

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕКСАМЕТИЛЕНДИАМИНА С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ СИНТЕЗИРОВАННЫМ ОКСИДОМ ГРАФЕНА

С.В. Брудник, А.З. Бекешев, Е.В. Яковлева, А.В. Яковлев,
А.А. Алферов, О.Г. Неверная, А.С. Мостовой, В.Н. Целуйкин

Сергей Витальевич Брудник (ORCID 0000-0001-7093-6494), Андрей Васильевич Яковлев (ORCID 0000-0002-3542-1927), Андрей Алексеевич Алферов (ORCID 0000-0003-2610-9365)

Кафедра химии и химической технологии материалов, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, ул. Политехническая, 77, Саратов, Российская Федерация, 410054
E-mail: sbrudraboch@gmail.com, aw_71@mail.ru*, andrey_080202@mail.ru

Амирбек Зарлыкович Бекешев (ORCID 0000-0002-7038-4631)

Кафедра физики, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, просп. Алии Молдагуловой, 34, Актобе, Казахстан, 030000
E-mail: Amirbek2401@gmail.com

Елена Владимировна Яковлева (ORCID 0000-0002-8489-9804)

Кафедра экологии и техносферной безопасности, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, ул. Политехническая, 77, Саратов, Российская Федерация, 410054
E-mail: elenayakovleva1977@list.ru

Ольга Геннадьевна Неверная (ORCID 0000-0001-7644-7747), Антон Станиславович Мостовой (ORCID 0000-0003-2828-9988)

Кафедра естественных и математических наук, Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, пл. Свободы, 17, Энгельс, Саратовская обл., Российская Федерация, 413100
E-mail: olga19081969@yandex.ru, mostovoy19@rambler.ru

Виталий Николаевич Целуйкин (ORCID 0000-0002-7977-5823)

Кафедра технологии и оборудования химических, нефтегазовых и пищевых производств, Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, пл. Свободы, 17, Энгельс, Саратовская обл., Российская Федерация, 413100
E-mail: tseluikin@mail.ru

Многослойный оксид графена (ОГ) был получен методом электрохимического окисления дисперсного графита в серной кислоте и модифицирован путем химического взаимодействия с гексаметилендиамином (ГМДА). Взаимодействие оксида графена с гексаметилендиамином протекает по механизму нуклеофильного замещения между амино группой ГМДА и эпоксидными группами -С-О-С- ОГ. По результатам сканирующей электронной микроскопии структура частиц ГМДА-ОГ представлена хаотично распределенными частицами, в отличие от агрегированных кластеров частиц многослойного ОГ. При модификации гексаметилендиамином происходит частичное восстановление многослойного оксида графена и увеличивается деформация поверхности углеродных частиц. На ИК спектре ОГ наблюдаются пики, соответствующие колебаниям гидроксильных групп, также находящихся между графеновыми слоями, пик С=О группы, пик, соответствующий sp^2 -гибридации С=С в структуре графена, полоса деформационных колебаний связей эпоксидных групп и -СООН групп. В ИК спектре ГМДА-ОГ наблюдаются пики при 1534 см^{-1} и 1248 см^{-1} , соответствующие деформационным колебаниям С-N фрагмента, и широкий пик деформационных колебаний при 1100 см^{-1} (С-N растяжение). На рентгенограмме ОГ регистрируется сигнал с максимумом пика при $2\theta = 11,86^\circ$, соответствующий дифракционному индексу плоскости (001) оксида графена. Рефлекс при $2\theta = 26,12^\circ$ соответствует графитовой фазе (002), однако на дифрактограмме ГМДА-ОГ пик фазы оксида графена (001) отсутствует. В спектре комбинационного рассеивания ОГ присутствует

D - полоса при 1355 см^{-1} , характеризующая дефектность структуры. *G* – полоса описывает колебания системы sp^2 углеродных связей (1610 см^{-1}). Увеличение интенсивности полосы *D* по сравнению с полосой *G* указывает на увеличение количества неупорядоченной фазы в ОГ. Отношение интенсивностей ID/IG показывает меру неупорядоченности структуры, так для ОГ $ID/IG = 0,87$. В спектре комбинационного рассеивания ГМДА-ОГ наблюдается смещение пиков по сравнению с ОГ, присутствует *D* – полоса с максимумом пика $\sim 1348\text{ см}^{-1}$ и *G* – полоса с максимумом 1588 см^{-1} . *G* полоса ГМДА-ОГ смещена в сторону меньших волновых чисел, что подтверждает наличие дефектов в графеновых слоях. Отношение интенсивностей полос $ID/IG = 1,35$.

Ключевые слова: оксид графена, электрохимический синтез, гексаметилендиамин, модификация

INTERACTION OF HEXAMETHYLENEDIAMINE WITH ELECTROCHEMICALLY SYNTHESIZED GRAPHENE OXIDE

S.V. Brudnik, A.Z. Bekeshev, E.V. Yakovleva, A.V. Yakovlev,
A.A. Alferov, O.G. Nevernaya, A.S. Mostovoy, V.N. Tseluykin

Sergey V. Brudnik (ORCID 0000-0001-7093-6494), Andrey V. Yakovlev (ORCID 0000-0002-3542-1927)*,
Andrey A. Alferov (ORCID 0000-0003-2610-9365)

Department of Chemistry and Chemical Technology of Materials, Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Politekhnikeskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia

E-mail: sbrudraboch@gmail.com, aw_71@mail.ru *, andrey_080202@mail.ru

Amirbek Z. Bekeshev (ORCID 0000-0002-7038-4631)

Department of Physics, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aliya Moldagulova ave., 34, Aktobe, 030000, Kazakhstan

E-mail: Amirbek2401@gmail.com

Elena V. Yakovleva (ORCID 0000-0002-8489-9804)

Department of Ecology and Technosphere Safety, Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Politekhnikeskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia

E-mail: elenayakovleva1977@list.ru

Olga G. Nevernaya (ORCID 0000-0001-7644-7747), Anton S. Mostovoy (ORCID 0000-0003-2828-9988)

Department of Natural and Mathematical Sciences, Engels Institute of Technology (branch) of Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Svobody sqr., 17, Engels, Saratov reg., 413100, Russia

E-mail: olga19081969@yandex.ru, mostovoy19@rambler.ru

Vitaly N. Tseluykin (ORCID 0000-0002-7977-5823)

Department of Technology and Equipment for Chemical, Oil and Gas and Food Industries, Engels Institute of Technology (branch) of Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Svobody sqr., 17, Engels, Saratov reg., 413100, Russia

E-mail: tseluikin@mail.ru

Multilayer graphene oxide (GO) was obtained by electrochemical oxidation of dispersed graphite in sulfuric acid and modified by chemical interaction with hexamethylenediamine (HMDA). The interaction of graphene oxide with hexamethylenediamine proceeds by the mechanism of nucleophilic substitution between the amino group of HMDA and epoxy groups -C-O-C-OG. According to the results of scanning electron microscopy, the structure of HMDA-GO particles is represented by randomly distributed particles, in contrast to agglomerated clusters of multilayer GO particles. When modified with hexamethylenediamine, the multilayer graphene oxide is partially reduced and the deformation of the surface of carbon particles increases. The IR spectrum of GO shows peaks corresponding to vibrations of hydroxyl groups, also located between graphene

layers, a peak of the C=O group, a peak corresponding to the sp^2 hybridization of C=C in the graphene structure, a band of bending vibrations of the bonds of epoxy groups and -COOH groups. In the IR spectrum of HMDA-GO there is a peak at 1534 cm^{-1} and 1248 cm^{-1} corresponding to the bending vibrations of the C-N fragment and a broad peak of bending vibrations at 1100 cm^{-1} (C-N stretching). The X-ray diffraction pattern of GO shows a signal with a peak maximum at $2\theta = 11.86^\circ$ corresponding to the diffraction index of the (001) plane of graphene oxide. The reflection at $2\theta = 26.12^\circ$ corresponds to the (002) graphite phase; however, the graphene oxide (001) phase peak is absent in the HMDA-GO diffraction pattern. In the Raman spectrum of GO, there is a D - band at 1355 cm^{-1} , which characterizes the defectiveness of the structure. G is a band that describes vibrations of the sp^2 system of carbon bonds (1610 cm^{-1}). An increase in the intensity of the D band compared to the G band indicates an increase in the amount of the disordered phase in GO. The intensity ratio ID/IG shows a measure of disorder in the structure, so for GO ID/IG = 0.87. The Raman spectrum of HMDA-GO shows a shift of peaks compared to GO, there is a D band with a peak maximum of $\sim 1348\text{ cm}^{-1}$ and a G band with a maximum of 1588 cm^{-1} . The G band of the HMDA-GO is shifted towards lower wavenumbers, which confirms the presence of defects in the graphene layers. Band intensity ratio ID/IG is 1.35.

Key words: graphene oxide, electrochemical synthesis, hexamethylenediamine, modification

Для цитирования:

Брудник С.В., Бекешев А.З., Яковлева Е.В., Яковлев А.В., Алферов А.А., Неверная О.Г., Мостовой А.С., Целуйкин В.Н. Взаимодействие гексаметилендиамина с электрохимически синтезированным оксидом графена. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 8 С. 63–69. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6867.

For citation:

Brudnik S.V., Bekeshev A.Z., Yakovleva E.V., Yakovlev A.V., Alferov A.A., Nevernaya O.G., Mostovoy A.S., Tseluykin V.N. Interaction of hexamethylenediamine with electrochemically synthesized graphene oxide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 8. P. 63–69. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6867.

ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия графена [1], актуальность развития научной составляющей данной аллотропной модификации углерода остается на высоком уровне. В особенности развитие химии графеновых производных, одной из таких графеновых форм является оксид графена (ОГ) [2]. Одним из способов изменения функциональных свойств ОГ является ковалентная или нековалентная модификация ОГ [3-5], что имеет существенное значение для создания различных композиционных материалов [6, 7]. Интерес к дериватизации ОГ вызван широкими возможностями регулирования химических и физических свойств материала, которые обусловлены внедрениями определенного типа количества как органических функциональных групп на базальной плоскости и на краевых участках ОГ, так и неорганических соединений [8-11]. Значительный интерес по изменению строения поверхности ОГ представляет модификация органическими структурами, содержащими аминогруппу, в особенности алифатическими и/или ароматическими аминами [12-14].

Так в работе [15] описан синтез методом двухстадийной жидкофазной обработки бромной

кислотой и раствором аммиака. С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии была определена степень аминирования полученного аминированного оксида графена, которая составила около 4 ат.%, отношение C/O достигает 8,8. Авторами описывается химическая реакционная способность введенных аминных групп, что подтверждается успешным испытанием ковалентной модификации полученного аминированного графена с 3-хлорбензоилхлоридом.

В работе Chakraborty S. и др. была [16] показана возможность аминирования ОГ методом одностадийного синтеза с использованием короткоцепочечного алкиламина *n*-бутиламина без использования токсичных перкураторов таких, как тионил/ацилхлориды. Способ также исключает протекание стадии восстановления других функциональных групп ОГ. Наличие азота на поверхности оксида графена было подтверждено с помощью методов энергодисперсионного анализа и рентгенофотоэлектронной спектроскопии (XPS). XPS спектр N1s дополнительно подтвердил, что азот действительно находится в форме вторичного амина и амида, на основании чего авторами была предложена модель механизма реакции.

Авторами [17] описана одностадийная методика функционализации оксида графена ароматическими и неароматическими аминами, такими как дибензиламин, *n*-фенилендиамин, диизопропиламин и пиперидин с использованием микроволновой реакции. Синтезированные амин-функционализированные материалы оксида графена (амин-ОГ) были охарактеризованы с помощью спектроскопических методов, включая XRD, FTIR, ^{13}C NMR, XPS, ТЕМ и термогравиметрического анализа (TGA). Сравнительная характеристика анализов подтвердила функционализацию для всех аминов, достигаются относительно высокие поверхностные атомные концентрации азота до 8,8%. Введение азотсодержащих фрагментов не только изменяет функциональные возможности ОГ, но также химические, оптические и электронные свойства, за счет замещения кислородсодержащих групп на азотсодержащие фрагменты.

Данная работа посвящена исследованию условий синтеза и возможностям функционализации электрохимически синтезированного оксида графена гексаметилендиамином (ГМДА).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В исследованиях использовался дисперсный порошок графита российского производства (стандарт IG-GNP-1). Электрохимические измерения проводились на потенциостате P-150x (ООО «Элинс», Россия) в трехэлектродной ячейке с использованием платиновых катода и токоотвода анода. Электродные потенциалы измерялись относительно ртутносulfатного ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$) электрода сравнения. В качестве электролита для электрохимического окисления графита использовалась 83% H_2SO_4 , полученная путем последовательного разбавления бидистиллированной водой концентрированной серной кислоты квалификации ОСЧ (ГОСТ 14262-78). Электрохимически окисленный графит синтезировали в гальваноста-

тическом режиме током $200 \text{ mA} \cdot \text{г}^{-1}$ графита с сообщением системе электроэнергии $0,7 \text{ A} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$. Затем полученный окисленный графит промывали в бидистиллированной воде ($t = 15-18 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение 15 мин для удаления остаточных сернокислых соединений. Электрохимически полученный многослойный оксид графена (0,1 г) диспергировали в 10 мл N,N-диметилформамида с помощью ультразвуковой обработки в ультразвуковой ванне STEGLER 5 DT (частота 40 КГц) при $25 \text{ }^\circ\text{C}$, в течение 2 ч. Полученную дисперсию кипятили при $90 \text{ }^\circ\text{C}$ с использованием обратного холодильника 0,3 г 1,3-дициклологексилкарбодиимида и 1 г ГМДА, в течение 10 ч. Полученный ГМДА-ОГ фильтровали и промывали в 100 мл дистиллированной воды и 100 мл этанола, сушили при $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для регистрации дифрактограммы ОГ и ГМДА-ОГ использовали прибор ARL X'TRA (Thermo Scientific, Ecublens, Швейцария) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 0,15412 \text{ nm}$). Дифрактограммы регистрировали в диапазоне 2θ от 5° до 40° со скоростью сканирования $2^\circ/\text{мин}$. Исследование поверхности и структуры частиц наноструктурированного графита осуществляли при помощи сканирующего электронного микроскопа со встроенным энергодисперсионным анализом EXplorer (ASPEX, Framingham, MA, USA). Инфракрасную Фурье-спектроскопию (FTIR) проводили на FTIR-спектрометре FT-801 (Simex, Новосибирск, Россия) в диапазоне $4000-500 \text{ cm}^{-1}$, при комнатной температуре. Спектры комбинационного рассеяния были записаны с использованием рамановского спектрометра Renishaw InVia Reflex (Wotton-under-Edge, England, UK), оснащенного ПЗС-детектором RenCam с воздушным охлаждением. В качестве источника возбуждения использовалась лазерная линия с длиной волны 532 нм. Для записи спектров использовалось время воздействия 60 с при мощности 1%.

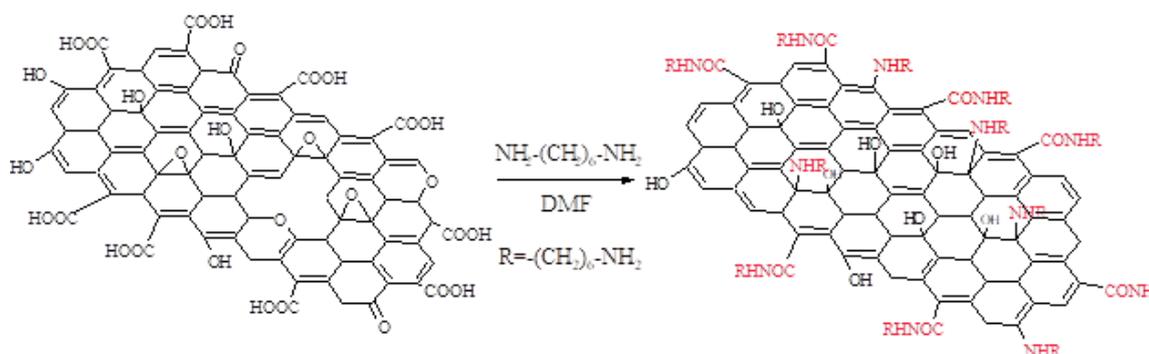


Рис. 1. Схема модифицированного оксида графена гексаметилендиамином
Fig. 1. Scheme for obtaining the modification of graphene oxide with hexamethylenediamine

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оксид графена (многослойный) был получен методом электрохимического (анодного) окисления дисперсного графита в серной и азотной кислоте [18, 19]. Модификацию поверхности проводили с помощью химического взаимодействия ГМДА и электрохимически синтезированного оксида графена (ОГ). Вероятное взаимодействие оксида графена с гексаметилендиамином протекает по механизму нуклеофильного замещения между амино группой ГМДА и эпоксидными группами -С-О-С- ОГ, вторым возможным процессом является амидирование карбоксильных групп ОГ.

Для идентификации строения и исследования свойств синтезированного ОГ и ГМДА-ОГ использовали методы ИК-, ИК-КР спектроскопии, рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

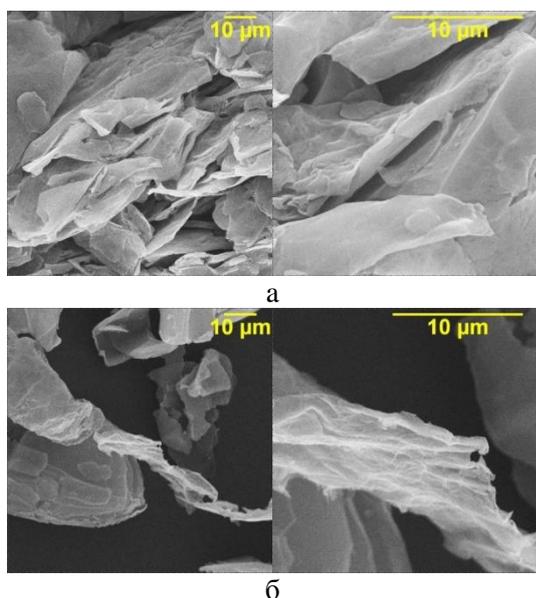


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия: а) оксида графена; б) оксида графена, модифицированного гексаметилендиамином

Fig. 2. Scanning electron microscopy: а) graphene oxide; б) graphene oxide modified with hexamethylenediamine

По результатам сканирующей электронной микроскопии (рис. 2б) структура частиц ГМДА-ОГ представлена хаотично распределенными частицами с толщиной менее 10 нм и площадью около 10 мкм², в отличие от агрегированных кластеров частиц многослойного ОГ синтезированного электрохимическим методом (рис. 2а). Можно предположить, что при модификации гексаметилендиамином происходит частичное восстановление многослойного оксида графена, так как наличие поверх-

ностных кислородных групп способствует агрегации частиц. Кроме того, после взаимодействия с гексаметилендиамином увеличивается деформация поверхности углеродных частиц.

На ИК спектре ОГ наблюдается интенсивный пик при 3481 см⁻¹ (рис. 3), соответствующий колебаниям гидроксильных групп, также находящихся между графеновыми слоями (пик ~ 3300 см⁻¹). Пик при 1635 см⁻¹ обусловлен наличием sp²-гибридизации С=С в структуре графена. Широкая полоса ~ 1103 см⁻¹ соответствует деформационным колебаниям связей эпоксидных групп [20]. Полоса при 1350 см⁻¹ представляет собой деформационное колебание -СООН групп. В ИК спектре ГМДА-ОГ пик, соответствующий колебаниям гидроксильных групп, смещается в область ~3400 см⁻¹, пик при 1635 см⁻¹ смещается к 1602 см⁻¹, пики при 1711 и 1103 см⁻¹ не наблюдаются, что возможно свидетельствует о восстановлении карбонильных и эпоксидных групп. В ИК спектре ГМДА-ОГ наблюдаются пики при 1534 см⁻¹ и 1248 см⁻¹, соответствующие деформационным колебаниям С-N фрагмента, и широкий пик деформационных колебаний при 1100 см⁻¹ (С-N растяжение).

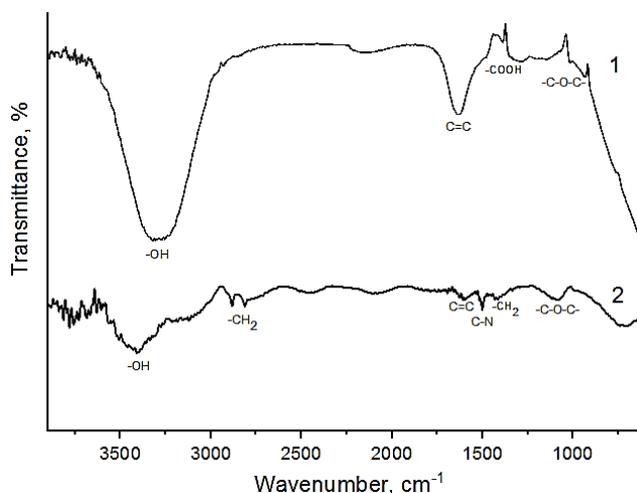


Рис. 3. ИК-Фурье спектры: 1) оксид графена; 2) оксид графена, модифицированного гексаметилендиамином
Fig. 3. IR-spectra: 1) graphene oxide; 2) graphene oxide modified with hexamethylenediamine

Результаты РФА показывают (рис. 4), что на рентгенограмме ОГ регистрируется сигнал с максимумом пика при $2\theta = 11,86^\circ$, соответствующий дифракционному индексу плоскости (001). Рефлекс при $2\theta = 26,12^\circ$ соответствует графитовой фазе (002), однако на дифрактограмме ГМДА-ОГ пик фазы оксида графена (001) отсутствует, присутствует раздвоенный пик при $2\theta = 25,7^\circ$, соответствующий дефектной фазе амидированной формы

оксида графена, рефлекс графитовой фазы сохраняется.

В спектре комбинационного рассеивания ОГ (рис. 5) присутствует D – полоса при 1355 см^{-1} , характеризующая дефектность структуры, и G – полоса, которая описывает колебания системы sp^2 углеродных связей (1610 см^{-1}). Увеличение интенсивности полосы D по сравнению с полосой G указывает на увеличение количества неупорядоченной фазы в ОГ. В отличие от ИК-КР спектров графитов, для ОГ полоса D более интенсивна, чем полоса G, что связано с образованием sp^3 - гибридных связей в результате окисления графита [21]. Отношение интенсивностей I_D/I_G показывает меру неупорядоченности структуры, так для ОГ $I_D/I_G = 0,87$.

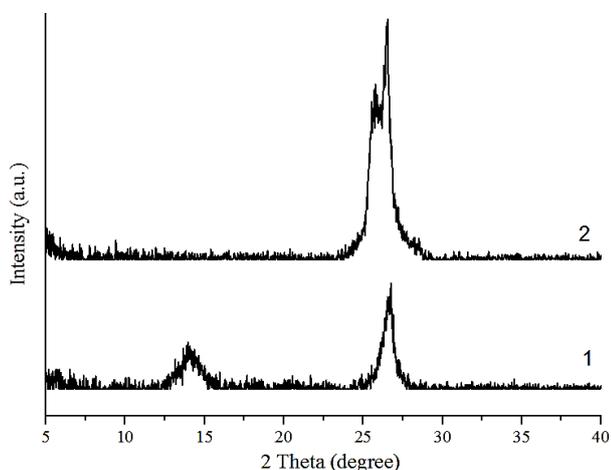


Рис.4. Дифрактограммы :1) оксида графена; 2) оксида графена модифицированный гексаметилендиамином
 Fig.4. X-Ray diffraction patterns: 1) graphene oxide; 2) graphene oxide modified with hexamethylenediamine

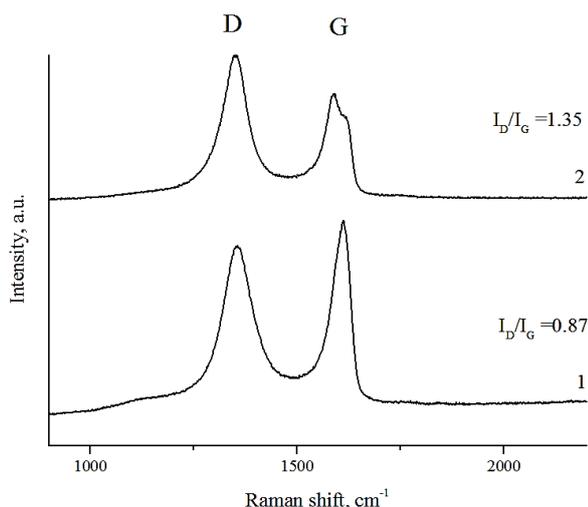


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеивания: 1) оксид графена; 2) оксид графена, модифицированного гексаметилендиамином
 Fig. 5. Raman spectra: 1) graphene oxide; 2) graphene oxide modified with hexamethylenediamine

В спектре комбинационного рассеивания ГМДА-ОГ наблюдается смещение пиков по сравнению с ОГ, присутствует D – полоса с максимумом пика $\sim 1348\text{ см}^{-1}$ и G – полоса с максимумом 1588 см^{-1} . G полоса ГМДА-ОГ смещена в сторону меньших волновых чисел, что подтверждает наличие дефектов в графеновых слоях в результате удаления кислорода и восстановления графитовой структуры [21]. Отношение интенсивностей полос $I_D/I_G = 1,35$. По сравнению с ОГ отношение I_D/I_G ГМДА-ОГ увеличилось из-за увеличения количества углерода sp^2 возможно в результате химического восстановления. Наличие плечевого пика справа от G-полосы в ГМДА-ОГ, вероятно, связано с наличием дефектных графитовых структур, образовавшихся в ходе процессов химической модификации гексаметилендиамином.

ВЫВОДЫ

Исследована возможность химической редокс модификации электрохимически синтезированного многослойного оксида графена гексаметилендиамином. Установлено, что в результате модификации сокращается количество кислородсодержащих функциональных групп на поверхности многослойного оксида графена и появляются аминогруппы, что подтверждено методом ИК-Фурье спектроскопией. Также отмечено увеличение дефектности углеродных частиц. Оксид графена, модифицированный гексаметилендиамином, может быть перспективным материалом для создания катализаторов водородных топливных элементов, суперконденсаторов, мультисенсорных систем и в качестве соотверждающего агента для эпоксидных нанокompозитов.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Это исследование было профинансировано Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR18574094).

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. BR18574094).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. **Novoselov K.S., Fal'ko V.I., Colombo L., Gellert P. R., Schwab M.G., Kim K.** // *Nature*. 2012. V. 490. N 7419. P. 192-200. DOI: 10.1038/nature11458.
2. **Perrozzi F., Prezioso S., Ottaviano L.** // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2014. V. 27. P. 013002. DOI:10.1088/0953-8984/27/1/013002.
3. **Yu W., Sisi L., Haiyan Y., Jie L.** // *RSC Adv*. 2020. V. 10. N 26. P. 15328-15345. DOI: 10.1039/D0RA01068E.
4. **Guo S., Nishina, Y., Bianco A., Ménard-Moyon C.** // *Angew. Chem. Internat. Ed*. 2020. V. 59. N 4. P. 1542-1547. DOI: 10.1002/anie.201913461.
5. **Huang G., Chen Z., Li M., Yang B., Xin M., Li S., Yin Z.** // *Acta Chimica Sinica*. 2016. V. 74. N 10. P. 789. DOI: 10.6023/A16070360.
6. **Razaq A., Bibi F., Zheng X., Papadakis R., Jafri S. H. M., Li H.** // *Materials*. 2022.V. 15. N 3. P. 1012. DOI: 10.3390/ma15031012.
7. **Keyte J., Pancholi K., Njuguna J.** // *Frontiers Materials*. 2019. V. 6. P. 224. DOI: 10.3389/fmats.2019.00224.
8. **Ryu S.H., Sin J.H., Shanmugaraj A.M.** // *Eur. Polym. J.* 2014. V. 52. P. 88-97. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2013.12.014.
9. **Lee D.E., Lee G.H., Son N.R., Zhang H.X., Yoon K.B.** // *Iranian Polym. J.* 2023. V. 32. P. 1-12. DOI: 10.1007/s13726-022-01119-8.
10. **Garkoti C., Shabir J., Mozumdar S.** // *Chem. Select*. 2020. V. 5. N 14. P. 4337-4346. DOI: 10.1002/slct.202000336.
11. **Gan C., Liang T., Li W., Fan X., Zhu M.** // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 491. P. 105-115. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.06.141.
12. **Wang H., Liu X., Yang Z., He H., Shao X., Bai. R.** // *Polym. Polym. Comp.* 2020. V. 28. N 6. P. 421-432. DOI: 10.1177/09673911198872.
13. **Hosseini Y., Najafi M., Khalili, S., Jahanshahi M., Peyravi M.** // *Mater. Chem. Phys.* 2021. V. 270. P. 124788.
14. **Lee H. J., Abdellah A., Ismail F. M., Gumeci C., Dale N., Parrondo J., Higgins D.C.** // *Electrochim. Acta*. 2021. V. 397. P. 139241. DOI: 10.1016/j.electacta.2021.139241.
15. **Sierra U., Cuara E., Mercado A., Diaz-Barriga E., Bahena A., Cortés A., Fernández, S.** // *Appl. Nanosci.* 2021. V. 11. P. 1637-1649. DOI: 10.1007/s13204-021-01798-4.
16. **Chakraborty S., Saha S., Dhanak V.R., Biswas K., Barbezat M., Terrasi G.P., Chakraborty A.K.** // *RSC Adv*. 2016. V. 6. N 72. P. 67916-67924.
17. **Caliman C.C., Mesquita A.F., Cipriano D.F., Freitas J.C.C., Cotta A.A.C., Macedo W.A.A., Porto A.O.** // *RSC Adv*. 2018. V. 8. N 11. P. 6136-6145. DOI: 10.1039/C7RA13514A.
18. **Yakovlev A.V., Yakovleva E.V., Tseluikin V.N., Krasnov V.V., Mostovoy A.S., Vikulova M.A., Frolov I.H., Rakhmetulina L.A.** // *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. V. 93. N 2. P. 219-224. DOI: 10.1134/S1070427220020093.
19. **Яковлева Е.В., Яковлев А.В., Мостовой А.С., Целуйкин В.Н., Фролов И.Н.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 59-65.
Yakovleva E.V., Yakovlev A.V., Mostovoy A.S., Tseluikin V.N., Frolov I.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 59-65. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6324.
20. **Lavin-Lopez M. P., Paton-Carrero A., Sanchez-Silva L., Valverde J.L., Romero A.** // *Adv. Powder. Technol.* 2017. V. 28. N 12. P. 3195-3203. DOI: 10.1016/j.apt.2017.09.032.
21. **Muzyka R., Drewniak S., Pustelny T., Chrubasik M., Gryglewicz G.** // *Materials*. 2018. V. 11. N 7. P. 1-15. DOI: 10.3390/ma11071050.

Поступила в редакцию 12.04.2023

Принята к опубликованию 09.05.2023

Received 12.04.2023

Accepted 09.05.2023