

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: М. Имроз, М.А. Басит Максены: новый чудо-материал // 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет, 2025. С. 60–69. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

М. Имроз, М.А. Басит

Лаборатория нанотехнологических исследований Физического факультета
Бангладешского университета инженерии и технологий, Дакка, Бангладеш

МАКСЕНЫ: НОВЫЙ ЧУДО-МАТЕРИАЛ

Введение. Глобальные усилия по борьбе с изменением климата и снижению зависимости от ископаемого топлива сделали передовые системы хранения энергии ключевым элементом происходящего энергетического перехода. Эти системы играют решающую роль в использовании прерывистых возобновляемых источников энергии, таких как солнце и ветер, одновременно способствуя прогрессу в области электромобильности, портативной электроники и интеллектуальной инфраструктуры. Данная трансформация основана на использовании достижений материаловедения, одним из которых является новый класс материалов — максены, быстро получающий признание благодаря своему исключительному потенциалу.

Максены — это двумерные (2D) карбиды, нитриды или карбонитриды переходных металлов, известные своей уникальной структурой и впечатляющими физико-химическими свойствами. Впервые они были синтезированы в 2011 году исследователями из Университета Дрекслея под руководством профессоров Юрия Гогоци и Мишеля Барсума. Целью команды исследователей было выполнение расслоения слоистых тройных карбидов, известных как МАХ-фаза и имеющих общую формулу $M_{n+1}AX_n$ (где $n = 1, 2$ или 3 ; M — это ранний переходный металл, такой как Ti , V или Mo ; A — элемент группы 13 или 14, такой как Al , Sn или Ga ; а X представляет собой углерод и/или азот).

Селективно вытравливая элемент A из МАХ-фаз, исследователи успешно изолировали атомарно тонкие 2D-слои, состоящие из карбидов переходных металлов — материалов, которые они назвали максены. Название отражает как их происхождение из фазы МАХ, так и их структурное сходство с графеном (на что указывает суффикс «-ен»).

Ti_3C_2 , первый и наиболее широко изученный максен, изначально исследовался на предмет возможности его использования для электрохимического хранения энергии, особенно в аккумуляторах и суперконденсаторах. С момента этого прорывного исследования было синтезировано более 30 различных максенов, а полученные теоретические модели дают основание предполагать, что их может быть сотни. Всего за десятилетие максены быстро стали ведущими кандидатами для создания высокоэффективных аккумуляторов, суперконденсаторов и гибридных систем хранения энергии. Их исключительная адаптивность обусловлена сочетанием слоистой структуры, высокой электропроводности и настраиваемых поверхностных окончаний, оказывающих большое влияние на их химическую реактивность, устойчивость к воздействию окружающей среды и взаимодействие с другими материалами. В результате в настоящее время изучается возможность применения максенов в самых различных сферах за пределами хранения энергии, включая экранирование электромагнитных излучений, очистку воды, датчики, катализ и биомедицинские технологии, что еще больше укрепляет их репутацию «чудо-материала» как среди исследователей, так и среди отраслевых экспертов.

В этой статье рассматривается путь, пройденный максенами, начиная с их открытия с получением впечатляющих характеристик до методов изготовления и управления характеристиками, определения возможностей хранения энергии и расширения технологического потенциала, и завершая оценкой перспективы их использования в формировании устойчивого будущего.

МАХ-фаза и максены

На рис. 1 представлен обзор элементов, участвующих в образовании МАХ-фаз и получаемых в результате максенов с общей химической формулой $M_{n+1}X_nT_x$, где T_x представляет собой поверхностные окончания, такие как кислород, гидроксил или фтор. Как показано на рис. 1а, в периодической таблице выделены элементы, обычно используемые в синтезе МАХ-фаз, с цветовой кодировкой, указывающей на их конкретную роль в образовании как МАХ-фаз, так и максенов. Рис. 1b и 1c дополнительно иллюстрируют кристаллические структуры трех типичных МАХ-фаз и соответствующих МХене после селективного травления, давая представление о структурной трансформации материала от его исходной фазы до полученного двумерного материала.

На рис. 2 обобщены основные достижения в области технологий синтеза МХене за последние 15 лет с прослеживанием эволюции стратегий изготовления от первоначального открытия в 2011 году до недавних инноваций. В ранних методах в основном использовалось травление фтористоводородной кислотой (HF), в то время как в последующих разработках применяются более безопасные альтернативы без использования фторидов, а также электрохимические методы. Эти развивающиеся подходы отражают постоянные усилия по увеличению объемов выпуска, безопасности, масштабируемости и экологической устойчивости производства максенов.

Многообещающие свойства максенов

Максены выделяются своим уникальным и синергетическим сочетанием свойств, что делает их одним из наиболее перспективных классов материалов в области передовых энергетических технологий. Ключевые характеристики данных материалов включают в себя следующее:

- Высокая электропроводность: максены могут демонстрировать проводимость на уровне металлов, часто соперничая или даже превосходя графен. Это имеет решающее значение для

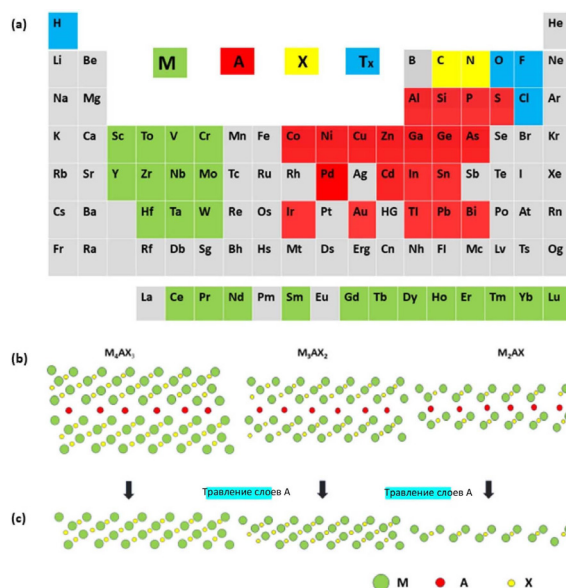


Рис. 1. (а) Периодическая таблица с выделением элементов, используемых в МАХ-фазах и соответствующих им максенов, и цветовой кодировкой, указывающей на их роль в МАХ-фазах и образовании максенов. Схемы трех репрезентативных (b) МАХ-фаз и (c) полученных структур максенов

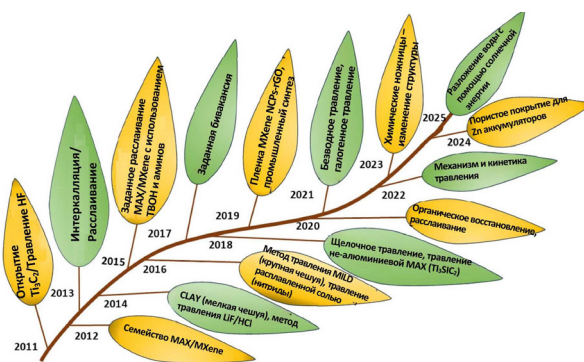


Рис. 2. Достижения в области технологий синтеза максенов за последние 15 лет

применений, требующих быстрый перенос электронов, таких как аккумуляторы, суперконденсаторы и экранирование электромагнитных излучений.

- **Гидрофильность:** в отличие от многих других двумерных материалов, максены обладают гидрофильными поверхностями благодаря наличию концевых функциональных групп, таких как $-\text{OH}$, $-\text{O}$ и $-\text{F}$. Это делает их хорошо совместимыми с водными средами и электролитами, способствуя лучшей диффузии ионов в устройствах хранения энергии.

- **Большая площадь поверхности и слоистая структура:** их двумерная чешуйчатая морфология в сочетании с регулируемым межслойным расстоянием обеспечивает эффективный перенос и хранение ионов. Эти особенности делают максены особенно эффективными в качестве электродов в суперконденсаторах и литий-ионных аккумуляторах.

- **Механическая прочность и гибкость:** максены могут быть изготовлены в виде тонких гибких пленок без ущерба для их структурной целостности. Эта механическая прочность в сочетании с гибкостью открывает возможности для их использования в гибкой и носимой электронике следующего поколения.

- **Настройка химических свойств:** одной из самых мощных характеристик MXene является возможность настраивания химических свойства поверхности. Модифицируя концевые группы или образуя композиты с другими материалами, исследователи могут адаптировать их электронные, оптические и каталитические свойства для различных целевых применений.

Все эти свойства делают максены идеальным кандидатом для технологий хранения энергии, требующих высокой мощности и плотности энергии, быстрой зарядки и разрядки, а также длительного срока службы. Их адаптивность также способствует их интеграции в различные платформы, от систем хранения энергии в масштабах энергосистемы до компактных носимых устройств.

Изготовление максенов из MAX-фаз

Максены обычно синтезируются с использованием нисходящего подхода, который включает в себя селективное травление элемента А из слоистых тройных карбидов или нитридов, известных как MAX-фазы. Этот процесс травления создает двумерные слои переходных металлов с уникальными химическими свойствами и структурами поверхности.

Синтез MAX-фаз

MAX-фазы обычно синтезируются посредством твердофазной реакции, при которой металлические порошки, такие как титан, алюминий и углерод (например, для образования Ti_2AlC), смешиваются и нагреваются в инертной атмосфере до высоких температур (обычно от 1300 до 1600 °C). В результате этого процесса образуются слоистые кристаллические соединения, используемые в качестве прекурсоров для синтеза максенов. Чтобы сделать процесс более энерго- и экономически эффективным, в недавних исследованиях были изучены методы с использованием расплавленной соли, позволяющие значительно снижать требуемую температуру синтеза.

В данном подходе в качестве реакционной среды используются соли, такие, как хлорид натрия (NaCl), позволяющие усиливать атомную диффузию и снижать энергию активации для образования фазы, создавая более благоприятную среду для создания Ti_2AlC . В результате высококачественные МАХ-фазы могут быть синтезированы при относительно более низких температурах, что делает процесс более масштабируемым и устойчивым. Недавние исследования также показали, что добавление избытка Al во время синтеза прекурсора МАХ-фазы Ti_3AlC_2 приводит к образованию зерен $Al-Ti_3AlC_2$, обладающих повышенной кристалличностью и улучшенной стехиометрией углерода. Нанолиты максенов, полученные из этого модифицированного прекурсора ($Al-Ti_3C_2$), демонстрируют превосходное качество, о чем свидетельствует их повышенная стойкость к окислению и значительное улучшение электронной проводимости, достигающей значений 20 000 См/см.

Синтез максенов

- Травление HF. В традиционном методе синтеза максенов для избирательного травления слоя A из МАХ-фазы используется фтористоводородная кислота (HF). Хотя этот метод и эффективен, он предполагает работу с высококоррозионной и токсичной HF, что создает серьезные проблемы с точки зрения безопасности и экологии.

- Получение HF на месте. Более безопасная альтернатива заключается в смешивании фторида лития (LiF) с соляной кислотой (HCl) для получения HF в процессе травления. Такой подход снижает прямое воздействие концентрированной HF, при этом обеспечивая эффективное травление элемента A. На рис. 3 представлена схема процесса травления, в ходе которого слоистые фазы Ti_2AlC МАХ преобразуются в двумерные нанолиты максенов.

Процесс включает в себя избирательное удаление элемента A из структуры МАХ с помощью химических травителей, в результате чего получаются максены с несколькими слоями и поверхностными окончаниями (T_x), такими как $-OH$, $-F$ и $=O$, которые в значительной степени определяют физико-химические свойства получаемого материала.

- Травление без использования фторидов. В более поздних разработках основное внимание было уделено созданию методов, не предполагающих использование фторидов, таких как электрохимическое травление и технологии с использованием расплавленной соли, которые исключают применение фторированных реагентов. Эти методы набирают популярность как более экологичные, масштабируемые и безопасные для окружающей среды.

- Деламинация и эксфолиация. После травления многослойные максены деламинируются на несколько слоев или монослойные чешуйки с помощью органических интеркалянтов (например, DMSO или TBAOH) с последующей мягкой ультразвуковой обработкой (соникацией).

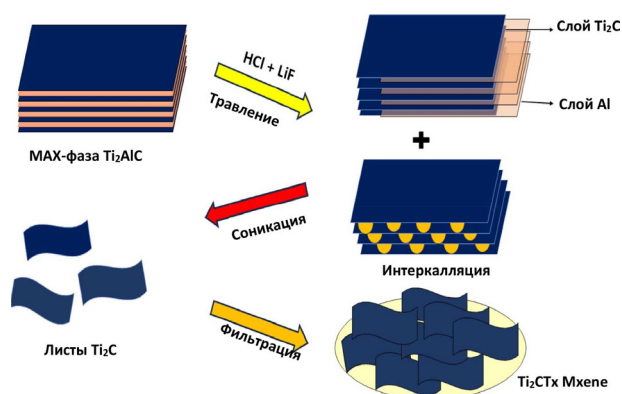


Рис. 3. Схематическая представление процесса травления, посредством которого слоистая МАХ-фаза Ti_2AlC преобразуется в двумерные нанолиты Ti_2C_x максенов. На рисунке показано селективное удаление атомов А-слоя (Al)

Этот этап позволяет увеличить площадь поверхности и улучшает возможность переноса ионов в таких применениях, как суперконденсаторы и аккумуляторы.

Регулируя такие параметры, как время травления, температура, концентрация кислоты и тип интеркалянта, исследователи могут точно контролировать толщину слоя максенов, поверхностные окончания и электрохимические характеристики, что делает этот процесс легко адаптируемым для целевых применений по хранению энергии.

Общие методы определения характеристик

Для определения характеристик максенов обычно требуется сочетание взаимодополняющих методов, позволяющих полностью понять их структуру, состав и химические свойства поверхности. К этим методам относятся:

- Рентгеновская дифракция: используется для отслеживания перехода от МАХ-фаз к максенам путем наблюдения за исчезновением характерных пиков МАХ-фазы и сдвига в дифракционных картинах, указывающих на увеличение межслойного расстояния.
- Сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия: выявляет листообразную морфологию, текстуру поверхности и слоистую структуру максенов в микро- и наномасштабе, подтверждая успешное расслоение.
- Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия: предоставляет подробную информацию о химическом состоянии составляющих элементов и проверяет наличие таких поверхностных окончаний, как $-O$, $-OH$ и $-F$.
- Атомно-силовая микроскопия: измеряет толщину отдельных чешуек и оценивает степень расслоения, позволяя получать топографические данные в наномасштабе.
- Спектроскопия рамановского рассеяния и ИК-Фурье спектроскопия: предоставляет дополнительную информацию о связующих средах и колебательных модах, помогая идентифицировать структурные изменения и функциональные группы, введенные во время синтеза.

Дополнительные методы определения характеристик

Дополнительные методы определения характеристик, такие как *in situ* спектроскопия и микроскопия в реальном времени, позволяют определить поведение максенов в реальном времени во время электрохимических процессов. Эти методы дают ценную информацию о диффузии ионов, кинетике переноса заряда и структурных превращениях, позволяя глубже понять динамическую природу максенов.

Эти методы позволяют исследователям оптимизировать параметры синтеза, проверять качество материалов и сопоставлять структурные особенности с электрохимическими характеристиками, прокладывая путь к разработке целевых применений.

Применение в области хранения энергии

Максены стали универсальными и высокоэффективными материалами, используемыми в различных технологиях хранения энергии. Проявляемое ими уникальное сочетание высокой электропроводности, настраиваемых химических свойств поверхности и слоистой структуры позволяет решать с их помощью ключевые проблемы как в традиционных, так и в новых энергетических устройствах.

- Суперконденсаторы. Максены особенно хорошо подходят для суперконденсаторов, где они обеспечивают исключительно высокую объемную емкость, достигающую 1500 Ф/см^3 , наряду с отличной скоростью заряда. Их проводящие слои, доступные для ионов, обеспечивают быстрые циклы заряда/разряда и проявляют высокую эффективность как в кислотных, так и в нейтральных электролитах.
- Литий-ионные и натрий-ионные аккумуляторы. Использование максенов в качестве анодных материалов позволяет получить высокую обратимую емкость, впечатляющий циклический

ресурс и быструю кинетику заряда. Их регулируемое межслойное расстояние облегчает плавную интеркаляцию и диффузию ионов, что делает их перспективными кандидатами для применения в аккумуляторах следующего поколения.

- Гибридные и твердотельные конденсаторы. В гибридных устройствах хранения энергии, сочетающих высокую плотность энергии аккумуляторов с быстрой отдачей мощности суперконденсаторов, максены служат в качестве превосходных проводящих каркасов. Исследуется также возможность их применения в гелевых и твердотельных электролитах, особенно для гибких и носимых электронных устройств.

- Псевдоемкостные материалы. Некоторые максены хранят энергию не только за счет электростатического разделения зарядов, но и за счет быстрых поверхностных окислительно-восстановительных реакций. Этот механизм, известный как псевдоемкость, значительно повышает емкость хранения энергии по сравнению с обычными двухслойными конденсаторами.

Для дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик исследователи разрабатывают композитные материалы на основе максенов, интегрируя их с такими материалами, как проводящие полимеры, углеродные нанотрубки или оксиды переходных металлов. Эти гибридные электроды обладают синергетическими преимуществами, сочетая в себе проводимость, механическую прочность и окислительно-восстановительную активность, что позволяет раскрыть еще больший потенциал для практического применения данных материалов в системах хранения энергии.

Применение за пределами хранения энергии

Хотя максены широко известны своими выдающимися возможностями по хранению энергии, их уникальные свойства, такие как высокая проводимость, большая площадь поверхности, гидрофильность и настраиваемые поверхностные окончания, также открывают возможности для широкого спектра применений за пределами энергетических технологий

- Экранирование электромагнитных помех. Максены обладают превосходной электропроводностью и могут быть использованы для создания тонких гибких пленок, что делает их высокоэффективными для экранирования электронных устройств от электромагнитных помех. Малый вес и масштабируемость данных материалов делают их идеальным выбором для использования в аэрокосмической и оборонной промышленности, а также в бытовой электронике нового поколения.

- Очистка и опреснение воды. Слоистая структура и поверхностные функциональные группы максенов обеспечивают селективный перенос и адсорбцию ионов. Эти свойства используются в мембранах для удаления из воды тяжелых металлов, солей и органических загрязнений, что открывает многообещающие перспективы для создания доступных и эффективных решений в области водоочистки.

- Сенсорные технологии. Чувствительность максенов к изменениям электрического сопротивления и поверхностным взаимодействиям позволяет использовать их в качестве химических и биосенсоров. Области применения варьируются от обнаружения газа до носимых дозиметров, где решающее значение имеет гибкое и точное зондирование в режиме реального времени.

- Катализ. Максены служат в качестве активных катализаторов или подложек катализаторов для различных химических реакций, включая выделение водорода и восстановление CO_2 . Их высокая поверхностная реакционная способность и регулируемая электронная структура обеспечивают эффективную каталитическую активность, часто сопоставимую с активностью благородных металлов.

- Биомедицинские применения. Биосовместимость, фототермическая реакция и функциональная химия поверхности некоторых максенов вызвали к ним интерес в биомедицинских областях. Начавшиеся исследования направлены на изучения возможности их использование в доставке лекарств, фототермической терапии и антибактериальных покрытиях.

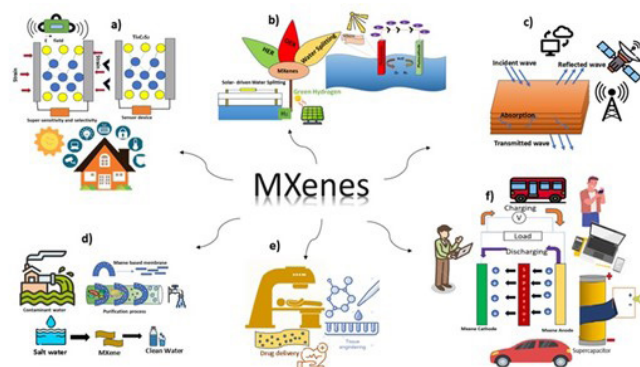


Рис. 4. Схематическое представление многофункциональных применений максенов: (a) датчики на основе максенов для мониторинга окружающей среды и биомедицинского мониторинга; (b) фотокаталитическое и электрокаталитическое расщепление воды; (c) экранирование электромагнитных помех ЭМИ); (d) очистка и опреснение воды; (e) биомедицинское применение, включая доставку лекарств и тканевую инженерию; (f) передовые материалы для электродов в устройствах хранения энергии, таких как суперконденсаторы и аккумуляторы

Эти новые области применения подчеркивают огромный потенциал максенов в различных секторах. По мере продвижения исследований максенов готовы стать ключевыми материалами как в энергетической, так и в неэнергетической сферах, стимулируя инновации во всех отраслях промышленности.

Проблемы и возможности

Несмотря на замечательные перспективы максенов, для полного использования их потенциала в коммерческих и промышленных применениях необходимо решить несколько важных задач. Эти задачи в основном связаны с ограничениями синтеза, проблемами стабильности и разнообразием материалов.

- **Безопасное и масштабируемое производство.** Наиболее широко используемые методы синтеза по-прежнему основаны на применении фтористоводородной кислоты, которая является высококоррозионным и опасным химическим веществом. Несмотря на появление альтернативных методов, не требующих использования фтористоводородной кислоты или позволяющих ее получать в процессе производства, они требуют дальнейшей оптимизации для обеспечения крупномасштабного, экономически эффективного и экологически безопасного производства. Разработка экологически чистых и воспроизводимых протоколов производства является необходимым условием для внедрения этой технологии в промышленность.

- **Окислительная и химическая стабильность.** Максены по своей природе склонны к окислению и деградации поверхности, особенно во влажной или водной среде. Эта нестабильность приводит к снижению электропроводности, ухудшению структуры и деградации со временем эксплуатационных характеристик. Хотя такие стратегии, как пассивация поверхности, защитные покрытия и интеркаляция ионов, показали себя многообещающими, всестороннего понимания механизмов деградации и влияния факторов окружающей среды в различных условиях синтеза пока нет. Повышение химической стабильности имеет решающее значение как для хранения, так и для интеграции устройств.

- **Воспроизводимость и стандартизация протоколов.** Различия в способах синтеза, чистоте прекурсоров и условиях расслоения приводят к нестабильности качества материалов и электрохимических характеристиках. Установление стандартизированных процедур и критериев качества будет иметь решающее значение для воспроизводимости результатов исследований и значимых межлабораторных сравнений.

• Ограниченное разнообразие материалов. Хотя было синтезировано более 30 составов максенов, большинство исследований сосредоточено на Ti_3C_2Tx . Исследование новых прекурсоров МАХ, разработка систем, не основанные на Ti, и создание легированных или сплавных вариантов может привести к получению материалов с новыми свойствами, подходящими для конкретных применений, основанных, например, на использовании таких явлений, как полупроводимость, магнетизм или биосовместимость.

Решение этих задач открывает значительные возможности. Прогресс в области масштабируемого синтеза, проектирования материалов и настройки свойств не только будет способствовать развитию технологий хранения энергии, но и откроет новые возможности для применения данных материалов в области сенсорики, катализа, водоочистки и биомедицины. Будущее максенов зависит от того, удастся ли превратить эти технические барьеры в трамплин для трансформационных инноваций.

Прогноз и перспективы

Максены быстро превратились из научной новинки в одно из самых динамичных и перспективных направлений создания двумерных материалов. Их исключительная структурная настраиваемость, поверхностная функциональность и большое разнообразие состава обеспечивают их уникальную универсальность в широком спектре применений. Хотя их роль в электрохимическом хранении энергии была широко изучена, максены в настоящее время делают значительные успехи в таких новых областях, как экранирование электромагнитных помех, гибкая электроника, катализ, очистка воды, восстановление окружающей среды и биомедицинские технологии.

Для реализации всего потенциала максенов потребуется переход от разработки отдельных материалов к интеграции на системном уровне. Успешное внедрение в реальные устройства, включая твердотельные аккумуляторы, гибридные суперконденсаторы, биосенсоры и мембранные технологии, будет зависеть от скоординированных усилий различных дисциплин. Химики, материаловеды, инженеры и представители промышленности должны работать совместно над разработкой композитов, гетероструктур и гибридных интерфейсов на основе максенов, которые обеспечивали бы высокие эксплуатационные характеристики, долгосрочную стабильность и масштабируемость.

Ожидается, что достижения в области компьютерного моделирования, машинного обучения и высокопроизводительных экспериментов будут играть решающую роль в скорейшем открытии максенов следующего поколения. Эти подходы могут послужить ориентиром для рационального проектирования новых составов, адаптированных к конкретным электронным, каталитическим, оптическим или биомедицинским функциям, что позволит расширить технологический ландшафт максенов далеко за пределы их текущих применений.

В более широком контексте устойчивого развития и цифровых инноваций максены имеют все возможности для поддержки важных глобальных переходов от ископаемого топлива к чистой энергии, от традиционных датчиков к интеллектуальной диагностике и от пассивных материалов к чувствительным многофункциональным системам. Однако для практического внедрения максенов в реальные технологии необходимо преодолеть несколько серьезных проблем. Одной из наиболее актуальных является обеспечение точного контроля стабильности материала на протяжении всего процесса синтеза, от подготовки МАХ-фазы до травления и расслоения. Стабильное качество, масштабируемость производства и экономическая эффективность являются необходимыми условиями для коммерческого внедрения технологий на основе максенов.

Благодаря постоянным инвестициям в фундаментальные исследования, междисциплинарное и научно-промышленное сотрудничество, а также развитию инфраструктуры, максены имеют потенциал стать ключевыми материалами для следующего поколения интеллектуальных, устойчивых и надежных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Naguib M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J., Niu J., Heon M., Hultman L., Gogotsi Y., Barsoum M.W. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 , *Adv. Mater.*, 23, 4248–4253 (2011).
- [2] Anasori B., Lukatskaya M., Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXene) for energy storage, *Nat. Rev. Mater.*, 2, 16098 (2017).
- [3] Lukatskaya M., Kota S., Lin Z., Zhao M.-Q., Shpigel N., Levi M.D., Halim J., Taberna P.-L., Barsoum M.W., Simon P., Gogotsi Y. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides, *Nat. Energy*, 2, 17105 (2017).
- [4] Xu Sh., Wei G., Li J., Han W., Gogotsi Y. Flexible MXene-graphene electrodes with high volumetric capacitance for integrated co-cathode energy conversion/storage devices, *J. Mater. Chem. A*, 5, 17442–17451 (2017).
- [5] Xia Y., Mathis T.S., Zhao M.-Q., Anasori B., Dang A., Zhou Z., Cho H., Gogotsi Y., Yang Sh. Thickness Independent Capacitance of Vertically Aligned Liquid Crystalline MXene, *Nature*, 557, 409–412 (2018).
- [6] Lanyong Yu, Longfeng Hu, Anasori B., Liu Y.-T., Zhu Q., Zhang P., Gogotsi Y., Xu B. MXene-Bonded Activated Carbon as a Flexible Electrode for High-Performance Supercapacitors, *ACS Energy Lett.*, 3, 1597–1603 (2018).
- [7] Zhang J., Zhao Y., Guo X., Chen Ch., Dong Ch.-L., Liu R.-Sh., Han C.-P., Li Y., Gogotsi Y., Wang G. Single platinum atoms immobilized on an MXene as an efficient catalyst for the hydrogen evolution reaction, *Nat. Catal.*, 1, 985–992 (2018).
- [8] Wang X., Mathis T.S., Li K., Lin Z., Vlcek L., Torita T., Osti N.C., Hatter Ch.B., Urbankowski P., Sarycheva A., Tyagi M., Mamontov E., Simon P., Gogotsi Y. Influences from solvents on charge storage in titanium carbide MXene, *Nat. Energy*, 4, 241 (2019).
- [9] Zhang Ch.J., Park S.-H., Seral-Ascaso A., Barwich S., McEvoy N., Boland C.S., Coleman J.N., Gogotsi Y., Nicolosi V. High Capacity Silicon Anodes Enabled by MXene Viscous Aqueous Ink, *Nat. Commun.*, 10, 849 (2019).
- [10] Gogotsi Y., Anasori B. The rise of MXene, *ACS Nano*, 13, 8491–8494 (2019).
- [11] Mohammadi A.V., Rosen J., Gogotsi Y. The world of two dimensional carbides and nitrides (MXene), *Science* 372, eabf1581 (2021).
- [12] Gogotsi Y., Huang Q. MXene: two-dimensional building blocks for future materials and devices, *ACS Nano*, 15, 5775–5780 (2021).
- [13] Murali Dr.G., Modigunta J.K.R., Park Y.H., Lee J.-H., Rawal J., Lee S.-Y., In I., Park S.-J. A Review on MXene Synthesis, Stability, and Photocatalytic Applications, *ACS Nano*, 16(9), 13370–13429 (2022).
- [14] Lim K.R.G., Shekhirev M., Wyatt B.C., Anasori B., Gogotsi Y., She Zh.W. Fundamentals of MXene synthesis, *Nat. Synth*, 1, 601–614 (2022).
- [15] Bibi F., Hanan A., Soomro I.A., Numan A., Khalid M. Double transition metal MXene for enhanced electrochemical applications: Challenges and opportunities, *EcoMat.*, 6(9), e12485 (2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИМРОЗ Мастура — аспирант Лаборатории нанотехнологических исследований Физического факультета Бангладешского университета инженерии и технологий.

БАСИТ Мохаммед Абдул — профессор Лаборатории нанотехнологических исследований Физического факультета Бангладешского университета инженерии и технологий.