## \_\_\_ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ \_ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ \_\_\_\_

УДК 542.86:537.8.029

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ ТЕРМОВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФИТА И ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

© 2020 г. Г. В. Симбирцева<sup>1\*</sup>, Н. П. Пивень<sup>1</sup>, С. Д. Бабенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Черноголовка, Россия \*E-mail: ural@binep.ac.ru Поступила в редакцию 04.03.2020; после доработки 21.04.2020; принята в печать 20.05.2020

Рассмотрено влияние отжига порошков термически восстановленного оксида графита на их электропроводность и плотность при давлении до 7 МПа. Определена удельная поверхность порошков при различных температурах отжига. Измерены комплексные диэлектрические проницаемости эпоксидных композитов с указанными порошками в качестве наполнителей на частотах 1.7, 2.9 и 9.8 ГГц. Полученное среднее значение тангенса угла диэлектрических потерь для исследованных композитов в указанном диапазоне частот превышает соответствующее среднее значение для композитов с природным графитом в качестве наполнителя в 5–6 раз.

*Ключевые слова:* термовосстановленный оксид графита, электропроводность, эпоксидные композиты, комплексная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь. **DOI:** 10.31857/S0207401X20120146

### введение

Способность материала поглощать электромагнитное излучение (ЭМИ) описывается частотной зависимостью комплексной диэлектрической проницаемости (КДП)  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)$ , где j – мнимая единица, а  $\varepsilon'(\omega)$  и  $\varepsilon''(\omega)$  – действительная и мнимая части, характеризующие диэлектрические поляризацию и потери в композите, с соответствующим тангенсом угла диэлектрических потерь  $tg\delta = \varepsilon''/\epsilon'$ . Для эффективных радиопоглощающих материалов (РПМ) требуются материалы с высокими диэлектрическими потерями (ε") при малых значениях действительной части (є) диэлектрической проницаемости с tgδ больше 0.1 [1]. Для композиционных материалов КДП сильно зависит от электропроводности и удельной поверхности наполнителя, формы, размера и распределения частиц наполнителя в матрице [2-5].

В связи с этим повышенный интерес проявляется к наполнителям, содержащим анизотропные наноразмерные углеродные материалы, так как они имеют почти на порядок меньший порог перколяции по сравнению с частицами, имеющими сферическую форму [6, 7]. Это позволяет уменьшить концентрацию наполнителя (до 2 мас.% и менее) в композите при тех же значениях КДП, улучшить термические и физико-механические свойства наноразмерных композитов [8] и уменьшить весовые характеристики радиопоглощающих материалов на их основе.

Известно о значительном изменении диэлектрических и радиопоглощающих свойств различных композитов после введения в них углеродных нанотрубок и нановолокон [7, 9, 10]. В последние годы большое внимание уделяется влиянию добавок других графеноподобных материалов (ГПМ) на механические и электрофизические свойства полимерных и керамических композиционных материалов.

Одним из наиболее перспективных способов получения ГПМ является восстановление оксида графита (ОГ), позволяющее получать наполнитель в необходимых количествах [11-13]. Исследования диэлектрических свойств химически восстановленного ОГ в микроволновой области [1] показали, что в отличие от графита восстановленный оксид графена имеет две дополнительные области диэлектрической релаксации, обусловленные наличием дефектов и диполей, и по поглощающим свойствам превосходит углеродные нанотрубки (УНТ) и графит. В работе [14] проведено сравнение электрической проводимости различных углеродных материалов: УНТ, графен, углеродная чернь и графит, широко используемых в качестве наполнителей в полимерных матрицах.

Электрофизические свойства ГПМ и композитов сильно зависят от способа их получения. В работе [15] исследованы проводимости и диэлектрические характеристики ГПМ, полученные восстановлением ОГ разными методами. Наиболее высокие значения электропроводности показали композиты с ГПМ при химическом восстановлении борогидридом натрия (NaBH<sub>4</sub>) и моногидратом гидразина (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O), которые после прессования при давлении 50 МПа достигают ~10 См/м. Проведенные ранее в нашей лаборатории исследования микроволновых свойств эпоксидных композитов с ГПМ, функционализированными аминами [16], показали высокие значения tg $\delta$  = 1.4 при  $\epsilon$ ' = 9.5 и для концентрации функционализированного триэтилентетрамином наполнителя в количестве 4 мас.%.

Практически отсутствуют работы по исследованию диэлектрических свойств эпоксидных композиционных материалов, наполненных термовосстановленным оксидом графита (ТВОГ). В работе [17] исследованы диэлектрические свойства эпоксидных композитов с добавками порошков ТВОГ на частоте 9.8 ГГц и показано, что на величину КДП большое влияние оказывает их удельная поверхность. При этом предварительное насыщение ОГ парами ацетона с последующим термовосстановлением практически не влияет на электропроводность порошков и диэлектрические характеристики композитов.

Данная работа является продолжением работ [16, 17]. Исследовалось влияние отжига на электропроводность, плотность и удельную поверхность порошков ТВОГ. Приводятся результаты исследований диэлектрических свойств эпоксидных композитов на частотах 1.7, 2.9 и 9.8 ГГц с наполнителями, полученными путем термовосстановления ОГ, в том числе предварительно насыщенными парами уксусной кислоты с целью большего расщепления графеновых слоев за счет дополнительно образующихся газов.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Малослойный оксид графита получали путем окисления природного графита марки ГК-1 (размер частиц ~30 мкм, содержание углерода не менее 99 мас.%, содержание золы не более 1 мас.%, ГОСТ 4404-78) перманганатом калия в смеси концентрированной  $H_2SO_4$  с NaNO<sub>3</sub> [11]. Термическое восстановление (термоудар) проводили в трубчатой печи, разогретой до 1173 К в атмосфере аргона по методу, подробно описанному в работе [17]. Для дополнительного расщепления слоев в процессе термического восстановления часть ОГ два ч выдерживали в парах уксусной кислоты в эксикаторе и подвергали термоудару при температуре 1173 К (ТВОГ-У). Насыщение ОГ парами уксус-

ной кислоты приводит к дополнительному газообразованию (кетен, метан, вода, оксид углерода), что ведет к еще большему расщеплению слоев ОГ и, соответственно, изменению удельной поверхности и проводимости. Для более эффективного удаления кислородсодержащих групп и уменьшения количества дефектов полученные ТВОГ и ТВОГ-У отжигали в атмосфере аргона при температуре 1173 К в течение 3 ч, получая ТВОГ-900 и ТВОГ-У900, соответственно.

Измерение электропроводности и плотности полученных порошков проводили в пресс-форме, состоящей из тефлоновой матрицы с отверстием, в котором находились подвижный и неподвижный латунные электроды. В отверстие засыпали порошок, который подвергался воздействию давления подвижного электрода (до 7 МПа). Измерения проводили иммитансометром Е7-20 при комнатной температуре на частоте 1 кГц, при которой влияние скин-эффекта на проводимость еще не сказывалось.

Контроль за термовосстановлением ОГ, содержащего большое количество парамагнитных дефектов, концентрация которых в процессе восстановления может существенно уменьшаться и даже практически полностью исчезать, осуществляли методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [18, 19]. Для проведения измерения порошки образцов помещали в стеклянную ампулу диаметром 4 мм, спектры регистрировали на спектрометре SE/X-2544 (Польша) трехсантиметрового диапазона при комнатной температуре.

Для приготовления образцов композитов в эпоксидную смолу марки DER-330 (Dow Chemical Со., Германия) вводили расчетное количество наполнителя. Равномерное распределение наполнителя в смеси достигали ультразвуковой обработкой суспензии в течение 15 мин зондовым диспергатором (частота 22 кГц, мощность 400 Вт). В качестве отвердителя использовали полиэтиленполиамин (PEPA) с массовым отношением DER-330/ PEPA = 9/1. Отверждение композита проводили во фторопластовом шаблоне в три этапа при температурах 323, 373 и 393 К в течение 0.5, 0.5 и 2 ч соответственно. Для достижения полного отверждения композиты дополнительно выдерживали при комнатной температуре еще 24 ч. Максимальная концентрация наполнителя (1.5 мас.%) в композите была ограничена вязкостью системы.

Измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов проводили на панорамных измерителях типа P2-52, P2-53, P2-61 резонаторным методом на частотах 1.7, 2.9 и 9.8 ГГц. Образцы тестируемых композитов имели прямоугольные сечения размером от  $0.4 \times 0.8$  до  $1.5 \times 2.5$  мм<sup>2</sup> (в зависимости от содержания наполнителя и диапазона частот) и по длине они превышали высоту резонатора. В измерениях использовали несколько образцов (до четырех) разного объема и полученные значения усреднялись. Точность измерений составляла 10 и 20% для  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оксид графита представляет собой ковалентное соединение графита с присоединенными к графеновым слоям различными кислородсодержащими группами: эпоксидными, карбоксильными, гидроксильными, эфирными и другими. По результатам элементного анализа используемый ОГ содержит 45.9 мас.% кислорода при расчетном атомном соотношении C/O = 1.5. При быстром нагреве до температуры 1173 К происходит разложение ОГ, сопровождающееся потерей ~30% массы образца и взрывообразным выделением оксидов углерода и паров воды. Элементный анализ показывает, что в результате термического восстановления рассчитанное атомное соотношение С/О, характеризующее степень восстановления ОГ (табл. 1), увеличивается в результате термоудара до 4.3 для ТВОГ; тогда как при термической обработке ОГ, предварительно насыщенного парами уксусной кислоты (ТВОГ-У), рассчитанное значение С/О составляет 3.5. Меньшее значение С/О можно объяснить тем, что одновременно с термическим восстановлением ОГ дополнительно происходит испарение уксусной кислоты при ограниченном времени нахождения порошка в горячей зоне реактора. Возможно также, что после термоудара уксусная кислота из образцов ТВОГ-У удалялась не полностью. Дополнительный отжиг в потоке аргона позволяет удалить большинство оставшихся после термического восстановления кислородсодержащих групп, при этом соотношения С/О для ТВОГ-900 и ТВОГ-У900 возрастают (табл. 1).

В ЭПР-спектре ОГ наблюдается сигнал с g-фактором шириной линии 0.2 мT, что согласуется с литературными данными и соответствует спектрам ЭПР ОГ, характеризующимся одиночной, слабо асимметричной линией с шириной 0.2–0.25 мТ [18]. Для всех термовосстановленных образцов ТВОГ и ТВОГ-У (отожженных и неотожженных) сигнал ЭПР исчезает, что свидетельствует об эффективности процесса термического восстановления, сопровождающегося исчезновением значительного числа дефектов и восстановлением графеновой структуры.

Выделение газов в результате термического восстановления способствует расщеплению графеновых слоев и препятствует их агрегации [3]. Удельные поверхности, измеренные по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (метод БЭТ), для ТВОГ и ТВОГ-У составляют 460 и 520 м<sup>2</sup>/г соответственно (табл. 1), что значительно выше удельной поверхности графита (~10 м<sup>2</sup>/г). Допол-

Таблица 1. Значения электрофизических характеристик исследуемых порошков до и после термической обработки

Наполнитель	C/O	S, м²/г	ρ, г/см <sup>3</sup>	σ, См/м
Графит	_	10	1.37	2920
ТВОГ	4.3	460	0.14	34
ТВОГ-900	42.6	620	0.11	190
ТВОГ-У	3.5	520	0.14	51
ТВОГ-У900	21.2	650	0.09	188

Примечание: р и о измерены при давлении 3 МПа.

нительный отжиг при 1173 К увеличивает эти значения до 620 и 650 м<sup>2</sup>/г для ТВОГ-900 и ТВОГ-У900 соответственно. Отсутствие агрегации при термическом восстановлении подтверждается спектрами рентгеновской дифракции полученных порошков. На дифрактограммах всех образцов имеется широкое гало и отсутствуют рефлексы {002} гексагональной решетки графита при  $2\theta = 26.6^{\circ}$ , что указывает на отсутствие в продуктах "стопок" из большого числа графеновых слоев.

На рис. 1 показано влияние давления на электропроводность и плотность порошков, полученных при термическом восстановлении ОГ (ТВОГ. ТВОГ-У) и подвергнутых дополнительному отжигу (ТВОГ-900 и ТВОГ-У900). С увеличением давления плотность и проводимость всех порошков возрастают. При этом на их поведение существенное влияние оказывает отжиг порошков: у неотожженных порошков ТВОГ и ТВОГ-У плотности и проводимости близки по величине, у отожженных ТВОГ-900 и ТВОГ-У900 наблюдается рост проводимости при значительном уменьшении плотности. Подобный эффект отмечался при исследовании порошков природного и искусственного графита, многостенных нанотрубок и графена [20]. Было показано, что в случае углеродных наноразмерных материалов, включая графен и УНТ, наблюдается следующая тенденция: чем плотнее материалы, тем ниже их проводимость. Авторы считают, что это, вероятно, вызвано морфологическим различием в расположении слоев графена и графита. Мы полагаем, что проводимость связана не только с морфологическим различием в расположении слоев материала, но и, в первую очередь, с его удельной поверхностью (табл. 1 и [17]). Увеличение удельной поверхности приводит к большему числу (большей площади) контактов между частицами. Поведение плотности и проводимости порошков в зависимости от давления можно объяснить тем, что при заполнении камеры пресс-формы между электродами в насыпном порошке образуются пустоты. При увеличении давления пустоты устраняются, а плотность и проводимость растут. В области давлений 1-2 МПа наблюдается излом, который вы-



Рис. 1. Зависимости плотности  $\rho$  (*a*) и удельной электропроводности  $\sigma$  (*b*) от давления *P* для порошков термовосстановленного оксида графита: *1* – ТВОГ, *2* – ТВОГ-У, *3* – ТВОГ-900, *4* – ТВОГ-У900.

зван дальнейшим увеличением плотности и проводимости уже за счет уплотнения самих частиц [14].

Изменение удельной плотности и проводимости исследуемых порошков с ростом температуры отжига, по-видимому, связано с отмеченным выше удалением кислородсодержащих групп и восстановлением графеновой структуры. При этом увеличивается расщепление и возрастает количество пор, что приводит к росту удельной поверхности и падению плотности. При увеличении давления на порошок плотность возрастает, что ведет к улучшению контактов между частицами и увеличению длины проводящих цепочек. Это, в свою очередь,



Рис. 2. Зависимости реальной (*a*) и мнимой (*б*) частей диэлектрических проницаемостей, измеренных на частоте 9.8 ГГц эпоксидных композитов от содержания наполнителей: *1* – ТВОГ-900, *2* – ТВОГ-У900, *3* – ТВОГ-У, *4* – ТВОГ, *5* – графит.

ведет к увеличению удельной проводимости порошка.

На рис. 2 представлены результаты измерения КДП эпоксидных композитов на частоте 9.8 ГГц с исследованными порошками в качестве наполнителей при концентрациях 0.5—1.5 мас.%. Значения комплексной диэлектрической проницаемости на частотах 2.9 и 1.7 ГГц близки и поэтому не приводятся. Характерной особенностью зависимостей на всех частотах является значительное превышение значений є' и є" для композитов с наполнителями из термовосстановленного ОГ как с предварительным насыщением уксусной кислотой, так и без насыщения, по сравнению с композитами, в качестве наполнителя в которых используется графит.

Полученные зависимости реальной части КПД, ε', от содержания наполнителя в композитах можно разделить на три группы: первая включает композиты с отожженными порошками (ТВОГ-900, ТВОГ-У900), вторая - с неотожженными (ТВОГ, ТВОГ-У), третья – композиты с наполнителем из ГК-1. Значения є' для первых двух групп больше примерно в 2.3 и 1.5 раза соответственно по сравнению с третьей группой при содержании наполнителя 1.5 мас.%. Характер зависимостей мнимой части КЛП сушественно отличается. Величины є" для композитов, содержащих 1.5 мас.% наполнителей ТВОГ-900, ТВОГ, ТВОГ-У, имеют сходные значения и меняются в пределах от 1.5 до 1.8, тогда как значение є" для композитов с ТВОГ-У900 почти в два раза меньше. Тангенс угла диэлектрических потерь – наибольший у композита с наполнителем ТВОГ (tg $\delta$  = 0.33), а у композита с наполнителем ТВОГ-У900 – в 3 раза меньше. Диэлектрические характеристики эпоксидных композитов, содержащих 1.5 мас.% наполнителей на частоте 9.8 ГГц, приведены в табл. 2.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что если отжиг наполнителя ТВОГ приводит к возрастанию значений є' и є", то отжиг ТВОГ-У приводит к значительному уменьшению величины ε". Различия в характере полученных экспериментальных зависимостей КДП композитов с разными наполнителями (табл. 1) связаны с удельной поверхностью наполнителей. Например, несмотря на высокую проводимость графита, его удельная поверхность мала по сравнению с ТВОГ (в 46 раз). Следовательно, площадь контактов проводник-диэлектрик для композита ТВОГ-эпоксидная матрица больше. В результате этого за счет увеличения межфазной максвелл-вагнеровской поляризации увеличивается диэлектрическая проницаемость є' и растут диэлектрические потери є". Аналогичная ситуация наблюдается и для композитов с отожженным наполнителем ТВОГ-900. Здесь по отношению к ТВОГ растет и проводимость (в 5.6 раз) и удельная поверхность (в 1.3 раз). В данном случае дополнительный отжиг при 1173 К в атмосфере аргона приводит не только к удалению большинства оставшихся после термического восстановления кислородсодержащих групп (уменьшение количества кислорода с 23 до 3 мас.% [17]), но и восстанавливает  $sp^2$ -гибридизованную графеновую структуру, что способствует увеличению удельной электропроводности ТВОГ-900 и росту КДП.

Использование в качестве наполнителя ТВОГ-У незначительно меняет картину по сравнению с ТВОГ. Однако отжиг ТВОГ-У приводит к неожиданным результатам. Наблюдается падение значения є" в 2.3 раза у композита с ТВОГ-У900 по

Таблица 2. Значения диэлектрических характеристик композитов

Наполнитель	ε'	ε"	tgδ
Графит	3.3	0.16	0.05
ТВОГ	4.7	1.54	0.33
ТВОГ-900	7.9	1.8	0.23
ТВОГ-У	5.6	1.6	0.29
ТВОГ-У900	7.4	0.77	0.10

сравнению с композитом с ТВОГ-900 несмотря на близкие значения проводимости и удельной поверхности наполнителей. Отметим, что подобного эффекта при насыщении ОГ парами ацетона с последующим термовосстановлением и отжигом полученного порошка не наблюдалось [17]. Возможно, это вызвано различным строением частиц порошков, поскольку температуры кипения ацетона и уксусной кислоты различаются: 329.2 и 391.1 К соответственно. При термоударе ацетон в значительном количестве испаряется, не успевая воздействовать на "стопки" слоев оксида графита, тогда как пары уксусной кислоты воздействуют дольше, оказывая дополнительное давление на слои ОГ, и поэтому в большей степени меняют структуру частиц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы диэлектрические свойства эпоксидных композитов с наполнителями из порошков термовосстановленного оксида графита в качестве модельных радиопоглощающих материалов в диапазоне частот 1.7-9.8 ГГц. Измерены величины удельной электропроводности, плотности и удельные поверхности порошковых наполнителей. Показано, что отжиг порошков при температуре 1173 К в атмосфере аргона приводит к увеличению их электропроводности в 4-5 раз; при этом наблюдается снижение диэлектрических потерь композита с отожженными порошками из термовосстановленного оксида графита (насыщенного парами уксусной кислоты) почти в два раза. Наибольшее значение тангенса угла диэлектрических потерь составляет 0.33 и 0.29 и достигается в диапазоне частот 2.9-9.8 ГГц для композитов с наполнителями ТВОГ и ТВОГ-У соответственно.

Проведенное исследование показало, что полученные значения tgδ для композитов с наполнителями из термовосстановленного оксида графита в примененном диапазоне частот превышают значение tgδ для эпоксидного композита с природным графитом в 5–6 раз. Дополнительный отжиг наполнителей приводит к уменьшению значения tgδ эпоксидных композитов, однако его величина в 1.5–4 раза превышает значение tgδ для эпоксидного композита с наполнителем из природного графита.

Авторы выражают благодарность А.А. Арбузову за изготовление и анализ образцов.

Экспериментальные данные, используемые в работе, получены в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (тема № АААА-А18-118112290069-6).

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wang Ch., Han X., Xu P., Zhang X., Du Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 072906-1–3; https://doi.org/10.1063/1.3555436
- De Bellis G., Tamburrano A., Dinescu A., Santarelli M.L., Sarto M.S. // Carbon. 2011. V. 49. P. 4291; https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.06.008
- Khurram A.A., Rakha S.A., Zhou P., Shafi M., Munir A. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 044105-1–13; https://doi.org/10.1063/1.4927617
- Rubrice K., Castel X., Himdi M., Parneix P. // Materials. 2016. V. 9. P. 825; https://doi.org/10.3390/ma9100825
- Судоргин С.А., Лебедев Н.Г. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 10. С. 63; https://doi.org/10.7868/S0207401X16100113
- Москалюк О.А., Алешин А.Н., Цобкалло Е.С., Крестинин А.В., Юдин В.Е. // ФТТ. 2012. Т. 54. № 10. С. 1993.
- 7. Мурадян В.Е., Соколов Е.А., Бабенко С.Д., Моравский А.П. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 2. С. 83.
- 8. Хватов А.В., Бревнов П.Н., Шилкина Н.Г., Ломакин С.М. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 6. С. 71; https://doi.org/10.1134/S0207401X19060049

- Hashisho Z., Rood M.J., Barot S., Bernhard J. // Carbon. 2009. V. 47. P. 1814; https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.03.006
- Savi P., Miscuglio M., Giorcelli M., Tagliaferro A. // PIER Letters. 2014. V. 44. P. 63; https://doi.org/10.2528/PIERL13102803
- 11. Арбузов А.А., Мурадян В.Е., Тарасов Б.П. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 9. С. 1962.
- Гудков М.В., Баженов С.Л., Бехли Л.С., Мельников В.П. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 9. С. 33; https://doi.org/10.1134/S0207401X18090078
- 13. Гриднев А.А., Гудков М.В., Бехли Л.С., Мельников В.П. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 12. С. 33; https://doi.org/10.1134/S0207401X18120051
- Marinho B., Ghislandi M., Tkalya E., Konin C.E., de With G. // Powder Technol. 2012. V. 221. P. 351; https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.024
- Malas A., Bharati A., Verkinderen O., Goderis B., Moldenaers P. et al. // Polymers. 2017. V. 9. P. 613; https://doi.org/10.3390/polym9110613
- 16. Мурадян В.Е., Арбузов А.А., Соколов Е.А., Бабенко С.Д., Бондаренко Г.В. // ПЖТФ. 2013. Т. 39. № 18. С. 1.
- Арбузов А.А., Мурадян В.Е., Тарасов Б.П., Соколов Е.А., Бабенко С.Д. // ЖФХ . 2016. Т. 90. № 5. С. 663; https://doi.org/10.7868/S0044453716050071
- Ciric L., Sienkiewicz A., Gaal R., Jacimovic J., Vaju C. et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 195139; https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86195139
- Gudkov M.V., Melnikov V.P. // Nanosystems: Phys. Chem. Math. 2016. V. 7. № 1. P. 244; https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-1-244-252
- Rani A., Nam S., Oh K.A., Park M. // Carbon Lett. 2010. V. 11. № 2. P. 90.