

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-32-39>

УДК 544.6.076; 66.091

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MXENES: АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

М. Т. Джусамбаев, К. Аскарұлы*, К. Б. Шакенов, С. Азат, У. Жантукеев

Сатпаев Университет, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: k.askaruly@gmail.com

Максимизация эффективности преобразования энергии является главной целью в области устойчивых энергетических систем. В последние годы MXenes – новый класс двумерных материалов – привлекают большое внимание в контексте повышения эффективности преобразования энергии. Этот обзор литературы представляет обзор текущего состояния исследований MXenes в области энергетики, включая их синтез, характеристики и применение в системах хранения и преобразования энергии. Существуют различные методы синтеза MXenes, которые разрабатываются для получения материалов с оптимальными структурными и электрохимическими свойствами. В исследованиях характеристик MXenes изучаются их электрохимические свойства, структура, поверхность и физико-химическое поведение с целью понимания основных механизмов преобразования энергии и оптимизации их производительности. Применение MXenes в системах хранения и преобразования энергии включает использование их в солнечных батареях, термоэлектрических устройствах и аккумуляторах. MXenes обладают высокой проводимостью, механической прочностью и химической стабильностью, что делает их привлекательными для этих приложений.

Необходимо продолжать исследования, чтобы более полно понять физические и химические особенности MXenes, а также разработать оптимальные методы синтеза и применения для достижения максимальной эффективности преобразования энергии.

Ключевые слова: MXenes, синтез, хранения и преобразования энергии, МАХ-фаза, травление.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразование и хранение энергии представляют собой значительные вызовы в контексте разработки устойчивых энергетических систем. С увеличивающимся мировым спросом на энергию и ограниченным доступом к традиционным ископаемым источникам топлива становится необходимым искать альтернативные эффективные и возобновляемые источники энергии. Кроме того, с учетом необходимости снижения выбросов парниковых газов и смягчения негативных последствий изменения климата, проблема преобразования и хранения энергии становится еще более насущной. В последние годы наблюдается увеличенный интерес к применению двумерных (2D) материалов в области преобразования и хранения энергии. Особое внимание привлекают двумерные карбиды и нитриды переходных металлов (MXenes) благодаря их потенциалу для повышения эффективности преобразования энергии [1–3]. MXenes – это класс материалов с слоистой структурой, толщина которой составляет всего несколько атомов, что делает их высокопроводящими и идеальными для использования в устройствах преобразования и хранения энергии [4]. В контексте проблем, сопутствующих коммерциализации электроэнергетики, разработка эффективных систем преобразования и хранения энергии играет важную роль. Применение двумерных (2D) материалов, включая MXenes, представляет значительный потенциал для улучшения эффективности систем преобразования и хранения энергии, способствуя таким образом прогрессу в области

устойчивых энергетических систем. Изучение свойств и применения MXenes в преобразовании и хранении энергии является важной областью исследований. MXenes представляют собой новый и интересный класс двумерных материалов, привлекающих заслуженное внимание в области преобразования и хранения энергии. Их уникальные физические и химические свойства, такие как большая площадь поверхности, высокая проводимость и выдающаяся химическая стабильность, делают их привлекательными для различных энергетических приложений. Открытие MXenes в 2011 году стало значимым моментом в развитии двумерных материалов и открыло новые перспективы для исследований в области преобразования и хранения энергии. Свойства MXenes, в особенности их высокая поверхностная площадь и проводимость, делают их привлекательными для применения в качестве электродов в энергетических устройствах хранения, таких как суперконденсаторы, батареи и топливные элементы. Например, благодаря большой поверхностной площади, MXenes способны обеспечивать хранение большого количества заряда в суперконденсаторах, что приводит к высокой плотности энергии и мощности [5]. Кроме того, было показано, что MXenes могут действовать как катализаторы в процессах преобразования солнечной энергии. Благодаря их химической стабильности и значительной поверхностной площади, MXenes могут быть использованы в качестве катализаторов в фотохимических реакциях, таких как расщепление воды и восстановление CO₂, что способствует повышению

эффективности процессов преобразования энергии [6]. Разнообразие приложений MXenes в области преобразования и хранения энергии подчеркивает их универсальность и потенциал. Устойчивость играет решающую роль в практическом использовании MXenes в системах преобразования и хранения энергии. Важно разработать методы для повышения стабильности этих устройств со временем [7–9]. Кроме проблем с долгосрочной стабильностью, существует необходимость в более всесторонних исследованиях для лучшего понимания механизмов преобразования энергии в системах, основанных на MXene. При разработке более эффективных и эффективных технологий преобразования энергии необходимо более глубокое понимание фундаментальных механизмов преобразования энергии в системах на основе MXene [10]. Эти проблемы рассматриваются в нескольких исследованиях, в которых исследуются новые методы синтеза и фундаментальные механизмы преобразования энергии в системах, основанных на MXene. Недавние исследования, например, изучали гидротермальные и электрохимические методы синтеза MXene [11]. Кроме того, проводились исследования с целью понимания электрохимических свойств MXene и механизмов преобразования энергии в суперконденсаторах, основанных на MXene [12].

Актуальность применения материалов MXenes в электрохимическом хранении энергии обусловлена их уникальными свойствами, такими как высокая электропроводимость и двумерная структура, обеспечивающие эффективную передачу заряда. Специфическая емкость MXenes является выдающейся, что делает их перспективными для использования в суперконденсаторах и литий-ионных аккумуляторах [13, 14]. Устойчивость к циклическим процессам, высокая поверхностная активность и потенциал в качестве электрокатализаторов делают MXenes важным фактором в разработке эффективных и долговечных электрохимических устройств для хранения энергии.

Новизна данного обзора заключается в детальном рассмотрении современного состояния исследований, посвященных применению MXenes в сфере преобразования энергии. Анализируются вопросы синтеза, характеристики и применения MXenes в системах хранения и преобразования энергии, а также выявляются актуальные проблемы, связанные с их использованием. Этот обзор стремится предоставить комплексное понимание текущего научного ландшафта в данной области и подчеркнуть ключевые аспекты, способствующие развитию эффективных энергетических технологий на основе MXenes.

СИНТЕЗ MXENES

HF-травление представляет собой широко применяемый метод синтеза и характеристики 2D-материалов, включая MXenes. Этот метод включает селективное удаление определенного слоя из слоистого материала с использованием плавиковой кислоты (HF). Процесс HF-травления широко используется

при синтезе MXenes, поскольку он позволяет селективно удалять слой карбида переходного металла (КПМ) из MAX-фазы, что приводит к образованию двумерного материала, состоящего из переходного металла и углерода. Механизм HF-травления основан на реакции плавиковой кислоты с КПМ-слоем в MAX-фазе [15]. Этот метод позволяет получить MXenes с определенными характеристиками и структурой, которые в дальнейшем могут быть использованы в различных приложениях в области преобразования и хранения энергии.

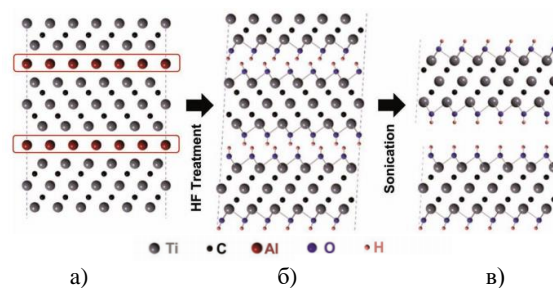


Рисунок 1. Общая схема синтеза Ti_3C_2Tx из Ti_3AlC_2 , рассмотренная в данной статье. а) структура Ti_3AlC_2 . б) замещение атомов Al на OH после реакции с HF. в) разрыв водородных связей и разделение нанопластинок после ультразвуковой обработки в метаноле [9]

Плавиковая кислота легко взаимодействует с слоем КПМ, разрывая химические связи и удаляя слой КПМ, оставляя двумерный материал, состоящий из переходного металла и углерода [16]. Селективность электролитического травления с использованием HF обусловлена различием в реакционной способности между слоем КПМ и другими слоями в фазе MAX. Слой КПМ реагирует с плавиковой кислотой более активно, что позволяет селективно удалить [17]. HF-травление широко применяется при синтезе MXenes и является эффективным и масштабируемым методом для получения высококачественных материалов MXene [18]. Кроме того, HF-травление также может использоваться для изменения поверхностных свойств MXenes путем контроля условий травления и времени воздействия плавиковой кислоты. Например, поверхностная площадь и электрическая проводимость MXenes могут быть регулируемы путем контроля условий травления [19]. Одной из проблем, связанных с HF-травлением, является его опасный характер. Плавиковая кислота является высокоагрессивным и токсичным веществом, и ее обработка требует соответствующих мер безопасности, включая использование защитного оборудования и правильную утилизацию отходов [20, 21]. Кроме того, HF-травление также может приводить к образованию дефектов и примесей в материале MXene, что может повлиять на его работоспособность в приложениях по преобразованию энергии [22]. Универсальность и масштабируемость HF-травления, в сочетании с уникальными физическими и химическими свойствами MXenes, делают его многообещающим материалом

для приложений в области преобразования энергии [18].

В дополнение к HF-травлению, было разработано несколько других методов синтеза MXenes. Среди этих методов можно выделить шаровое помолотие, эксфолиацию и синтез с использованием шаблонов. Шаровое помолотие является распространенным методом для синтеза MXenes, особенно для массового производства. В этом методе фаза MAX помалкивается в жидкой среде, такой как этанол или вода, с использованием шаровой мельницы. Процесс шарового помола разламывает фазу MAX на более мелкие частицы и создает дефекты, которые могут привести к образованию слоев MXene [23]. Шаровое помолотие обладает преимуществом простоты и масштабируемости в процессе производства MXenes. Тем не менее, оно также может привести к образованию примесей и дефектов, которые могут повлиять на качество полученного материала MXene [23]. Эксфолиация является еще одним методом синтеза MXenes, который включает механическое разделение слоев MXene от фазы MAX. Этот метод может быть осуществлен с использованием различных техник, включая ультразвуковое воздействие, механическую эксфолиацию и жидкостную эксфолиацию (рисунок 2) [24].

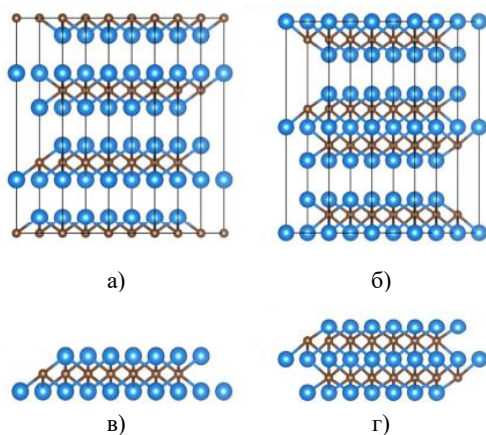


Рисунок 2. Боковой вид структуры объемной фазы и MXene Ti₂C (а, в) и Ti₃C₂ (б, г); атомы Ti и C представлены большими синими и маленькими коричневыми сферами соответственно [24]

Эксфолиация является простым и эффективным методом для получения высококачественных материалов MXene, однако достижение масштабного производства с использованием этого метода может быть сложной задачей [24]. Шаблоно-ориентированный синтез – это еще один метод, разработанный для синтеза MXene. В этом методе используется материал-шаблон, такой как углеродные нанотрубки или графен, для направления роста слоев MXene. Данный метод позволяет точно контролировать толщину и морфологию материала MXene, и он был использован для получения высококачественных материалов MXene с настраиваемыми свойствами [25].

КЛЮЧЕВЫЕ СВОЙСТВА MXENE

MXene являются уникальным классом двумерных материалов с большой поверхностной площадью – ключевым свойством, которое делает их привлекательными для применения в системах хранения и преобразования энергии. Большая поверхностная площадь достигается благодаря межслойному расстоянию между слоями MXene, которое составляет от нескольких ангстрем до нескольких нанометров [26]. Большая поверхностная площадь обеспечивает эффективное хранение заряда и повышает эффективность преобразования энергии в устройствах на основе MXene, таких как суперконденсаторы, аккумуляторы и топливные элементы. Это свойство делает MXene подходящими для использования в качестве электродов в устройствах хранения энергии, так как они способны хранить большое количество заряда, что приводит к высокой емкости и энергетической плотности. Большая поверхностная площадь MXene также позволяет использовать их в качестве катализаторов в преобразовании солнечной энергии, поскольку они обеспечивают большую поверхность для эффективного поглощения света и преобразования энергии [27]. Большая поверхностная площадь MXene является уникальным преимуществом, которое отличает их от других двумерных материалов, таких как графен. Это делает их перспективными кандидатами для применения в системах преобразования и хранения энергии. Дальнейшие исследования требуются для оптимизации их использования в этих приложениях и развития устойчивых энергетических технологий.

Большая поверхностная площадь MXene-материалов предоставляет возможности для их применения в качестве катализаторов в процессах конверсии солнечной энергии. Это обусловлено способностью MXene обеспечивать значительно более высокую поверхностную площадь, что позволяет эффективно поглощать свет и преобразовывать его в энергию [28]. Это уникальное преимущество поверхностной площади MXene отличает его от других двумерных материалов, таких как графен. В связи с этим, MXene-материалы обладают большим потенциалом для использования в различных приложениях, связанных с конверсией и хранением энергии. Однако, для оптимизации использования MXene в таких приложениях и для продвижения развития устойчивой энергетики, требуются дальнейшие исследования.

Экспериментально подтверждено, что MXene-материалы проявляют высокую удельную емкость в суперконденсаторах, что свидетельствует о их потенциале в качестве электродов для энергетического хранения (рисунок 3) [29].

Большая проводимость MXene обеспечивает быструю скорость зарядки и разрядки, что является важным для высокоомощных приложений [30].

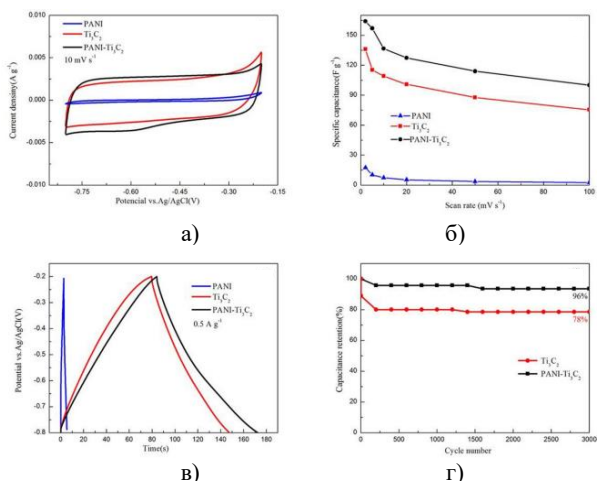


Рисунок 3. (а) кривые циклического вольтамперометрии (CV) для электродов PANI, Ti_3C_2 и PANI- Ti_3C_2 при скорости сканирования 10 мВ/с; (б) удельная емкость в зависимости от скорости сканирования для Ti_3C_2 , PANI и PANI- Ti_3C_2 ; (в) кривые гальваностатической зарядки/разрядки (GCD) для электродов PANI, Ti_3C_2 и PANI- Ti_3C_2 при плотностях тока 0,5 А/г; (г) кривые гальваностатического циклирования для электродов Ti_3C_2 и PANI- Ti_3C_2 при плотности тока 3 А/г [29].

MXene также исследовались для использования в топливных элементах, где их высокая проводимость и стабильность делают их подходящими для использования в качестве катализаторов или электродов. В топливных элементах эффективность передачи заряда между анодом и катодом играет решающую роль и благодаря высокой проводимости MXene обеспечивается быстрая и эффективная передача заряда, что приводит к улучшению производительности топливных элементов [31].

КОМПОЗИТЫ И ГИБРИДЫ НА ОСНОВЕ MXENES

Композиты на основе MXene применялись в качестве электродов в устройствах для хранения энергии, таких как суперконденсаторы, аккумуляторы и топливные элементы. Например, композиты MXene-полимер были доказаны обладающими высокой емкостью, длительным сроком службы и хорошей способностью к быстрой зарядке и разрядке [32]. Добавление полимеров также может обеспечить стабильность и механическую гибкость электродов, делая их более подходящими для практического применения. Аналогично, гибриды на основе MXene использовались в качестве катализаторов в солнечной энергетике. Например, гибриды на основе MXene Ni-Co-Fe-P являются эффективными катализаторами для реакции выделения кислорода (OER) при разделении воды, которая является важной реакцией в процессе получения водородного топлива из воды. Сочетая свойства различных металлов в гибриде, можно улучшить активность и стабильность катализатора. Помимо применения в системах хранения и преобразования энергии, композиты и гибриды на основе MXene использовались в других областях, таких как экраниро-

вание электромагнитных помех и каталитические окислительные реакции [33]. Универсальность композитов и гибридов на основе MXene делает их многообещающим материалом для широкого спектра применений. Несмотря на их потенциал, использование композитов и гибридов на основе MXene все еще сопряжено с рядом вызовов. Например, синтез композитов и гибридов на основе MXene часто представляет сложность, так как требуется точное контролирование состава, структуры и интерфейса между различными материалами. Кроме того, требуются всесторонние исследования для более глубокого понимания свойств и механизмов преобразования энергии в композитах и гибридах на основе MXene.

ПРИМЕНЕНИЕ MXENES В ХРАНЕНИИ ЭНЕРГИИ

Для дальнейшего улучшения энергетических характеристик и производительности MXene исследователи изучают разработку композитов и гибридов на основе MXene. Было доказано, что композиты и гибриды на основе MXene улучшают энергетические характеристики и производительность по сравнению с традиционными материалами для хранения энергии. Например, композиты на основе MXene применяются в качестве электродов в суперконденсаторах, обеспечивая большую энергетическую и мощностную плотность, что делает их идеальными для использования в крупномасштабных приложениях, таких как электромобили и системы возобновляемой энергии (рисунок 4) [34–37].

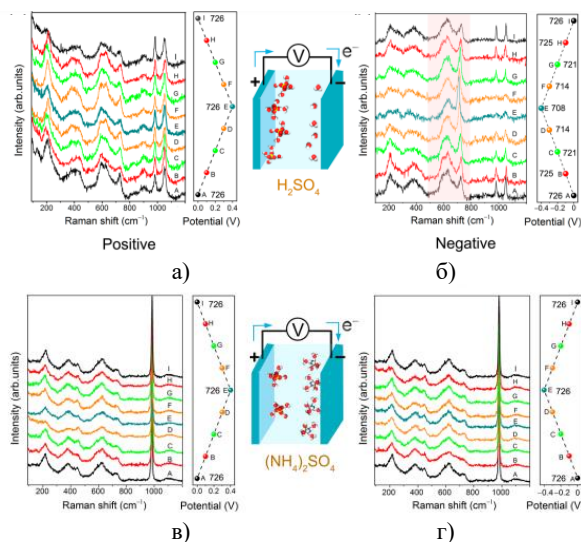


Рисунок 4. Интенсивность спектров в режиме Raman для MXene Ti_3C_2Tx , полученных на: (а) положительном электроде в электролите H_2SO_4 , (б) отрицательном электроде в электролите H_2SO_4 , (в) положительном электроде в электролите $(NH_4)_2SO_4$ и (г) отрицательном электроде в электролите $(NH_4)_2SO_4$. Значительные изменения в положении полос Raman, зависящие от напряжения, обнаружены только в случае (б). Полоса при 726 см^{-1} смещается в сторону красного спектра до 708 см^{-1} , когда потенциал изменяется от 0 В до $-0,4\text{ В}$, и полностью возвращается в исходное положение при обратном сканировании [34].

Композиты и гибриды на основе MXene могут быть синтезированы путем сочетания MXene с другими материалами, такими как полимеры, графен и другие двумерные материалы. Эти композиты и гибриды могут быть специально настроены для обладания определенными свойствами, соответствующими различным приложениям в области хранения и преобразования энергии. Например, большие композиты на основе MXene могут быть разработаны с высокой механической прочностью, что делает их идеальными для использования в крупномасштабных приложениях, таких как электромобили [38–40].

Развитие композитов и гибридов на основе MXene для энергетических приложений все еще находится на ранней стадии, и перед ним стоит множество вызовов. Одной из основных проблем является масштабируемость синтеза этих материалов, что необходимо для их практического использования в системах хранения и преобразования энергии. Кроме того, необходимы более всесторонние исследования для лучшего понимания характеристик и стабильности композитов и гибридов на основе MXene в течение времени [32].

Эти устройства большой мощности для хранения энергии могут быстро заряжаться и разряжаться боль-

шие объемы энергии, что делает их идеальными для использования в системах регенеративного торможения в электромобилях и в качестве источников резервного питания для систем возобновляемой энергии. Для дальнейшего улучшения энергетических характеристик устройств суперконденсаторов, исследователи исследуют применение композитов и гибридов на основе MXene. Сочетая MXene с другими материалами, такими как углеродные нанотрубки или графен, исследователи создали гибридные электроды суперконденсаторов с улучшенными характеристиками хранения энергии и повышенной стабильностью. Например, в исследовании [41] авторы сообщили об улучшении энергетических характеристик устройств суперконденсаторов при сочетании MXene-основных электродов с графеном. Гибридные электроды показали более высокую удельную ёмкость и улучшенную производительность при разных скоростях зарядки и разрядки по сравнению с чистыми электродами на основе MXene. Например, композиты MXene/графен или MXene/полимер были использованы в качестве компонентов аккумуляторов и показали улучшенные характеристики хранения энергии и стабильность по сравнению с традиционными материалами для аккумуляторов.

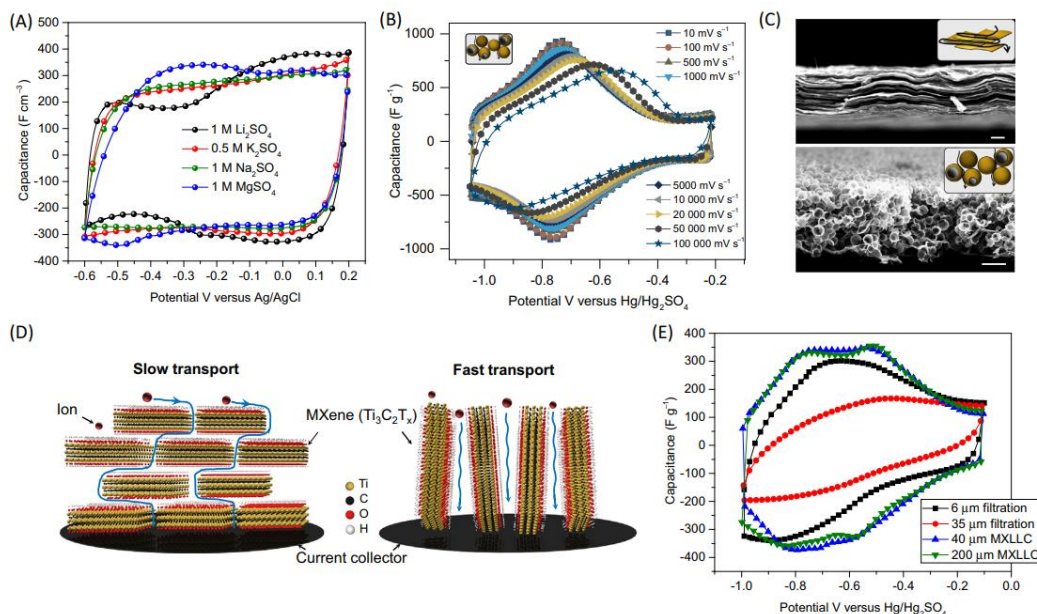


Рисунок 5. Электрохимические характеристики MXenes в водных электролитах [42]

Как выше уже было сказано, MXenes широко применяются в различных системах хранения энергии благодаря своим выдающимся свойствам. Они используются в качестве электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов, обеспечивая высокую электропроводимость и специфическую емкость и, таким образом, повышая энергетическую плотность аккумуляторов. MXenes также находят применение в суперконденсаторах, где их специфическая емкость и быстрый заряд и разряд обеспечивают высокую мощ-

ность. Исследования в области электрохимических систем хранения водорода также включают применение MXenes. Кроме того, они исследуются как материалы для электродов в солнечных батареях и фотоэлектрических устройствах, где их свойства способствуют эффективному преобразованию световой энергии в электричество. Эта многофункциональность делает MXenes перспективными материалами для различных современных технологий хранения и преобразования энергии.

Несмотря на многообещающие свойства MXenes для систем хранения и преобразования энергии, существуют некоторые ограничения. Высокая стоимость сырьевых материалов для их синтеза, потенциальная неоднородность и вариабельность свойств, а также проблемы с устойчивостью в окружающей среде, особенно в условиях высокой влажности, могут повысить общую стоимость производства и создать трудности в интеграции. Ограниченная термическая стабильность и чувствительность к высоким температурам могут ограничивать применение MXenes в высокотемпературных условиях. Кроме того, отсутствие единых стандартов и нормативов создает вызовы в стандартизации процессов и валидации результатов исследований. Эти аспекты требуют дополнительных исследований и инженерных решений для устранения или смягчения недостатков и обеспечения устойчивого и успешного внедрения MXenes в энергетические системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было предложено и исследовано несколько механизмов для хранения энергии в MXenes, включая электрическую двойную электрическую емкость, псевдоемкость и редокс-реакции. Электрическая двойная электрическая емкость является одним из основных механизмов хранения энергии в MXenes и включает хранение заряда на границе MXene и электролита. Этот механизм связан с большой поверхностью MXenes, что обеспечивает эффективное хранение заряда и повышение эффективности преобразования энергии. Псевдоемкость является еще одним механизмом хранения энергии в MXenes и включает обратимую адсорбцию ионов на поверхности материала. Этот механизм связан с химическими свойствами MXenes, обеспечивающими эффективное хранение ионов и повышение энергоемкости. Редокс-реакции представляют собой третий механизм хранения энергии в MXenes и включают передачу электронов между MXene и электролитом. Этот механизм связан с электрохимическими свойствами MXenes, обеспечивающими эффективную передачу электронов и повышение энергоемкости.

В заключение отметим, что оптимальный механизм хранения энергии в MXenes сочетает вышеуказанные механизмы и может быть оптимизирован путем контроля композиции материала, его структуры и поверхностной функционализации. Оптимальный механизм хранения энергии в MXenes будет зависеть от конкретного приложения хранения энергии и требуемых характеристик хранения энергии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19576865).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Anasori B., Lukatskaya M. R., Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage // *Nature Reviews Materials*. – 2017. – Vol. 2. – No. 2. – P. 1–17.
- Wang X. et al. Influences from solvents on charge storage in titanium carbide MXenes // *Nature Energy*. – 2019. – Vol. 4. – No. 3. – P. 241–248.
- Ma R. et al. Ti_3C_2Tx MXene for electrode materials of supercapacitors // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2021. – Vol. 9. – No. 19. – P. 11501–11529.
- Xu X. et al. MXenes with applications in supercapacitors and secondary batteries: A comprehensive review // *Materials Reports: Energy*. – 2022. – Vol. 2. – No. 1. – P. 100080.
- Stark M. S., Kuntz K. L., Martens S. J. & Warren S. C. Intercalation of layered materials from bulk to 2D // *Advanced Materials*. – 2019. – Vol. 31(27). – P. 1808213.
- Peng J., Chen, X., Ong, W. J., Zhao, X., & Li, N. (2019). Surface and heterointerface engineering of 2D MXenes and their nanocomposites: insights into electro- and photocatalysis // *Chem*. – Vol. 5(1). – P. 18–50.
- Bhat A. et al. Prospects challenges and stability of 2D MXenes for clean energy conversion and storage applications // *npj 2D Materials and Applications*. – 2021. – Vol. 5. – No. 1. – P. 61.
- Noor U. et al. Synthesis and applications of MXene-based composites: A review // *Nanotechnology*. – 2023.
- Lv J. et al. Energy Storage Device Application Based on MXenes Composites: a Mini Review // *International Journal of Electrochemical Science*. – 2021. – Vol. 16. – No. 4. – P. 210439.
- Li K., Liang M., Wang H., Wang X., Huang Y., Coelho J., ... & Xu Y. 3D MXene architectures for efficient energy storage and conversion // *Advanced Functional Materials*. – 2020. – Vol. 30(47). – P. 2000842.
- Biswas S. & Alegaonkar P.S. MXene: evolutions in chemical synthesis and recent advances in applications // *Surfaces*. – 2021. – Vol. 5(1). – P. 1–34.
- Ampong D. N., Agyekum E., Agyemang F. O., Mensah-Darkwa K., Andrews A., Kumar A., & Gupta R. K. MXene: fundamentals to applications in electrochemical energy storage // *Discover Nano*. – 2023. – Vol. 18(1). – P. 3.
- Xie Y. et al. Role of surface structure on Li-ion energy storage capacity of two-dimensional transition-metal carbides // *Journal of the American Chemical Society*. – 2014. – Vol. 136. – No. 17. – P. 6385–6394.
- Gogotsi Y., Penner R. M. Energy storage in nanomaterials—capacitive, pseudocapacitive, or battery-like? // *ACS nano*. – 2018. – Vol. 12. – No. 3. – P. 2081–2083.
- Tian H. et al. Rechargeable aluminum/iodine battery redox chemistry in ionic liquid electrolyte // *ACS Energy Letters*. – 2017. – Vol. 2. – No. 5. – P. 1170–1176.
- Naguib M. et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 // *Advanced materials*. – 2011. – Vol. 23. – No. 37. – P. 4248–4253.
- Sang X., Xie Y., Lin M.W., Alhabeab M., Van Aken K. L., Gogotsi Y., ... & Unocic R. R. Atomic defects in monolayer titanium carbide (Ti_3C_2Tx) MXene // *ACS nano*. – 2016. – Vol. 10(10). – P. 9193–9200.
- Shuck C.E. et al. Scalable synthesis of Ti_3C_2Tx MXene // *Advanced Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 22. – No. 3. – P. 1901241.

19. Wang X. et al. Atomic-scale recognition of surface structure and intercalation mechanism of Ti_3C_2X // *Journal of the American Chemical Society*. – 2015. – Vol. 137. – No. 7. – P. 2715–2721.
20. Pang S. Y. et al. Universal strategy for HF-free facile and rapid synthesis of two-dimensional MXenes as multi-functional energy materials // *Journal of the American Chemical Society*. – 2019. – Vol. 141. – No. 24. – P. 9610–9616.
21. Shpigel N. et al. Direct assessment of nanoconfined water in 2D Ti_3C_2 electrode interspaces by a surface acoustic technique // *Journal of the American Chemical Society*. – 2018. – Vol. 140. – No. 28. – P. 8910–8917.
22. Naguib M., Mashtalir O., Carle J., Presser V., Lu J., Hultman L., ... & Barsoum M.W. Two-dimensional transition metal carbides // *ACS nano*. – 2012. – Vol. 6(2). – P. 1322–1331.
23. Hosseini S. M., Heidarpour A., Ghasemi S. Effects of ball milling sequences on the in-situ reactive synthesis of the Ti_2SC MAX phase // *Advances in Applied Ceramics*. – 2020. – Vol. 119. – No. 4. – P. 204–211.
24. Mondal K., & Ghosh P. Exfoliation of Ti_2C and Ti_3C_2 MXenes from bulk trigonal phases of titanium carbide: A theoretical prediction // *Solid State Communications*. – 2019. – Vol. 299. – P. 113657.
25. Wang C. et al. Recent progress in template-assisted synthesis of porous carbons for supercapacitors // *Advanced Powder Materials*. – 2022. – Vol. 1. – No. 2. – P. 100018.
26. Wu Y. et al. MoS_2 -Nanosheet-Decorated 2D Titanium Carbide (MXene) as High-Performance Anodes for Sodium-Ion Batteries // *ChemElectroChem*. – 2017. – Vol. 4. – No. 6. – P. 1560–1565.
27. Fan W.K., Sherryrna A., Tahir M. Advances in Titanium Carbide ($Ti_3C_2T_x$) MXenes and Their Metal-Organic Framework (MOF)-Based Nanotextures for Solar Energy Applications: A Review // *ACS omega*. – 2022. – Vol. 7. – No. 43. – P. 38158–38192.
28. Halim J. et al. Synthesis and characterization of 2D molybdenum carbide (MXene) // *Advanced Functional Materials*. – 2016. – Vol. 26. – No. 18. – P. 3118–3127.
29. Ren Y. et al. Synthesis of polyaniline nanoparticles deposited on two-dimensional titanium carbide for high-performance supercapacitors // *Materials Letters*. – 2018. – Vol. 214. – P. 84–87.
30. Er D. et al. Ti_3C_2 MXene as a high capacity electrode material for metal (Li, Na, K, Ca) ion batteries // *ACS applied materials & interfaces*. – 2014. – Vol. 6. – No. 14. – P. 11173–11179.
31. Xie X. et al. An extraordinarily stable catalyst: Pt NPs supported on two-dimensional $Ti_3C_2X_2$ (X= OH, F) nanosheets for oxygen reduction reaction // *Chemical Communications*. – 2013. – Vol. 49. – No. 86. – P. 10112–10114.
32. Yan P. et al. Enhanced supercapacitive performance of delaminated two-dimensional titanium carbide/carbon nanotube composites in alkaline electrolyte // *Journal of Power Sources*. – 2015. – Vol. 284. – P. 38–43.
33. Cao M. et al. 2D MXenes: electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 359. – P. 1265–1302.
34. Das P., Wu Z. S. MXene for energy storage: present status and future perspectives // *Journal of Physics: Energy*. – 2020. – Vol. 2. – No. 3. – P. 032004.
35. Shen B. et al. Research Progress on MXene-Based Flexible Supercapacitors: A Review // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12. – No. 8. – P. 1099.
36. Mei J. et al. Two-dimensional fluorine-free mesoporous Mo_2Ga_2C MXene via UV-induced selective etching of Mo_2Ga_2C for energy storage // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2020. – Vol. 25. – P. e00156.
37. Wu Z. et al. One-step in-situ synthesis of Sn-nanoconfined $Ti_3C_2T_x$ MXene composites for Li-ion battery anode // *Electrochimica Acta*. – 2022. – Vol. 407. – P. 139916.
38. Wu J. et al. Highly safe and ionothermal synthesis of Ti_3C_2 MXene with expanded interlayer spacing for enhanced lithium storage // *Journal of Energy Chemistry*. – 2020. – Vol. 47. – P. 203–209.
39. Kamysbayev V. et al. Covalent surface modifications and superconductivity of two-dimensional metal carbide MXenes // *Science*. – 2020. – Vol. 369. – No. 6506. – P. 979–983.
40. Zarepour A. et al. Self-Healing MXene-and Graphene-Based Composites: Properties and Applications // *Nano-micro letters*. – 2023. – Vol. 15. – No. 1. – P. 100.
41. Levitt A. S. et al. Electrospun MXene/carbon nanofibers as supercapacitor electrodes // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2019. – Vol. 7. – No. 1. – C. 269–277.
42. Lin Z. et al. MXenes as high-rate electrodes for energy storage // *Trends in Chemistry*. – 2020. – Vol. 2. – No. 7. – P. 654–664.

**MXENES ҚОЛДАНУАРҚЫЛЫ ЭНЕРГИЯНЫ ТҮРЛЕНДІРУДІ ЖАҚСARTУ:
ТИІМДІЛІКТІ ТАЛДАУ**

М. Т. Джусамбаев, К. Аскарұлы*, К. Б. Шакенов, С. Азат, У. Жантیکеев

Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: k.askaruly@gmail.com*

Энергияны түрлендіру тиімділігін арттыру тұрақты энергетикалық жүйелер саласындағы басты мақсат болып табылады. Соңғы жылдары MXenes-екі өлшемді материалдардың жаңа класы, энергияны түрлендіру тиімділігін арттыру контекстінде үлкен назар аударды. Бұл әдебиеттерге шолу MXenes-нің энергетикалық зерттеулерінің қазіргі жағдайына, соның ішінде олардың синтезіне, сипаттамаларына және энергияны сақтау және түрлендіру жүйелерінде қолданылуына шолу жасайды. Оңтайлы құрылымдық және электрохимиялық қасиеттері бар материалдарды алу үшін әзірленген MXenes синтезінің әртүрлі әдістері бар. MXenes сипаттамаларын зерттеу энергияны түрлендірудің негізгі механизмдерін түсіну және олардың өнімділігін оңтайландыру мақсатында олардың электрохимиялық қасиеттерін, құрылымын, бетін және физика-химиялық қасиеттерін зерттейді. MXenes-ді энергияны сақтау және түрлендіру жүйелерінде қолдану оларды күн батареяларында, термоэлектрлік құрылғыларда және батареяларда қолдануды қамтиды. MXenes жоғары өткізгіштікке, механикалық беріктікке және химиялық тұрақтылыққа ие, бұл оларды осы қосымшалар үшін тартымды етеді.

MXenes-тің физикалық және химиялық ерекшеліктерін толық түсіну және энергияны түрлендірудің максималды тиімділігіне қол жеткізу үшін оңтайлы синтездеу және қолдану әдістерін әзірлеу үшін зерттеулерді жалғастыру қажет.

Түйін сөздер: MXenes, синтез, энергияны сақтау және түрлендіру, MAX фазасы, өңдеу.

IMPROVING ENERGY CONVERSION USING MXENES: EFFICIENCY ANALYSIS

M. T. Dzhusambaev, K. Askaruly*, K. B. Shakenov, S. Azat, U. Zhantikeev

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: k.askaruly@gmail.com*

Maximizing energy conversion efficiency is a major goal in the field of sustainable energy systems. In recent years, MXenes, a new class of two-dimensional materials, have attracted much attention in the context of improving energy conversion efficiency. This literature review provides an overview of the current state of energy research on MXenes, including their synthesis, characterization, and applications in energy storage and conversion systems. There are various methods for the synthesis of MXenes that are being developed to obtain materials with optimal structural and electrochemical properties. Characterization studies of MXenes examine their electrochemical properties, structure, surface, and physicochemical behavior to understand the underlying energy conversion mechanisms and optimize their performance. Applications of MXenes in energy storage and conversion systems include their use in solar cells, thermoelectric devices and batteries. MXenes have high conductivity, mechanical strength, and chemical stability, making them attractive for these applications.

Continued research is needed to more fully understand the physical and chemical properties of MXenes and to develop optimal synthesis and application methods to achieve maximum energy conversion efficiency.

Keywords: MXenes, synthesis, energy storage and conversion, MAX phase, etching.