

УДК 534.222.2

ПАРАМЕТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ Co–C, ПОЛУЧЕННЫМИ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

T.-J. Zhao^{1,2,3}, X.-H. Wang², S. Kang¹, Z.-F. Wang¹, H.-H. Yan²¹Школа гражданского строительства и архитектуры, Хэнаньский университет, Кайфэн 475004, Китай
zf_wang@henu.edu.cn²Государственная лаборатория структурного анализа промышленного оборудования,
Даляньский технологический университет, Далянь 116024, Китай, dut_yan@163.com³Хэнаньский исследовательский центр по строительству интеллектуального железнодорожного
транспорта, Кайфэн 475004, Китай

Инкапсулированные в углерод наночастицы кобальта Co–C синтезированы при детонации смеси бензола с кислородом с использованием ацетилацетоната кобальта (III) в качестве прекурсора. Исследовано влияние термообработки на физические свойства получаемого вещества. Результаты экспериментов показали, что после тепловой обработки степень кристаллизации и графитизации наночастиц Co–C сильно увеличилась, при этом согласование импедансов также значительно улучшилось. Коэффициент поглощения электромагнитного излучения увеличился более чем в шесть раз, а минимальные потери, связанные с отражением, составили –17.5 дБ на частоте 16.98 ГГц. Несовпадение импедансов стало главной причиной плохого поглощения волн исходными наночастицами Co–C. Важную роль в согласовании импедансов и степени поглощения волн играет температура. Термическая обработка может способствовать ослаблению несогласования импедансов наночастиц Co–C, полученных при помощи газовой детонации.

Ключевые слова: газовая детонация, поглощение волн, согласование импедансов.

DOI 10.15372/FGV20210609

ВВЕДЕНИЕ

Получившие большое распространение электронные устройства создают избыточное электромагнитное излучение (ЭМИ), известное как электромагнитные помехи, которые могут влиять на нормальную работу других электронных устройств и негативно воздействовать на здоровье человека. Поэтому большой интерес вызывает создание материалов, поглощающих ЭМИ [1].

Параметры поглощения электромагнитной волны материалом-поглотителем зависят от особенностей согласования импедансов и степени ослабления излучения. Электромагнитные параметры, включая комплексную диэлектрическую и магнитную проницаемость,

используются для оценки параметров поглощения ЭМИ и определения степени согласования импедансов. При этом согласование импедансов критически важно для улучшения способности вещества поглощать ЭМИ [2, 3]. Ферромагнитные металлы характеризуются высокой намагниченностью насыщения и пределом Снукса, что позволяет улучшить параметры поглощения ЭМИ [4]. Однако некоторые недостатки металлов, такие как склонность к окислению и агрегации, а также высокая плотность, ограничивают их потенциальное применение для поглощения электромагнитных волн [5]. Структура, состоящая из металлического ядра и углеродной оболочки, позволяет сохранить металлическое ядро и улучшить способность материала поглощать ЭМИ [5].

В предыдущих исследованиях различными методами было синтезировано большое количество композитов на основе кобальта, имеющих высокую способность к поглощению, широкую полосу частот поглощения, низкую плотность и малую толщину. В том числе были получены наночастицы Co–C [5], кобальт с нанотрубка-

© Zhao T.-J.^{1,2,3}, Wang X.-H.², Kang S.¹, Wang Z.-F.¹, Yan H.-H.², 2021.

¹School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng, 475004, China. ²State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China. ³Henan Provincial Research Center of Engineering on Intelligent Construction of Rail Transit, Kaifeng, 475004, China.

ми [6], металлоорганические каркасные структуры на основе кобальта [7] и т. д. Авторы [5] получили наночастицы Co–C при помощи дугового разряда, при этом минимальные потери на отражение RL достигали -42 дБ при массовом содержании Co–C 40 %. В [8] методом плазменного разряда синтезированы наночастицы Co–C, способность которых к поглощению достигала -43.4 дБ. Авторы отметили, что важную роль в способности поглощать ЭМИ играет согласование импедансов. В [9] двухстадийным методом получен N-легированный композит Co–C/MWCNTs (многостенные углеродные нанотрубки) со значением $RL = -50.0$ дБ. Пористый композит Co–C, синтезированный спеканием кобальтового металлоорганического каркаса, также проявляет большую способность к поглощению ЭМИ — $RL = -61.2$ дБ в полосе частот поглощения $4.1 \div 18$ ГГц [10]. Однако методы приготовления композитов не только требуют больших затрат энергии и времени, но еще и отличаются высокой стоимостью и малым выходом, что ограничивает массовое производство и применение волновых поглотителей в воздухе.

Детонационный метод является практичным способом получения наноматериалов за очень короткое время. Он позволяет сэкономить много энергии, времени и избавиться от некоторых излишних стадий. Более того, порошки наноматериалов с помощью детонационной волны могут распространяться в воздухе с образованием облака наноматериалов. В [11] исследована возможность образования наночастиц Co–C взрывным детонационным методом и получена структура, включающая в себя ядро из кобальта размером $10 \div 25$ нм и оболочку из нескольких слоев углерода. В нашей недавней работе [12], где использовался ацетилацетонат кобальта (III) в качестве источника металла, а углерод и водородокислородная смесь — в качестве источника взрыва, были синтезированы частицы Co–C/CNTs (углеродные нанотрубки) при инициировании зажигания газовой смеси в трубе. В настоящем исследовании минимальное значение RL оригинальных материалов Co–C, полученных при помощи газовой детонации, составило -3.8 дБ, что намного меньше, чем известно из литературы [13]. Интересно, что фаза, морфология и магнитные свойства полученных наночастиц сходны с известными, но свойства поглощения электромагнитных волн при этом различны. В данной

работе методом газовой детонации получены наночастицы Co–C, обсуждены причины низкой поглощающей способности исходных наночастиц Co–C, изучено влияние температуры на характеристики поглощения волн наночастицами Co–C, исследован механизм поглощения ЭМИ наночастицами Co–C и предложен способ улучшения поглощающей способности материала.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Получение наночастиц Co–C

Наночастицы Co–C были получены методом газовой детонации, описанным в нашей предыдущей статье [14]. В настоящей работе для разложения ацетилацетоната кобальта (III) ($\text{Co}(\text{acac})_3$) и получения наночастиц Co–C использовалась в качестве источника взрыва газовая смесь бензол — кислород, имеющая более высокую теплоту сгорания. Порошок $\text{Co}(\text{acac})_3$ равномерно размещался в детонационной трубе, которую затем запаивали и подвергали вакуумированию. Когда температура в детонационной трубе достигала 165°C , труба заполнялась последовательно бензолом и кислородом. После выдержки этой температуры в течение 10 мин, газовая смесь поджигалась электрической искрой с энергией 20 Дж. Через 5 мин порошок был собран и помечен как образец S1. Часть исходных порошков была подвергнута термообработке при 700°C в течение 1 ч в защитной среде аргона и рассматривалась как образец S2.

1.2. Свойства наночастиц Co–C

Фазовый состав определялся на порошковом рентгеновском дифрактометре (Rigaku D/MAX 2400, $\text{Cu } K_\alpha$) с углом сканирования в диапазоне $20 \div 80^\circ$. Морфология исследовалась при помощи просвечивающей электронной микроскопии (Tecnai F30, FEI). Для оценки степени графитизации использовался рамановский спектрометр DRX Smart (Thermo Fisher, США). Магнитные свойства порошков проверяли с помощью магнитометра с колеблющимся образцом при комнатной температуре. Электромагнитные параметры измерялись векторным анализатором цепей (HP 8722ES) методом коаксиальных линий. Наночастицы Co–C смешивали с парафином в массовом соотношении

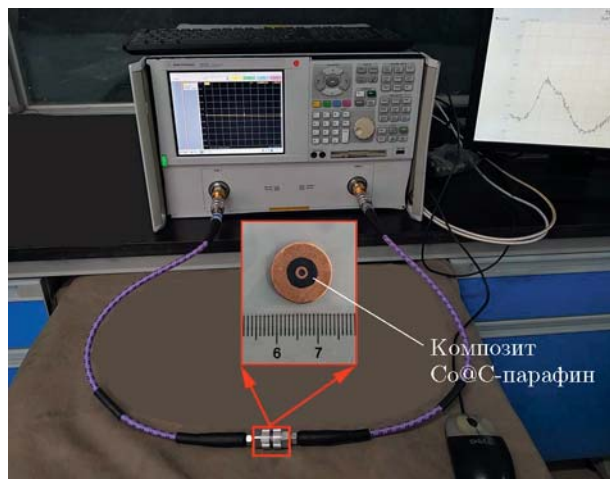


Рис. 1. Векторный анализатор цепей и кольцо для проверки электромагнитных параметров

1 : 1; из смеси было изготовлено кольцо внешнего диаметра 7.00 мм, внутреннего диаметра 3.04 мм и толщиной 2.00 мм (рис. 1).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

2.1. Фазовый анализ

На рис. 2 показан фазовый состав образцов S1 и S2. В обоих образцах видны три острых пика, соответствующих кобальту. Дифракционный пик углерода нечеткий, как и в нашем предыдущем исследовании [14]. Однако интенсивность пиков кобальта в образце S2 была значительно больше по сравнению с образцом S1,

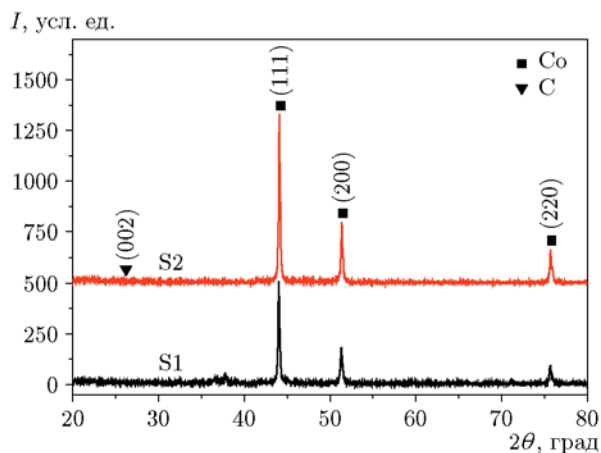


Рис. 2. Рентгенограммы исходных (S1) и подвергнутых термообработке (S2) наночастиц Co-C

что свидетельствует о существенном улучшении способности к кристаллизации кобальта и росте размера зерен после термообработки.

2.2. Исследование на просвечивающем электронном микроскопе

Морфологию образцов изучали при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Как показывают ПЭМ-фотографии (рис. 3), оба образца состоят из сферических частиц со структурой ядро — оболочка. Большинство частиц в образце S1 были небольшими, за исключением некоторого количества частиц субмикронного размера, что можно видеть на рис. 3,а. Средний размер частиц образца S2 (рис. 3,в) был намного больше, чем в образце S1, что указывает на значительный рост наночастиц в процессе термообработки. На рис. 3,б,г можно различить полосы интенсивности, обусловленные решеткой графита; расстояние между полосами решетки ядра составляет 0.223 и 0.209 нм, что соответствует расстоянию между полосами решетки кобальта. Более того, полосы решетки кобальта для образца S2 намного четче. В сочетании с результатами рентгеноструктурного анализа это свидетельствует о том, что частицы ядро — оболочка представляют собой наночастицы Co-C, а процесс термообработки способствует повышению степени кристаллизации наночастиц Co-C.

2.3. Исследование при помощи рамановской спектроскопии

Рамановская спектроскопия играет важную роль в изучении и описании графитовых материалов и широко используется для исследования характеристик углеродных нанотрубок, фуллеренов, графена и т. п. [15]. Оба образца показали два основных пика на длине волны около 1344 и 1581 см^{-1} (рис. 4). Пик 1344 см^{-1} отнесен к неупорядоченным графитовым материалам или дефектам в графите, составляющим так называемую D-зону [16], в то время как пик 1581 см^{-1} , называемый G-зоной, соответствует колебанию sp^2 -гибридизованных атомов углерода [17]. Кроме того, только в спектрах комбинационного рассеяния образца S2 присутствовала G'-зона с длиной волны около 2691 см^{-1} , соответствующая двухфононным процессам [18]. Обычно отношение интенсивностей I_D/I_G используется для оценки степени

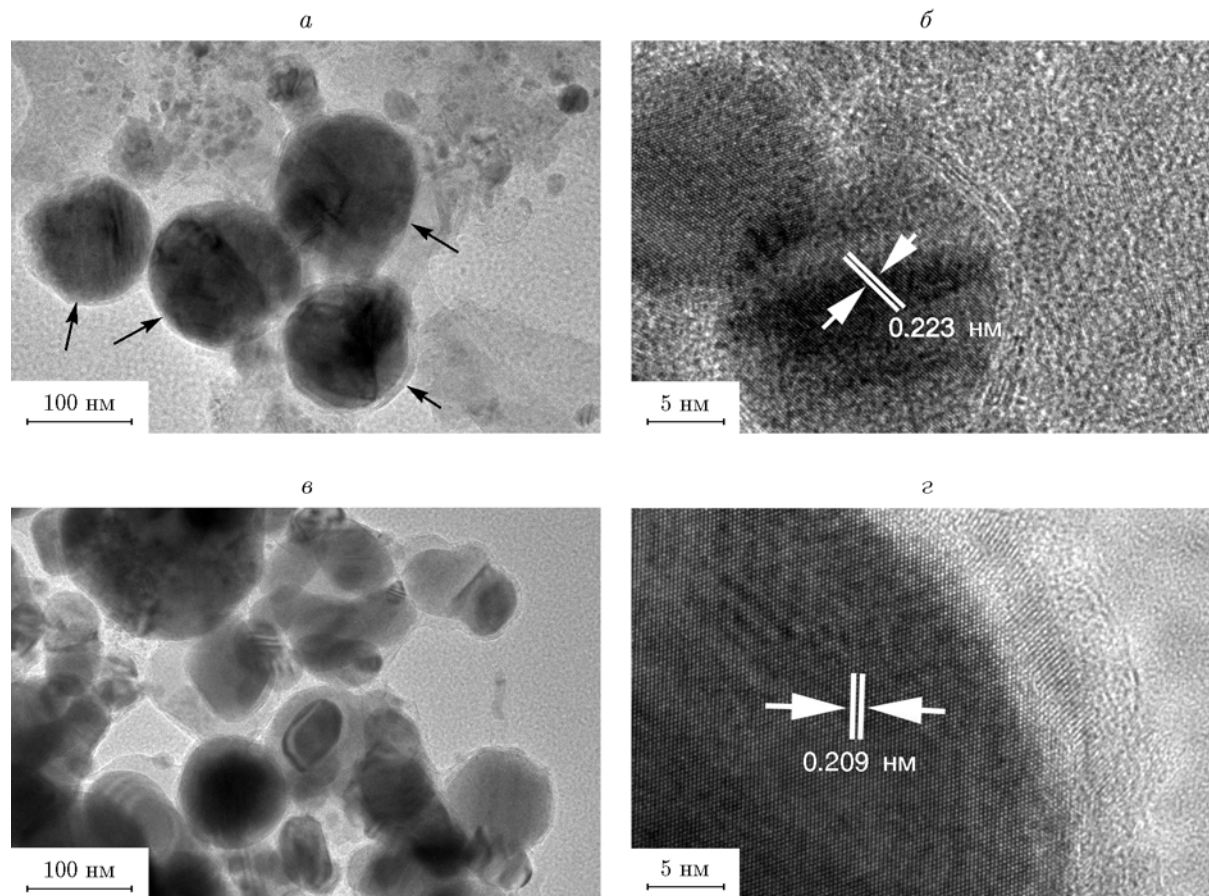


Рис. 3. ПЭМ-изображения наночастиц Co-C:

а — наночастицы Co-C, *б* — их изображение высокого разрешения, *в* — термообработанные наночастицы Co-C, *г* — их изображение высокого разрешения

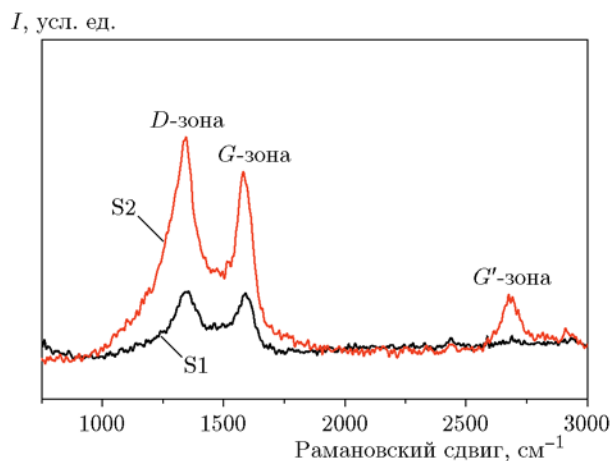


Рис. 4. Рамановские спектры исходных (S1) и подвергнутых термообработке (S2) наночастиц Co-C

графитизации углерода [18]. Значение I_D/I_G для обоих образцов было намного больше единицы, что указывает на низкую степень графитизации образцов S1 и S2. Однако интенсивность полос *D*, *G* и *G'* значительно увеличилась после термообработки, что свидетельствует о большей регулярности структуры углерода после термообработки и подтверждается ПЭМ-изображениями. Следовательно, термическая обработка способствует улучшению степени графитизации углеродной оболочки.

2.4. Анализ магнитных свойств

Магнитные свойства наночастиц Co-C исследовались при комнатной температуре, кривые намагниченности показаны на рис. 5. Намагниченность насыщения (M_s) образцов S1 и S2 равна соответственно 126 и 144 эмю/г, что соответствует увеличению после термообработки примерно на 14 %. Однако значе-

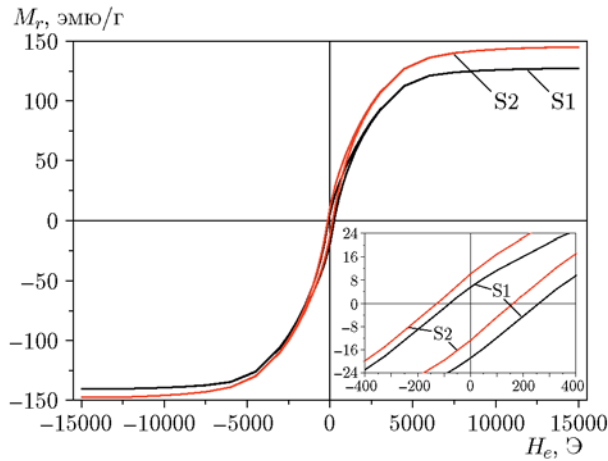


Рис. 5. Кривые намагниченности наночастиц Co-C в исходном состоянии (S1) и после термообработки (S2)

ние M_s было все же меньше, чем у сплошного кобальта (162 эмю/г) [19]. Коэрцитивная сила (H_c) образцов S1 и S2 составляла 76 и 131 Э, а остаточная намагниченность (M_r) — 5 и 10 эмю/г соответственно. Хотя кривые намагниченности образцов S1 и S2 были подобны, значение M_r увеличилось на 14 % после термообработки. Это показывает, что термическая обработка улучшает магнитные свойства наночастиц Co-C.

2.5. Анализ поглощения электромагнитных волн

Хорошо известно, что величина потерь на отражение RL используется для оценки способности материала поглощать электромагнитные волны. Значение RL может быть рассчитано в соответствии с теорией линии передачи [20] по формулам

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} \tanh(j(2\pi f d / c) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}), \quad (1)$$

$$RL = 20 \lg |(Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)|, \quad (2)$$

где Z_{in} — входной импеданс поглотителя, Z_0 — импеданс воздуха, μ_r — магнитная проницаемость, ε_r — диэлектрическая проницаемость, d — толщина поглотителя, f — частота электромагнитной волны, c — скорость света.

На рис. 6 показана зависимость потерь на отражение от частоты. Видно, что минимальное значение RL исходных наночастиц Co-C составило -2.8 дБ на частоте $f = 11.88$ ГГц при толщине поглотителя $d = 1$ мм (рис. 6,а).

Кроме того, при увеличении частоты и толщины значение RL изменялось мало. Это свидетельствует о том, что исходные наночастицы Co-C, полученные при помощи газовой детонации, имели плохие поглощательные свойства, а изменение RL с изменением частоты и толщины не было значительным. На рис. 6,б минимальное значение RL для образца S2 составило -17.5 дБ на частоте $f = 16.98$ ГГц при толщине поглотителя $d = 5$ мм, т. е. интенсивность поглощения ЭМИ наночастицами Co-C увеличилась более чем в шесть раз после термообработки. При $RL \leq -10$ дБ около 90 % ЭМИ может быть поглощено этим материалом [3]. Эффективная частота поглощения для образца S2 составила $f \approx 2.2$ ГГц (диапазон частот ЭМИ $15.8 \div 18$ ГГц). Итак, термическая обработка улучшает поглощательную способность наночастиц Co-C, полученных методом газовой детонации.

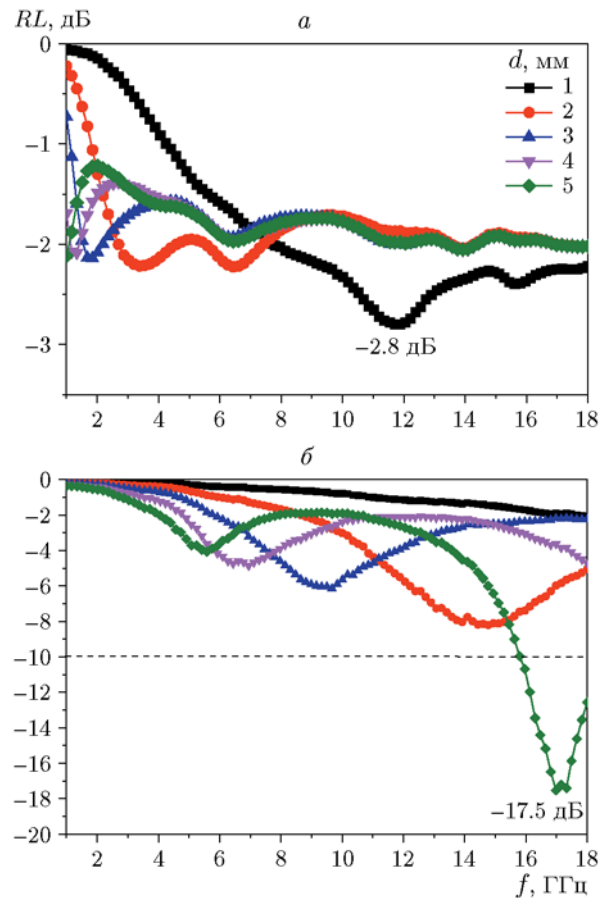


Рис. 6. Зависимость потерь на отражение от частоты для исходных (а) и подвергнутых термообработке (б) наночастиц Co-C

2.6. Анализ механизма поглощения ЭМИ

Характеристический импеданс является важным физическим параметром для оценки того, может ли электромагнитная волна войти в поглотитель без отражения, поэтому его следует учитывать при выборе материала поглотителя. Характеристический импеданс ρ представляет собой степень согласования импедансов воздуха и поглотителя:

$$\rho = \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \operatorname{th}(j(2\pi f d/c)\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}). \quad (3)$$

Если $\rho = 1$, это означает, что импедансы воздуха и поглотителя полностью совпадают и электромагнитная волна может свободно переходить из воздуха в поглотитель [21]. Фактически, для поглотителя значение ρ всегда меньше или больше 1, а случай $\rho \rightarrow 1$ означает, что поглотитель имеет хорошее согласование импедансов.

Области на рис. 7 показывают связь между характеристическим импедансом, толщиной и частотой. Из рис. 7,а следует, что при $\rho > 2 \cdot 10^{16}$ образец S1 не согласован по импедансу и электромагнитная волна полностью отражается на границе раздела наночастица Co–C — воздух. Из рис. 7,б видно, что степень согласования импедансов наночастиц Co–C, подвергнутых термообработке, заметно увеличилась. Степень согласования импедансов явно зависит от частоты волны и толщины поглотителя. Наночастицы Co–C характеризуются хорошим согласованием импедансов на высокой частоте. При толщине $d = 1 \div 4$ мм значение ρ уменьшалось с увеличением частоты. Лучшее согласование импедансов наблюдалось при $f = 16.98$ ГГц и $d = 5$ мм: $\rho \approx 0.77$, что соответствует минимальному значению RL (см. рис. 6,б).

Таким образом, термическая обработка помогла оптимизировать структуру наночастиц Co–C, в результате чего степень согласования импедансов была значительно улучшена и электромагнитная волна смогла без помех входить в поглотитель.

Как правило, ЭМИ может поглощаться за счет диэлектрических и магнитных потерь. Диэлектрические потери в основном вызваны поляризацией, такой как ионная, электронная, дипольная, а также поляризация границы раздела [2]. Хорошо известно, что ионная и электронная поляризация происходят на частоте $10^3 \div 10^6$ ГГц [8], поэтому их влиянием на ослабление ЭМИ можно пренебречь. В слу-

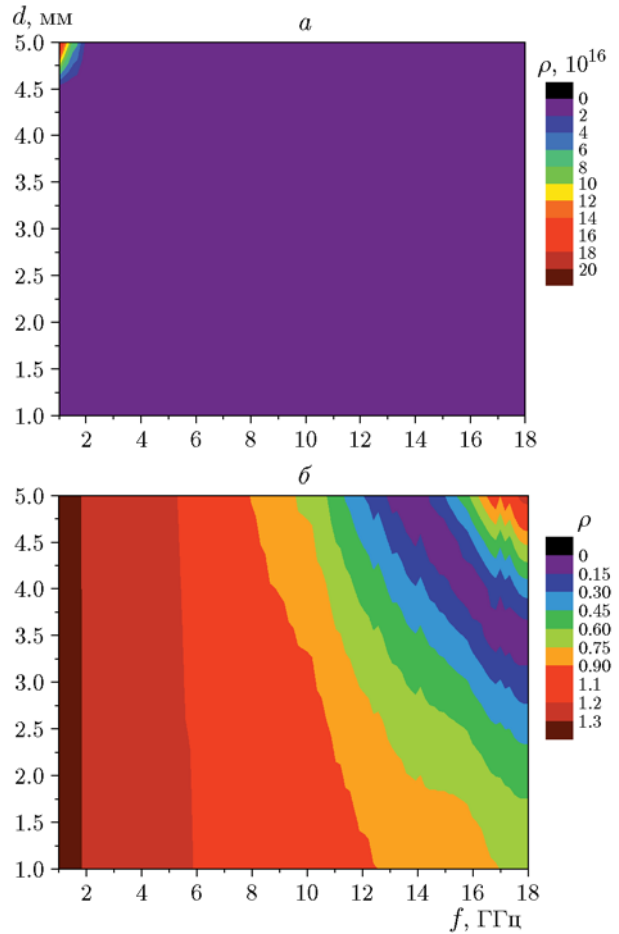


Рис. 7. Степень согласования импедансов исходных (а) и подвергнутых термообработке (б) наночастиц Co–C

чае наночастиц граница раздела между железным сердечником и углеродной оболочкой также приводит к поляризации и поглощению ЭМИ. Дипольная поляризация — еще один способ диэлектрических потерь, который вызван переориентацией диполя в переменном электромагнитном поле. Процесс дипольной релаксации может быть выражен уравнением Дебая:

$$(\varepsilon' - (\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)/2)^2 + (\varepsilon'')^2 = ((\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/2)^2, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/[1 + (2\pi f)^2\tau^2], \\ \varepsilon'' &= [2\pi f\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)]/[1 + (2\pi f)^2\tau^2], \end{aligned} \quad (5)$$

где ε_s — статическая диэлектрическая проницаемость, ε_∞ — диэлектрическая проницаемость при бесконечно большой частоте, τ —

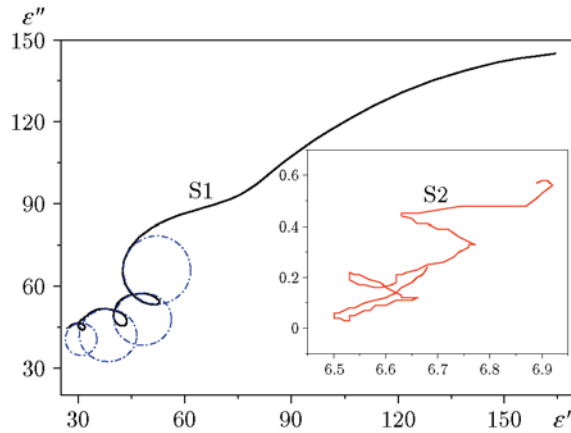


Рис. 8. Полуокружности Коула — Коула исходных (S1) и подвергнутых термообработке (S2) наночастиц Co-C

время релаксации. Из уравнения (4) можно убедиться, что если поглощение ЭМИ обусловлено дипольной поляризацией, то зависимость $\varepsilon''(\varepsilon')$ будет представлять собой полукруг (так называемый полукруг Коула — Коула) [22]. Зависимость $\varepsilon''(\varepsilon')$ показана на рис. 8. Здесь имеется четыре полукруга Коула — Коула для исходных наночастиц Co-C (образец S1) и нет регулярных полукругов Коула — Коула для наночастиц после термообработки (образец S2). Это указывает на то, что термообработка может влиять на процесс дипольной релаксации наночастиц Co-C, получаемых методом газовой детонации.

Магнитные потери включают в себя потери на гистерезис, собственный резонанс, резонанс доменных границ и вихревые токи [23]. Потери на гистерезис возникают в сильном электромагнитном поле; в переменном поле с частотой $f = 1 \div 18$ ГГц этой энергией можно пренебречь [24]. Резонанс доменных границ проявляется в мегагерцовом диапазоне ($1 \div 100$ МГц) [25], поэтому в нашем случае нет необходимости учитывать влияние и этого эффекта. Потери на вихревые токи зависят от электропроводности σ и толщины образца d и могут быть выражены уравнением $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1} = 2\pi\mu_0\sigma d^2/3$ [26], где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума. Если магнитные потери вызваны лишь влиянием вихревых токов, значение $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ должно быть постоянным при изменении частоты в диапазоне $f = 1 \div 18$ ГГц. Однако значение $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ для обоих образцов демонстрирует тенденцию к уменьшению в диапазоне $f = 1 \div 18$ ГГц

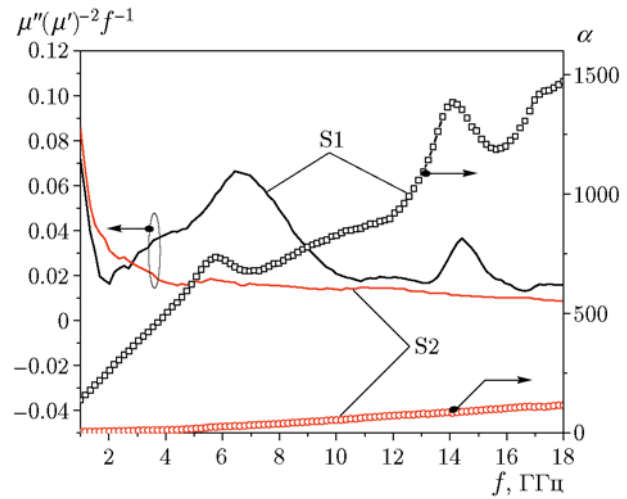


Рис. 9. Потери на вихревые токи и постоянная затухания в зависимости от частоты для исходных (S1) и подвергнутых термообработке (S2) наночастиц Co-C

(рис. 9). Следовательно, потери на вихревые токи можно исключить из рассмотрения.

Ослабление электромагнитной волны в поглотителе можно оценить с помощью постоянной затухания α :

$$\alpha = (\sqrt{2}\pi f/c) \{ (\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon') + [(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon')^2 + (\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu')^2]^{1/2} \}^{1/2}, \quad (6)$$

c — скорость света в вакууме [27]. Как показано на рис. 9, значение α увеличивается с ростом частоты. Для образца S1 постоянная затухания намного больше, чем для образца S2. Это означает, что способность наночастиц Co-C ослаблять энергию ЭМИ значительно снижается после термообработки.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Хорошо известно, что продолжительность детонационных реакций чрезвычайно мала, заметно меньше 1 с, а температура и давление могут очень быстро достигать экстремальных значений. Как правило, температура при газовой детонации превышает 3000 К, а давление находится в мегапаскальном диапазоне. Температура плавления Co составляет около 1768 К и должна быть еще меньше для наномасштаба. Наноразмерные образцы расплавленного кобальта можно использовать в качестве катализатора роста наночастиц Co-C или углеродных нанотрубок в процессе детонации

[28]. Исследование [29] показало, что при детонации конденсированного взрывчатого вещества температура была более 5000 К, а давление выше 2 ГПа, что привело к получению наночастиц типа ядро — оболочка с лучшей структурой и степенью графитизации. Кроме того, в [29] минимальное значение RL наночастиц пермаллоя с углеродным покрытием составляло -30 дБ. Это указывает на то, что температура и давление сильно влияют на поглощающие свойства ЭМИ наночастицами типа ядро — оболочка, полученными детонационным методом. Температура и давление газовой детонации намного меньше, чем при детонации конденсированного взрывчатого вещества, кроме того, длительность детонационных реакций очень мала. В результате степень кристаллизации и степень графитизации наночастиц Co–C оказываются малы. Тем не менее степени графитизации и кристаллизации наночастиц Co–C значительно повысились после термообработки. Следовательно, дефекты, вызванные недостаточной температурой и давлением, могут быть устранены термической обработкой.

Процесс дебаевской релаксации и константа затухания заметно уменьшились, в то время как согласование импедансов значительно улучшилось, что стало результатом повышения степени кристаллизации, степени графитизации и магнитных свойств. В результате степень согласования импедансов возросла и электромагнитная волна могла лучше входить в наночастицы Co–C. Электромагнитная волна может ослабляться за счет диэлектрических и магнитных потерь. Поэтому увеличение степени согласования импедансов является ключевым моментом для улучшения способности наночастиц Co–C поглощать ЭМИ, а термическая обработка является полезным способом достичь этого. Другими словами, свойства наночастиц Co–C поглощать электромагнитные волны могут быть улучшены за счет увеличения температуры при газовой детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом газовой детонации были успешно получены наночастицы Co–C. Для изучения влияния температуры на характеристики поглощения волн наночастицами Co–C использовался процесс термообработки в защитной среде аргона. Этот процесс может улучшить согласование импедансов и параметры поглощения волн наночастицами Co–C. Несоответ-

ствие импедансов является основной причиной малого поглощения волн исходными наночастицами Co–C. После термообработки характеристики поглощения волн улучшаются более чем в шесть раз, а минимальные потери на отражение составляют -17.5 дБ на частоте 16.98 ГГц при толщине поглотителя 5 мм. Степень согласования импедансов и характеристики поглощения волн наночастицами Co–C можно улучшить за счет повышения температуры детонации. Термическая обработка — полезный метод улучшения параметров поглощения волн наночастицами Co–C, синтезированными с помощью газовой детонации. Оптимальную температуру процесса термообработки и способ увеличения температуры детонации предполагается детально изучить в дальнейшем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке National natural science foundation of China (гранты 11672067 и 11672068) и Postdoctoral research funding of Henan university (грант FJ3050A670001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Song C. Q., Yin X. W., Han M. K., et al. Three-dimensional reduced graphene oxide foam modified with ZnO nanowires for enhanced microwave absorption properties // Carbon. — 2017. — V. 116. — P. 50–58. — DOI: 10.1016/j.carbon.2017.01.077.
2. Wang H., Xiang L., Wei W., et al. Efficient and lightweight electromagnetic wave absorber derived from metal organic framework-encapsulated cobalt nanoparticles // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2017. — V. 9, N 48. — P. 42102–42110. — DOI: 10.1021/acsami.7b13796.
3. Ding D., Wang Y., Li X. D., et al. Rational design of core-shell Co@C microspheres for high-performance microwave absorption // Carbon. — 2017. — V. 111. — P. 722–732. — DOI: 10.1016/j.carbon.2016.10.059.
4. Liu J. R., Itoh M., Horikawa T., et al. Gigahertz range electromagnetic wave absorbers made of amorphous-carbon-based magnetic nanocomposites // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98, N 5. — 054305. — DOI: 10.1063/1.2009082.
5. Zhang D. F., Xu F. X., Lin J., et al. Electromagnetic characteristics and microwave absorption properties of carbon-encapsulated cobalt nanoparticles in 2–18-GHz frequency range // Carbon. — 2014. — V. 80. — P. 103–111. — DOI: 10.1016/j.carbon.2014.08.044.
6. Yin Y. C., Liu X. F., Wei X. J., et al. Magnetically aligned Co-C/MWCNTs composite derived from MWCNT-interconnected zeolitic imidazolate frameworks for a lightweight and highly efficient electromagnetic wave absorber // ACS

- Appl. Mater. Interfaces. — 2017. — V. 9, N 36. — P. 30850–30861. — DOI: 10.1021/acsami.7b10067.
7. **Lu Y. Y., Wang Y. T., Li H. L., et al.** MOF-derived porous Co/C nanocomposites with excellent electromagnetic wave absorption properties // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2015. — V. 7, N 24. — P. 13604–13611. — DOI: 10.1021/acsami.5b03177.
 8. **Liu T., Xie X., Pang Y., Kobayashi S.** Co/C nanoparticles with low graphitization degree: a high performance microwave-absorbing material // J. Mater. Chem. C. — 2016. — V. 4, N 8. — P. 1727–1735. — DOI: 10.1039/c5tc03874j.
 9. **Shu R. W., Li W. J., Wu Y., Zhang J. B., Zhang G. G.** Nitrogen-doped Co-C/MWCNTs nanocomposites derived from bimetallic metal-organic frameworks for electromagnetic wave absorption in the X-band // Chem. Eng. J. — 2019. — V. 362. — P. 513–524. — DOI: 10.1016/j.cej.2019.01.090.
 10. **Wang K. F., Chen Y. J., Tian R., Li H., Zhou Y., Duan H. N., Liu H. Z.** Porous Co-C core-shell nanocomposites derived from Co-MOF-74 with enhanced electromagnetic wave absorption performance // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2018. — V. 10, N 13. — P. 11333–11342. — DOI: 10.1021/acsami.8b00965.
 11. **Ло Н., Ли С.-Цз., Ван С.-Х., Мо Ф., Ван С.-Т.** Детонационный синтез металлических наночастиц, покрытых углеродом // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 130–135.
 12. **Zhao T. J., Li X. J., Yan H. H.** Metal catalyzed preparation of carbon nanomaterials by hydrogen-oxygen detonation method // Combust. Flame. — 2018. — V. 196. — P. 108–115. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.06.011.
 13. **Zhao T., Wang X., Zhao L., Li X. J., Yan H. H.** Fabrication and wave absorption property of Co-C material prepared by direct detonation of gaseous hydrocarbon fuels // Diamond Relat. Mater. — 2019. — V. 99. — P. 107525. — DOI: 10.1016/j.diamond.2019.107525.
 14. **Zhao T. J., Wang X. H., Li X. J., Wang Y., Song X. H., Yan H. H.** Gaseous detonation synthesis of Co@C nanoparticles/CNTs materials // Mater. Lett. — 2019. — V. 236. — P. 179–182. — DOI: 10.1016/j.matlet.2018.10.105.
 15. **Dresselhaus M. S., Jorio A., Hofmann M., Dresselhaus G., Saito R.** Perspectives on carbon nanotubes and graphene raman spectroscopy // Nano Lett. — 2010. — V. 10, N 3. — P. 751–758. — DOI: 10.1021/nl904286r.
 16. **Sharifi T., Nitze F., Barzegar H. R., et al.** Nitrogen doped multi walled carbon nanotubes produced by CVD-correlating XPS and Raman spectroscopy for the study of nitrogen inclusion // Carbon. — 2012. — V. 50, N 10. — P. 3535–3541. — DOI: 10.1016/j.carbon.2012.03.022.
 17. **Song S. Q., Yang H. X., Rao R. C., Liu H., Zhang A.** High catalytic activity and selectivity for hydroxylation of benzene to phenol over multi-walled carbon nanotubes supported Fe₃O₄ catalyst // Appl. Catal. A. — 2010. — V. 375, N 2. — P. 265–271. — DOI: 10.1016/j.apcata.2010.01.008.
 18. **Lahiri I., Seelaboyina R., Hwang J. Y., Banerjee R., Choi W. B.** Enhanced field emission from multi-walled carbon nanotubes grown on pure copper substrate // Carbon. — 2010. — V. 48, N 5. — P. 1531–1538. — DOI: 10.1016/j.carbon.2009.11.064.
 19. **Kim C. W., Cha H. G., Kim Y. H., Jadhav A. P., Ji E. S., Kang D. I., Kang Y. S.** Surface investigation and magnetic behavior of Co nanoparticles prepared via a surfactant-mediated polyol process // J. Phys. Chem. C. — 2009. — V. 113, N 13. — P. 5081–5086. — DOI: 10.1021/jp809113h.
 20. **Xiang J., Li J. L., Zhang X. H., Ye Q., Xu J. H., Shen X. Q.** Magnetic carbon nanofibers containing uniformly dispersed Fe/Co/Ni nanoparticles as stable and high-performance electromagnetic wave absorbers // J. Mater. Chem. A. — 2014. — V. 2, N 40. — P. 16905–16914. — DOI: 10.1039/c4ta03732d.
 21. **Fu M., Jiao Q. Z., Zhao Y., Li H. S.** Vapor diffusion synthesis of CoFe₂O₄ hollow sphere/graphene composites as absorbing materials // J. Mater. Chem. A. — 2014. — V. 2, N 3. — P. 735–744. — DOI: 10.1039/c3ta14050d.
 22. **Liu Q., Liu X., Feng H., Shui H., Yu R.** Metal organic framework-derived Fe/carbon porous composite with low Fe content for lightweight and highly efficient electromagnetic wave absorber // Chem. Eng. J. — 2017. — V. 314. — P. 320–327. — DOI: 10.1016/j.cej.2016.11.089.
 23. **Li G. M., Wang L. C., Li W. X., Xu Y.** Mesoporous Fe/C and core-shell Fe—Fe₃C@C composites as efficient microwave absorbers // Microporous Mesoporous Mater. — 2015. — V. 211. — P. 97–104. — DOI: 10.1016/j.micromeso.2015.02.054.
 24. **Li X. A., Han X. J., Du Y. C., Xu P.** Magnetic and electromagnetic properties of composites of iron oxide and Co—B alloy prepared by chemical reduction // J. Magn. Magn. Mater. — 2011. — V. 323, N 1. — P. 14–21. — DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.07.037.
 25. **Zhang X. F., Dong X. L., Huang H., et al.** Microwave absorption properties of the carbon-coated nickel nanocapsules // Appl. Phys. Lett. — 2006. — V. 89, N 5. — P. 053115. — DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2236965>.
 26. **Jiang L. W., Wang Z. H., Geng D. Y., Wang Yu., An J., He J., Li D., Liu W., Zhang Z. D.** Carbon-encapsulated Fe nanoparticles embedded in organic polypyrrole polymer as a high performance microwave absorber // J. Phys. Chem. C. — 2016. — V. 120, N 49. — P. 28320–28329. — DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b09445.

27. **Liu X., Or S. W., Sun Y., et al.** Influence of a graphite shell on the thermal, magnetic and electromagnetic characteristics of Fe nanoparticles // J. Alloy Compd. — 2013. — V. 548. — P. 239–244. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.09.006.
28. **Zhao T., Wang X., Li X., Wang Y., Song X., Yan H. H.** Gaseous detonation synthesis of Co@C nanoparticles/CNTs materials // Mater. Lett. — 2019. — V. 236. — P. 179–182. — DOI: 10.1016/j.matlet.2018.10.105.
29. **Li X., Zeng X., Li X., Yan H., Wang X., Pan X.** Formation mechanism and electromagnetic-microwave-absorbing properties of carbon-encapsulated permalloy nanoparticles prepared by detonation // Mater. Chem. Phys. — 2018. — V. 220. — P. 1–10. — DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.08.021.

Поступила в редакцию 07.09.2020.

После доработки 16.03.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.
