

«Сила беспорядка»: новый катализатор помогает обезвреживать почти вечный парниковый газ CF_4



Дата публикации: 04.09.2026

Современный микрочип начинается с технологий, точность которых измеряется нанометрами, но некоторые вещества, необходимые для его производства, оставляют след совсем другого масштаба. Тетрафторметан CF_4 применяется, в частности, при плазменном травлении полупроводниковых пластин. Это чрезвычайно стабильная молекула: прочные связи между углеродом и фтором делают ее полезной для промышленности и одновременно крайне неудобной после завершения технологического процесса.

Попавший в атмосферу CF_4 разрушается исключительно медленно. Его атмосферное время жизни оценивается примерно в 50 000 лет, а потенциал глобального потепления на столетнем горизонте измеряется тысячами эквивалентов CO_2 . Поэтому даже сравнительно небольшие выбросы перфторуглеродов имеют значение для климата. Задача промышленности — разрушить остаточный газ до того, как он покинет систему очистки.

Исследователи KAIST совместно со специалистами Samsung Electronics

предложили необычный способ сделать этот процесс надежнее. Вместо попытки создать максимально простую и упорядоченную структуру они использовали несколько металлов одновременно. Возникший атомный «беспорядок» оказался способом повысить устойчивость катализатора.

Чтобы понять проблему, сначала нужно разобраться, почему CF_4 вообще настолько трудно уничтожить. Связь углерод-фтор относится к наиболее прочным химическим связям. Поэтому для разложения молекулы необходимы жесткие условия. В системах очистки технологических газов могут использоваться высокая температура, водяной пар и катализаторы, которые снижают энергетический барьер реакции.

Однако здесь возникает вторая проблема. В процессе превращений образуются фторсодержащие соединения, включая фтороводород HF , а сочетание фтора, влаги и высокой температуры создает крайне агрессивную химическую среду. Обычный катализатор постепенно изменяется: частицы могут укрупняться, активная поверхность сокращается, а кристаллическая структура перестраивается. Материал все еще находится внутри реактора, но работает уже значительно хуже.

Команда профессора Минки Чоя применила принцип энтропийной стабилизации. Исследователи создали алюминатный материал, в структуре которого равномерно распределены алюминий, цинк, галлий, никель и кобальт. Получился энтропийно-стабилизированный алюминат — ESA.

Почему смесь может оказаться стабильнее более простого вещества? Представьте зал, в котором лежат одинаковые детали конструктора. Им сравнительно легко выстроиться в повторяющийся порядок. Если же перемешать несколько разных типов деталей, организовать их в новую упорядоченную структуру становится сложнее. На атомном уровне аналогия неполна, но передает основную идею: высокая конфигурационная энтропия способна сделать смешанное состояние энергетически выгодным и затруднить нежелательные структурные превращения.

Испытания показали заметную разницу. Собственная каталитическая активность нового материала при разложении CF_4 оказалась примерно в 2,3 раза выше, чем у обычного оксида алюминия. Еще показательнее оказался тест на долговечность при температуре около 800 °C.

За 150 часов конверсия CF_4 на традиционном оксиде алюминия упала примерно с 93 до 48%. Новый материал начал испытание с показателем около 98% и завершил его примерно на уровне 92%. Иными словами, главное преимущество заключалось не только в высокой начальной активности, но и в

способности сохранять ее в агрессивных условиях.

Исследователи попытались выяснить и то, что происходит внутри материала во время реакции. Для этого использовали изотопное мечение кислорода — экспериментальный прием, позволяющий проследить происхождение атомов, участвующих в химическом превращении.

Эксперименты показали любопытный механизм. Сначала в реакции с CF_4 участвует кислород непосредственно из кристаллической решетки катализатора. Возникающий дефицит затем восполняется кислородом из водяного пара. Получается своеобразный химический цикл: материал предоставляет собственный кислород для реакции, а затем восстанавливает его запас из окружающей среды.

Это принципиально важная деталь. Катализатор здесь нельзя представить просто как неподвижную поверхность, на которой сталкиваются чужие молекулы. Его кристаллическая решетка непосредственно участвует в процессе и затем регенерируется. Изотопные эксперименты позволили получить экспериментальное подтверждение механизма, который ранее рассматривался теоретически.

Однако результаты лабораторных и ускоренных испытаний еще не означают, что проблема выбросов CF_4 в полупроводниковой промышленности решена. Для промышленного применения важны масштабирование технологии, стоимость материала, устойчивость при реальном составе отходящих газов, безопасность обращения с побочными продуктами и ресурс установки при длительной эксплуатации.

Потенциал разработки шире одной молекулы. Полупроводниковое производство использует различные фторсодержащие технологические газы, и изменение набора металлов в подобных материалах может позволить адаптировать катализаторы к другим соединениям и условиям.

Самая интересная идея исследования поэтому заключается даже не в конкретной комбинации пяти металлов. Инженеры обычно ассоциируют порядок со стабильностью, но на атомном уровне контролируемый беспорядок способен дать противоположный результат. Если правильно смешать компоненты, сложность структуры становится не недостатком, а защитой от разрушения. В данном случае эта «сила беспорядка» может помочь справиться с молекулой, продолжительность жизни которой в атмосфере несопоставима с продолжительностью человеческой цивилизации.

Ссылка: «Энтропийно-стабилизированные алюминатные катализаторы, которые преодолевают компромисс между активностью и стабильностью при гидролизе CF₄» DOI: [10.1002/anie.6752036](https://doi.org/10.1002/anie.6752036).