штабирования методов синтеза, воспроизводимости фазового состава и технологической реализуемости данных материалов, что является важным этапом на пути их перехода от фундаментальных исследований к практическому применению.

В перспективе дальнейший прогресс в области ВЭОК будет во многом определяться развитием теоретических моделей, высокопроизводительных методов синтеза и характеристики, а также интеграцией вычислительного материаловедения и машинного обучения для рационального подбора составов. Систематические исследования долговременной стабильности и поведения ВЭОК в реальных условиях эксплуатации являются необходимым шагом на пути перехода от фундаментальных исследований к инженерным и промышленным применениям.

Благодарности

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (No. BR28713281)

Вклад авторов

Жуматаева И.З. выполнила все этапы подготовки статьи, включая поиск и анализ литературы, интерпретацию данных, написание и редактирование рукописи.

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

В процессе подготовки данной работы автор(ы) использовали Chat GPT для создания изображений. После использования этого инструмента/сервиса автор(ы) проверил(и) и отредактировали содержание по мере необходимости и несут полную ответственность за содержание опубликованной статьи.

Список литературы

1. Взято с электронного ресурса, который доступен по адресу: <https://www.webofscience.com/> (дата обращения: 11.05.2026 г.)
2. Du G. et al., *Research progress on high entropy oxide ceramics: Principles, preparation, and properties*, Journal of Materials Research and Technology №25, p.265-288 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.015>
3. Albedwawi S. H. et al., *High entropy oxides-exploring a paradigm of promising catalysts: A review*, Materials & Design №202, p.109534(2021). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109534>
4. Ma Y. et al., *Physicochemical Properties of High-entropy Oxides*, The Chemical Record №23 p. e202200195 (2023). https://doi.org/10.1002/tcr.202200195?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
5. Li Y. et al., *Recent Advances in High-entropy ceramics: Design Principles, Structural Characteristics, and Emerging Properties*, Extreme Materials №2, p. 42-72(2025). <https://doi.org/10.1016/j.exm.2025.05.002>
6. Rost C. M. et al., *Entropy-stabilized oxides*, Nature communications №6, p.8485(2015).https://doi.org/10.1038/ncomms9485?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
7. Zhang J. et al., *Long-range antiferromagnetic order in a rocksalt high entropy oxide*, Chemistry of Materials №31, p. 3705-3711(2019).<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00624>
8. Oses C., Toher C., Curtarolo S., *High-entropy ceramics*, Nature Reviews Materials №5, p. 295-309(2020). https://doi.org/10.1038/s41578-019-0170-8?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
9. Wen Z. et al., *Preparation and characterization of high-entropy fluorite oxides (Ce0.16Zr0.16La0.16Sm0.16Nd0.16Y0.16) O2-δ with high mechanical properties*, Materials Today Communications №41, p. 110638(2024). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110638>
10. Dawa T., Sajjadi B., *Exploring the potential of perovskite structures for chemical looping technology: A state-of-the-art review*, Fuel Processing Technology №253, p.108022(2024). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.108022>
11. He F. et al., *Conformal high-entropy oxide coatings enable fast and durable surface oxygen reactions*, Joule

№9, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.101957>

12. Mao A. et al., *Facile synthesis and ferrimagnetic property of spinel (CoCrFeMnNi) 3O4 high-entropy oxide nanocrystalline powder*, Journal of Molecular Structure №1194, p. 11-18(019). <https://doi.org/10.1016/j.mol-struct.2019.05.073>

13. Teng Z., Tan Y., Zhang H., *High-entropy pyrochlore A2B2O7 with both heavy and light rare-earth elements at the A site*, Materials №15, p.129(2021). <https://doi.org/10.3390/ma15010129>

14. Teng Z. et al., *Preparation and phase evolution of high-entropy oxides A2B2O7 with multiple elements at A and B sites*, Journal of the European Ceramic Society №41, p. 3614-3520(2021). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.01.013>

15. Weber D. A. et al., *Physical properties and lattice dynamics of bixbyite-type V2O3*, Journal of Materials Research №32, p.2397-2404(2017). https://doi.org/10.1557/jmr.2017.144?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

16. Xiao Y. et al., *High-entropy (YxEr1-x) 2 (Ti0. 2Zr0. 2Hf0. 2Ge0. 2Sn0. 2) 2O7 oxide: A promising thermal barrier coating material with potential fluorescent Nondestructive Function*, Materials Science and Engineering: B №316, P.118145(2025). <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118145>

17. Zheng Z. et al., *Magnetic properties and magnetocaloric effect of chromium-based high-entropy perovskite oxides*, Journal of Alloys and Compounds №1010, p. 177632(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163418>

18. Ran B. et al., *High-entropy oxides for rechargeable batteries*, Advanced Science №11, p. 2401034(2024). https://doi.org/10.1002/advs.202401034?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

19. Zhou Y. Y. et al., *Fabrication, mechanical properties, and oxidation resistance of the novel Al-doped high-entropy carbonitride ceramic (Ti, Ta, Nb, Zr, V)(C, N)*, Ceramics International (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.10.041>

20. Asim M. et al., *Microwave synthesis of rock-salt type high entropy oxides immobilized on graphene oxide nanosheets as an efficient catalyst for oxygen evolution reaction*, Journal of Environmental Chemical Engineering, p.118758(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118758>

21. Sushil J. et al., *High entropy phase evolution and fine structure of five component oxide (Mg, Co, Ni, Cu, Zn) O by citrate gel method*, Materials Chemistry and Physics №259, p. 124014(2021). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124014>

22. Ma P. et al., *Spectrally selective Cu 1.5 Mn 1.5 O 4 spinel ceramic pigments for solar thermal applications*, RSC Advances №6, p. 32947-32955(2016). <https://doi.org/10.1039/C6RA03300H>

23. Ученые ТПУ разрабатывают высокоэнтропийные керамические покрытия для авиации. Взято с электронного ресурса, который доступен по адресу <https://news.tpu.ru/news/ucenye-tpu-razrabatyvaut-vysokoentropijnye-keramiceskie-pokrytia-dla-aviacii/> (дата обращения: 11.05.2026 г.)

24. Wang W. et al., *High-entropy oxide ceramics as structural and barrier-coating materials*, Review of Materials Research, p. 100067(2025). <https://doi.org/10.1016/j.revmat.2025.100067>

25. Jiao Y. et al., *Overview of high-entropy oxide ceramics*, Materials Today №77, p. 92-117(2024). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.06.005>

26. Anandkumar M., Trofimov E., *Synthesis, properties, and applications of high-entropy oxide ceramics: Current progress and future perspectives*, Journal of Alloys and Compounds №960, p. 170690(2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170690>

27. Sarkar A. et al., *High-entropy oxides: fundamental aspects and electrochemical properties*, Advanced materials №31 p. 1806236(2019). <https://doi.org/10.1039/D3CS00557G>

28. Shishkin R., Shishkin A., *Computational screening of structurally and thermodynamically stable high-entropy oxides with a perovskite structure*, Journal of the American Ceramic Society №108, P. e20522(2-25). <https://doi.org/10.1111/jace.20522>

29. Li Z. et al., *High-entropy (La0. 2Nd0. 2Y0. 2Yb0. 2Lu0. 2) 2Zr2O7 ceramic: A novel dual-phase high-entropy ceramic*, Journal of the European Ceramic Society №45, p. 117361(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117361>

30. Wang K. et al., *Air plasma-sprayed high-entropy (Y_{0.2}Yb_{0.2}Lu_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2}) 3Al₅O₁₂ coating with high thermal protection performance*, Journal of Advanced Ceramics №11, p. 1571-1582(2022). <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0630-2>
31. Li M. et al., *Sr (Cr_{0.2}Mn_{0.2}Fe_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2}) O₃: a novel high-entropy perovskite oxide with enhanced electromagnetic wave absorption properties*, Journal of Materiomics №10, p. 1176-1185(2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2023.11.019>
32. Hao R. et al., *YSZ fiber-reinforced high-entropy fluorite oxide ceramic composites with improved mechanical properties and thermal shock resistance*, Ceramics International, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.430>
33. Han B. et al., *High-entropy perovskite oxide washcoated porous alumina ceramic as a superb catalyst for activating peroxymonosulfate to eliminate refractory organic pollutants*, Chemical Engineering Journal №455, p. 140828(2023). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140828>
34. Khalid M. et al., *Designing high-entropy oxide cathodes for improved oxygen reduction reaction in ceramic fuel cells*, Journal of Power Sources №656, p. 238024(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238024>
35. Xu Z., Chen Y., Cheng N., *High energy storage properties in high-entropy ceramics with sandwich structure*, Ceramics International, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.260>
36. He Q. et al., *Synthesis and electrical properties of (Ba_{0.2}Bi_{0.2}K_{0.2}Ln_{0.2}Na_{0.2}) TiO₃ high-entropy perovskite oxides*, Ceramics International, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.03.029>
37. Purnomo M. J. et al., *High entropy oxide thin films of (HfNbTaTiZr) O_x by pulsed laser deposition*, Surface and Coatings Technology №505, p. 132129(2025). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132129>
38. Li H. et al., *Excellent energy storage performance of La₂O₃-modified high-entropy ceramics under moderate electric fields*, Journal of the European Ceramic Society, p. 117785(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117785>
39. Chiu I. C. et al., *Advanced high entropy oxides for seawater splitting*, Sustainable Materials and Technologies, p. e01515(2025). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01515>
40. Chen X. et al., *Thermophysical and Mechanical performances of (Nd_{0.2}Sm_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Y_{0.2}) 3TaO₇ and (Nd_{0.2}Sm_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Y_{0.2}) 3Ta_{0.5}Nb_{0.5}O₇ High-Entropy Compounds*, Journal of Alloys and Compounds, p. 183097(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183097>
41. Kiryakov A. N. et al., *High-entropy oxide optical nanoceramics prepared by thermobaric synthesis*, Journal of the European Ceramic Society №45, p. 117316(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117316>
42. Liu H. L. et al., *Fabrication and luminescent properties of highly transparent novel high-entropy (Lu_{0.2}Y_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Er_{0.2}) 2O₃ ceramic*, Journal of Materials Science & Technology №223, p. 123-130(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.10.033>
43. Zhou Z. X. et al., *Tuning the oxygen vacancy concentration in n-type TiO₂ group oxides through Nb⁵⁺/Ga³⁺ for high-dielectric La₂(TiZrSnHfGe) 2O₇ high-entropy oxides*, Rare Metals №44, p. 4936-4946(2025). https://doi.org/10.1007/s12598-025-03356-1?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
44. Fang S. et al., *Synthesis of High-Entropy Fluorite Oxides (Zr_{0.2}Ti_{0.2}Ce_{0.2}Mn_{0.2}Mo_{0.2}) O_{2-δ} (M= Mg/Ca) with Multivalent Cations via Solution Combustion Method*, Ceramics International, (2025) <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.09.282>
45. Sabadková T. et al., *Preparation and Characterization of Magnetic HEO with the Composition (Al 0.2 Co 0.2 Cr 0.2 Ni 0.2 Fe 0.2 X 0.2) 3 O 4; X= Mg, Zn*, 2025 15th International Conference on Measurement, p.159-162(2025). <https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT66999.2025.11078712>
46. Ren B. et al., *Ti⁴⁺ doped high-entropy fluorite oxide ceramics ((ZrHfCeYEr)(1-x)/5Tix) O_{2-δ}: Thermal, mechanical and cyclic thermal shock resistance properties studies*, Journal of the European Ceramic Society №44, p. 116733(2024). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116733>
47. Liu B. et al., *(La_{0.25}Sm_{0.25}Gd_{0.25}Ho_{0.25}) AlO₃: High-entropy perovskite with harmonizing mechanical-thermal properties for TBCs*, Journal of the American Ceramic Society №108, p. e70112(2025). https://doi.org/10.1111/jace.70112?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
48. Sarkar A. et al., *High entropy oxides for reversible energy storage*, Nature communications №.9, p. 3400(2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05774-5>

49. Djenadic R. et al., *Multicomponent equiatomic rare earth oxides*, Materials Research Letters №5, p. 102-109(2017). <https://doi.org/10.1080/21663831.2016.1220433>

Жуматаева И.З.*

*Қатты дене физикасы зертханасы, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы
жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
(E-mail: inesh.zhumatayeva@gmail.com)*

**Жоғары энтропиялы оксидті керамикалар:
құрылымы, синтез әдістері және қолданылу салалары**

Аңдатпа. Жоғары энтропиялы материалдар бес немесе одан да көп компоненттерді араластыру арқылы алынатын көпэлементті материалдардың жаңа класы болып табылады. Айқын жоғары энтропиялық әсерлердің арқасында бұл материалдар бірегей физика-химиялық қасиеттерге ие. Соңғы жылдары жоғары энтропиялы материалдарға деген қызығушылықтың тұрақты өсуі байқалады, бұл жоғары энтропиялы қорытпаларға, керамикаларға және оксидтерге арналған ғылыми жарияланымдар санының артуымен дәлелденеді.

Бұл шолу мақаласында жоғары энтропиялы оксидті керамикалар туралы заманауи түсініктер жүйеленген, кристалдық құрылымдардың негізгі типтері — тас тұзы, флюорит, перовскит, пироклор, шпинель және т.б. — қарастырылған, сондай-ақ жоғары энтропиялы оксидті керамикаларды синтездеу принциптері мен оларды қолдану тәсілдері талданған. Жоғары конфигурациялық энтропияның бірфазалы күйлерді тұрақтандырудағы рөлі, химиялық күрделіліктің кристалдық тордың бұрмалануына, диффузиялық процестерге және «коктейль эффектiсi» деп аталатын құбылыстың қалыптасуына әсері көрсетілген.

Жұмыста жоғары энтропиялы оксидті керамикаларды синтездеудің негізгі әдістері — қатты фазалы, сұйық фазалы және газ фазалы әдістер — және олардың материалдардың фазалық құрамына, микроқұрылымына және қасиеттеріне әсері сипатталған. Шолу жоғары энтропиялы оксидтердің (ЖЭО) механикалық, термодинамикалық, каталитикалық және электр энергетикалық сипаттамаларына арналған заманауи зерттеулерді, сондай-ақ олардың конструкциялық материалдар мен жабындардағы қолданылуын қамтиды. Жоғары энтропиялы оксидті керамикалардың перспективалы қолданылу салалары ретінде жылуға төзімді қорғаныш жабындары, каталитикалық жүйелер, электр және ион өткізгіш материалдар, сондай-ақ экстремалды жағдайларда пайдалану мүмкіндіктері қарастырылған.

Жүргізілген талдау жоғары энтропиялы оксидтердің құрылымы, синтез әдістері мен қасиеттері арасындағы өзара байланыстарды анықтауға мүмкіндік береді, бұл берілген сипаттамалары бар жаңа материалдарды әзірлеуге негіз қалайды.

Түйін сөздер: жоғары энтропиялы оксидті керамикалар, конфигурациялық энтропия, синтез әдістері, кристалдық құрылым, функционалдық қасиеттер, жылутөзімді қорғаныш жабындары.

I.Z. Zhumatayeva*

*Laboratory of Solid State Physics, Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic
of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan
(E-mail: inesh.zhumatayeva@gmail.com)*

High-Entropy Oxide Ceramics: Structure, Synthesis Methods, and Applications

Abstract. High-entropy materials represent a new class of multicomponent materials formed by mixing five or more elements. Owing to pronounced high-entropy effects, these materials exhibit unique physicochemical properties. In recent years, there has been a steady increase in interest in high-entropy materials, as evidenced by the growing number of scientific publications devoted to high-entropy alloys, ceramics, and oxides.

This review systematizes current knowledge on high-entropy oxide ceramics, presents data aimed at understanding the main types of crystal structures—rock salt, fluorite, perovskite, pyrochlore, spinel, and others—and discusses the principles of synthesis and application of high-entropy oxide ceramics. The role of high configurational entropy in stabilizing single-phase states, as well as the influence of chemical complexity on lattice distortion, diffusion processes, and the formation of the so-called “cocktail effect,” is demonstrated.

The paper outlines the main synthesis methods for high-entropy oxide ceramics, including solid-state, liquid-phase, and gas-phase techniques, and analyzes their effects on phase composition, microstructure, and material properties. The review covers recent studies on the mechanical, thermodynamic, catalytic, and electrochemical characteristics of high-entropy oxides (HEOs), as well as their applications in structural materials and coatings. Promising application areas of high-entropy oxide ceramics are discussed, including thermal barrier coatings, catalytic systems, electrical and ionic conductors, and materials designed for operation under extreme conditions.

The performed analysis reveals correlations between structure, synthesis methods, and properties of high-entropy oxides, providing a foundation for the development of new materials with tailored characteristics.

Keywords: high-entropy oxide ceramics, configurational entropy, synthesis methods, crystal structure, functional properties, thermal barrier coatings

References

1. Taken from an electronic resource, available at: <https://www.webofscience.com/> (accessed 11.05.2026)
2. Du G. et al., *Research progress on high entropy oxide ceramics: Principles, preparation, and properties*, Journal of Materials Research and Technology №25, p.265-288 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.015>
3. Albedwawi S. H. et al., *High entropy oxides-exploring a paradigm of promising catalysts: A review*, Materials & Design №202, p.109534(2021). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109534>
4. Ma Y. et al., *Physicochemical Properties of High-entropy Oxides*, The Chemical Record №23 p. e202200195 (2023). https://doi.org/10.1002/tcr.202200195?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
5. Li Y. et al., *Recent Advances in High-entropy ceramics: Design Principles, Structural Characteristics, and Emerging Properties*, Extreme Materials №2, p. 42-72(2025). <https://doi.org/10.1016/j.exm.2025.05.002>
6. Rost C. M. et al., *Entropy-stabilized oxides*, Nature communications №6, p.8485(2015).https://doi.org/10.1038/ncomms9485?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
7. Zhang J. et al., *Long-range antiferromagnetic order in a rock salt high entropy oxide*, Chemistry of Materials №31, p. 3705-3711(2019).<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00624>
8. Oses C., Toher C., Curtarolo S., *High-entropy ceramics*, Nature Reviews Materials №5, p. 295-309(2020). https://doi.org/10.1038/s41578-019-0170-8?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
9. Wen Z. et al., *Preparation and characterization of high-entropy fluorite oxides (Ce_{0.16}Zr_{0.16}La_{0.16}Sm_{0.16}Nd_{0.16}Y_{0.16}) O_{2-δ} with high mechanical properties*, Materials Today Communications №41, p. 110638(2024). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110638>
10. Dawa T., Sajjadi B., *Exploring the potential of perovskite structures for chemical looping technology: A state-of-the-art review*, Fuel Processing Technology №253, p.108022(2024). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.108022>
11. He F. et al., *Conformal high-entropy oxide coatings enable fast and durable surface oxygen reactions*, Joule №9, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.101957>
12. Mao A. et al., *Facile synthesis and ferrimagnetic property of spinel (CoCrFeMnNi)₃₀₄ high-entropy oxide nanocrystalline powder*, Journal of Molecular Structure №1194, p. 11-18(019). <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.05.073>

13. Teng Z., Tan Y., Zhang H., *High-entropy pyrochlore A₂B₂O₇ with both heavy and light rare-earth elements at the A site*, Materials №15, p.129(2021). <https://doi.org/10.3390/ma15010129>
14. Teng Z. et al., *Preparation and phase evolution of high-entropy oxides A₂B₂O₇ with multiple elements at A and B sites*, Journal of the European Ceramic Society №41, p. 3614-3520(2021). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.01.013>
15. Weber D. A. et al., *Physical properties and lattice dynamics of bixbyite-type V₂O₃*, Journal of Materials Research №32, p.2397-2404(2017). https://doi.org/10.1557/jmr.2017.144?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
16. Xiao Y. et al., *High-entropy (YxEr1-x) 2 (Ti0. 2Zr0. 2Hf0. 2Ge0. 2Sn0. 2) 2O7 oxide: A promising thermal barrier coating material with potential fluorescent Nondestructive Function*, Materials Science and Engineering: B №316, P.118145(2025). <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118145>
17. Zheng Z. et al., *Magnetic properties and magnetocaloric effect of chromium-based high-entropy perovskite oxides*, Journal of Alloys and Compounds №1010, p. 177632(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163418>
18. Ran B. et al., *High-entropy oxides for rechargeable batteries*, Advanced Science №11, p. 2401034(2024). https://doi.org/10.1002/advs.202401034?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
19. Zhou Y. Y. et al., *Fabrication, mechanical properties, and oxidation resistance of the novel Al-doped high-entropy carbonitride ceramic (Ti, Ta, Nb, Zr, V)(C, N)*, Ceramics International (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.10.041>
20. Asim M. et al., *Microwave synthesis of rock-salt type high entropy oxides immobilized on graphene oxide nanosheets as an efficient catalyst for oxygen evolution reaction*, Journal of Environmental Chemical Engineering, p.118758(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118758>
21. Sushil J. et al., *High entropy phase evolution and fine structure of five component oxide (Mg, Co, Ni, Cu, Zn) O by citrate gel method*, Materials Chemistry and Physics №259, p. 124014(2021). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124014>
22. Ma P. et al., *Spectrally selective Cu 1.5 Mn 1.5 O 4 spinel ceramic pigments for solar thermal applications*, RSC Advances №6, p. 32947-32955(2016). <https://doi.org/10.1039/C6RA03300H>
23. *Uchenye TPU razrabatyvayut vysokoentropijnye keramicheskie pokrytiya dlya aviatsii [TPU scientists are developing high-entropy ceramic coatings for aviation]*. Taken from an electronic resource, available at:<https://news.tpu.ru/news/uchenye-tpu-razrabatyvayut-vysokoentropijnye-keramicheskie-pokrytia-dla-aviatsii/> (accessed 11.05.206)
24. Wang W. et al., *High-entropy oxide ceramics as structural and barrier-coating materials*, Review of Materials Research, p. 100067(2025). <https://doi.org/10.1016/j.revmat.2025.100067>
25. Jiao Y. et al., *Overview of high-entropy oxide ceramics*, Materials Today №77, p. 92-117(2024). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.06.005>
26. Anandkumar M., Trofimov E., *Synthesis, properties, and applications of high-entropy oxide ceramics: Current progress and future perspectives*, Journal of Alloys and Compounds №960, p. 170690(2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170690>
27. Sarkar A. et al., *High-entropy oxides: fundamental aspects and electrochemical properties*, Advanced materials №31 p. 1806236(2019). <https://doi.org/10.1039/D3CS00557G>
28. Shishkin R., Shishkin A., *Computational screening of structurally and thermodynamically stable high-entropy oxides with a perovskite structure*, Journal of the American Ceramic Society №108, P. e20522(2-25). <https://doi.org/10.1111/jace.20522>
29. Li Z. et al., *High-entropy (La0. 2Nd0. 2Y0. 2Yb0. 2Lu0. 2) 2Zr2O7 ceramic: A novel dual-phase high-entropy ceramic*, Journal of the European Ceramic Society №45, p. 117361(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117361>
30. Wang K. et al., *Air plasma-sprayed high-entropy (Y0. 2Yb0. 2Lu0. 2Eu0. 2Er0. 2) 3Al5O12 coating with high thermal protection performance*, Journal of Advanced Ceramics №11, p. 1571-1582(2022). <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0630-2>

31. Li M. et al., *Sr (Cr_{0.2}Mn_{0.2}Fe_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2}) O₃: a novel high-entropy perovskite oxide with enhanced electromagnetic wave absorption properties*, Journal of Materiomics №10, p. 1176-1185(2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2023.11.019>
32. Hao R. et al., *YSZ fiber-reinforced high-entropy fluorite oxide ceramic composites with improved mechanical properties and thermal shock resistance*, Ceramics International, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.430>
33. Han B. et al., *High-entropy perovskite oxide washcoated porous alumina ceramic as a superb catalyst for activating peroxymonosulfate to eliminate refractory organic pollutants*, Chemical Engineering Journal №455, p. 140828(2023). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140828>
34. Khalid M. et al., *Designing high-entropy oxide cathodes for improved oxygen reduction reaction in ceramic fuel cells*, Journal of Power Sources №656, p. 238024(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238024>
35. Xu Z., Chen Y., Cheng N., *High energy storage properties in high-entropy ceramics with sandwich structure*, Ceramics International, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.260>
36. He Q. et al., *Synthesis and electrical properties of (Ba_{0.2}Bi_{0.2}K_{0.2}Ln_{0.2}Na_{0.2}) TiO₃ high-entropy perovskite oxides*, Ceramics International, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.03.029>
37. Purnomo M. J. et al., *High entropy oxide thin films of (HfNbTaTiZr) O_x by pulsed laser deposition*, Surface and Coatings Technology №505, p. 132129(2025). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132129>
38. Li H. et al., *Excellent energy storage performance of La₂O₃-modified high-entropy ceramics under moderate electric fields*, Journal of the European Ceramic Society, p. 117785(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117785>
39. Chiu I. C. et al., *Advanced high entropy oxides for seawater splitting*, Sustainable Materials and Technologies, p. e01515(2025). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01515>
40. Chen X. et al., *Thermophysical and Mechanical performances of (Nd_{0.2}Sm_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Y_{0.2}) 3TaO₇ and (Nd_{0.2}Sm_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Y_{0.2}) 3Ta_{0.5}Nb_{0.5}O₇ High-Entropy Compounds*, Journal of Alloys and Compounds, p. 183097(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183097>
41. Kiryakov A. N. et al., *High-entropy oxide optical nanoceramics prepared by thermobaric synthesis*, Journal of the European Ceramic Society №45, p. 117316(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117316>
42. Liu H. L. et al., *Fabrication and luminescent properties of highly transparent novel high-entropy (Lu_{0.2}Y_{0.2}Gd_{0.2}Yb_{0.2}Er_{0.2}) 2O₃ ceramic*, Journal of Materials Science & Technology №223, p. 123-130(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.10.033>
43. Zhou Z. X. et al., *Tuning the oxygen vacancy concentration in n-type TiO₂ group oxides through Nb⁵⁺/Ga³⁺ for high-dielectric La₂(TiZrSnHfGe) 2O₇ high-entropy oxides*, Rare Metals №44, p. 4936-4946(2025). https://doi.org/10.1007/s12598-025-03356-1?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
44. Fang S. et al., *Synthesis of High-Entropy Fluorite Oxides (Zr_{0.2}Ti_{0.2}Ce_{0.2}Mn_{0.2}Mo_{0.2}) O_{2-δ} (M = Mg/Ca) with Multivalent Cations via Solution Combustion Method*, Ceramics International, (2025) <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.09.282>
45. Sabadková T. et al., *Preparation and Characterization of Magnetic HEO with the Composition (Al_{0.2}Co_{0.2}Cr_{0.2}Ni_{0.2}Fe_{0.2}X_{0.2})₃O₄; X= Mg, Zn*, 2025 15th International Conference on Measurement, p.159-162(2025). <https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT66999.2025.11078712>
46. Ren B. et al., *Ti⁴⁺ doped high-entropy fluorite oxide ceramics ((ZrHfCeYEr)(1-x)/5Ti_x) O_{2-δ}: Thermal, mechanical and cyclic thermal shock resistance properties studies*, Journal of the European Ceramic Society №44, p. 116733(2024). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116733>
47. Liu B. et al., *(La_{0.25}Sm_{0.25}Gd_{0.25}Ho_{0.25}) AlO₃: High-entropy perovskite with harmonizing mechanical-thermal properties for TBCs*, Journal of the American Ceramic Society №108, p. e70112(2025). https://doi.org/10.1111/jace.70112?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
48. Sarkar A. et al., *High entropy oxides for reversible energy storage*, Nature communications №9, p. 3400(2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05774-5>
49. Djenadic R. et al., *Multicomponent equiatomic rare earth oxides*, Materials Research Letters №5, p. 102-109(2017). <https://doi.org/10.1080/21663831.2016.1220433>

Сведения об авторах:

Жуматаева И.З. – автор для корреспонденции, PhD, инженер Лаборатории физики твердого тела Астанинского филиала Института ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан,

Жуматаева И.З – хат-хабар авторы, PhD, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институтының Астана филиалы Қатты дене физикасы зертханасының инженері, Алматы, Қазақстан

Zhumatayeva I.Z. – the corresponding author, PhD, Engineer, Laboratory of Solid State Physics, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, 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/>).