

УДК 621.762

ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР КАК ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ РЕАКЦИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА

В. С. ФЕДОРОВ, А. НАСЫРБАЕВ

Научный руководитель Д. С. НИКИТИН, д-р техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Россия

Переход к низкоуглеродной энергетике повышает интерес к водороду как к перспективному энергоносителю. Одним из наиболее экологически привлекательных способов его получения является электрохимическое разложение воды, однако эффективность процесса во многом определяется активностью электрокатализатора. Наиболее эффективные катализаторы в реакции выделения водорода (hydrogen evolution reaction – HER) основаны на благородных металлах, прежде всего на платине, что ограничивает их широкое применение из-за высокой стоимости и ограниченности ресурсов. В связи с этим актуальна разработка углеродных и других недорогих материалов с высокой каталитической активностью [1].

Углеродные наноматериалы характеризуются химической стабильностью, высокой удельной поверхностью, электропроводностью и возможностью управления структурой. Особое значение имеет дефектность углеродной матрицы, поскольку вакансии и искажения графеновых слоев могут выступать активными центрами электрохимических реакций. Плазмодинамический синтез позволяет формировать такие структуры в условиях низкотемпературной неравновесной плазмы и сверхбыстрого охлаждения. В [2] показано, что температура плазменной струи превышает 10^4 К, а скорость охлаждения достигает $10^7...10^8$ К/с, что способствует сохранению метастабильных дефектных состояний.

Синтез углеродных наноматериалов осуществляли в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе с графитовыми электродами. В межэлектродное пространство загружали графитовый порошок чистотой 99,9 % и массой 0,350 г. Разряд осуществляли от ёмкостного накопителя при рабочем напряжении около 1350 В; накопленная энергия составляла 20,90 кДж, амплитудный ток – 95,40 кА, максимальная мощность – 128,33 МВт. Возникающая плазма ускорялась под действием электромагнитных сил и истекала в реакционную камеру, заполненную аргоном при давлении 101 кПа. Быстрое расширение и охлаждение плазмы приводило к конденсации углерода и формированию нанодисперсного продукта.

Структуру продуктов исследовали методами рентгеновской дифрактометрии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Электрокаталитические свойства определяли в трехэлектродной ячейке в 0,5 М H_2SO_4 . Рабочим электродом служил стеклоуглерод с нанесенным слоем материала;

измерения проводили методами линейной и циклической вольтамперометрии. Активность оценивали по перенапряжению при плотностях тока 1, 10 и 100 мА/см² и по тафелевскому наклону. Для повышения активности часть материала модифицировали платиной методом влажной пропитки с использованием H₂PtCl₆.

Рентгенофазовый анализ показал преимущественное формирование графитоподобной углеродной фазы. Уширение и смещение дифракционных максимумов свидетельствуют о нарушении кристаллической структуры. Средний размер областей когерентного рассеяния составил около 12,6 нм. Исследования микроструктуры выявили развитую и неоднородную поверхность, квазидвумерные и нанокристаллические образования, а также дефектные области; размер частиц находился в диапазоне 10...80 нм.

Формирование такой структуры связано с последовательным испарением и ионизацией углерода, образованием малых кластеров, их коагуляцией и последующей закалкой. При охлаждении система не достигает термодинамического равновесия, вследствие чего сохраняются вакансии, краевые участки, искривления графеновых слоев и другие структурные дефекты. Они изменяют локальное электронное состояние углерода и могут формировать центры адсорбции водородсодержащих частиц.

Синтезированный материал проявил собственную активность в HER. Для него тафелевский наклон составил 252 мВ/дек, что указывает на более медленную кинетику по сравнению с платиной. Модификация углеродной матрицы Pt привела к существенному улучшению характеристик. При содержании 5 % Pt перенапряжение при 10 мА/см² снизилось до 65 мВ, а тафелевский наклон – до 82 мВ/дек. При 10 % Pt достигнуты 19 мВ и 32 мВ/дек соответственно; при 100 мА/см² перенапряжение составило 92 мВ. Таким образом, увеличение содержания Pt обеспечивает наиболее выраженное ускорение кинетики реакции.

Высокая активность композита обусловлена совместным действием высокодефектной углеродной основы и дисперсной Pt. Межфазное взаимодействие Pt–C дополнительно влияет на электронное состояние каталитических центров и энергию связывания водорода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-79-10179, <https://rscf.ru/project/26-79-10179/>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A brief review on plasma for synthesis and processing of electrode materials / B. Ouyang, Y. Zhang, X. Xia [et al.] // *Materials Today Nano*. – 2018. – Vol. 3. – P. 28–47.
2. **Boulos, M. I.** Thermal Plasma Processing / M. I. Boulos // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 1991. – Vol. 19, № 6. – P. 1078–1089.