



УДК 537.874.7 + 538.97

МИКРОВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

*Л.В. Кожитов, **А.П. Кузьменко, *Д.Г. Муратов, **В.В. Родионов,
*А.В. Попкова, *Е.В. Якушко

* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский пр., 4, Москва, Россия

** Региональный центр нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, 94, Курск, Россия

Аннотация. Металлоуглеродные нанокomпозиты на основе полиакрилонитрила и соединений металлов (Fe, Ni, Co), синтезированные под действием ИК-нагревания и исследованные методами СЭМ, РФА, КРС, ИК-Фурье спектроскопии, характеризуются углеродной наноструктурированной аморфной графитовой матрицей с равномерно распределенными наночастицами металлов (10-30 нм), их оксидов и соединений — FeNi_3 и FeCo , многослойных углеродных нанотрубок (~ 7 -22 нм), а в составе нанокomпозита Fe-Co/C фуллероподобных образований — C_{60} . Для всех нанокomпозитов отмечается высокий уровень поглощения ЭМ-волн в диапазоне частот 20-40 ГГц. Предложены два механизма поглощения: диэлектрические потери в аморфной углеродной матрице и рассеивание электрической и магнитной составляющей ферромагнитными включениями.

Ключевые слова: полиакрилонитрил, ИК-нагрев, металлоуглеродные нанокomпозиты, наночастицы металлов, КР-спектроскопия, углеродные нанотрубки, ферромагнитные наночастицы, радиопоглощающие материалы, коэффициент передачи, коэффициент отражения.

Введение. Расширение частотного диапазона (до десятков ГГц), уровень развития беспроводной связи и микропроцессорной техники обострили проблему защиты информационных систем от электромагнитных помех и несанкционированного доступа. Исследования и разработки широкополосных поглотителей электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне сосредоточены преимущественно на явлениях отражения и затухания, обусловленных комплексностью диэлектрической и магнитной проницаемостей и изменением импеданса сред [1], а также на создании поглощающих покрытий, обладающих четко выраженной наноструктурой [2–6] или состоящих из наночастиц с высоким порогом насыщения намагниченности и магнитной проницаемости [7]. Однако металлические магнитные наночастицы и поглощающие наноструктурированные покрытия не обеспечивают в широком гигагерцовом диапазоне достаточно стабильного коэффициента поглощения, так как он оказывается резонансно-зависящим от толщины покрытия и/или размеров, образующих наноструктуры. Широко исследуются нанокapsулированные материалы, состоящие из диэлектрических оболочек и магнитных ядер, которые характеризуются эффективным электромагнитным поглощением [8–13].

Работа была выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов № СП-4341.2013.1.



В настоящей работе изучены углерод-ферромагнитные [14, 15] системы, обладающие как высокой электропроводностью, определяемой степенью упорядоченности углеродных структур и фаз, включая углеродные нанотрубки (УНТ), так и большими значениями намагниченности насыщения ферромагнитных фаз, комплексная проницаемость которых слабо зависит от частоты вследствие потерь на вихревые токи, индуцируемые электромагнитной волной.

Методика эксперимента. Образцами для исследования служили металлоуглеродные наноконпозиты Fe-Ni/C – (1), Fe/C – (2), Ni/C – (3) и Fe-Co/C – (4) на основе полиакрилонитрила (ПАН) [14, 15]. Прекурсоры для образцов 1÷3 готовились путем совместного растворения ПАН и гидрата хлорида соответствующего металла в диметилформамиде (ДМФА) с последующим удалением растворителя. Концентрация ПАН в растворе ДМФА составляла 5 вес.%, металла 20 вес.% от массы полимера. В образец 4 железо вводилось в виде ацетилацетоната ($\text{Fe}(\text{CH}_3\text{COCH}=\text{C}(\text{CH}_3)\text{O})_3$), кобальт-ацетата ($\text{Co}(\text{COOH})_2$). Пиролиз проводился в камере ИК-нагрева установки «MILA-5000». ИК-нагрев осуществлялся в двухстадийном режиме: предварительный отжиг на воздухе при 150 и 200°C по 15 мин. на каждой температурной стадии. В процессе нагрева удалялись остатки комплексно связанного с полимером растворителя и происходила первоначальная циклизация и структурирование ПАН. Основной этап ИК-нагрева производился в вакууме ($\sim 10^{-3}$ мм. рт. ст.) при температурах 500-800°C. Продолжительность основной стадии составляла 15 мин (См. таб. №1) [14].

Таблица 1: Исходные параметры прекурсоров синтеза наноконпозитов

п/п	Наноконпозит	Исходный состав	Концентрация металлов, вес.%	Соотношение металлов	Температура синтеза, °C
1	Fe-Ni/C	FeCl ₃ (гидр.)-NiCl ₂ (гидр.)/ ПАН	20	1÷1	500
2	Fe/C	FeCl ₃ (гидр.)/ ПАН	20	-	600
3	Ni/C	NiCl ₂ (гидр.)/ ПАН	20	-	500
4	FeCo/C	Fe(ац.ац.)-Co(ац.)/ ПАН	20	1÷1	800

Морфологические особенности и изменения структуры поверхностей в исследуемых материалах изучались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6610LV (SEM, 20кВ, до 200000×). Распределение химических элементов определялось энергодисперсионным анализатором (ЭДА) Oxford Instruments X-Max Silicon Drift Detector 20мм² с разрешающей способностью 0.1мкм. Фазовый анализ (РФА) образцов прово-



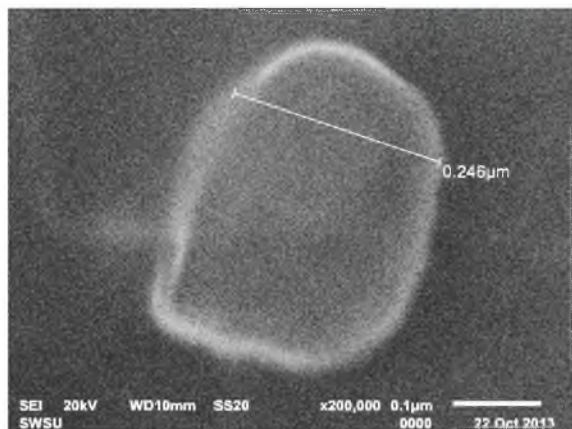
дился на порошковом дифрактометре ЕММА (60 кВ, 80 мА, Cu K α , 1.54 Å). Проводимость образцов в форме прессованной таблетки (250 атм, 1.1÷1.6×20 мм) определялась с помощью LCR-метра Instek LCR-7821 при переменном сигнале U=1 В на частоте f = 1 кГц. Комплексный коэффициент отражения – S₁₁ и комплексный коэффициент передачи – S₂₁ для всех образцов были измерены с помощью векторного анализатора цепей Anritsu Wiltron 37369A в объемном резонаторе (28WCAK, КСВН=1.30), который обеспечивал выделение и детектирование уровней падающей и отраженной волн электромагнитного излучения, прошедших и отраженных от образца. Перед началом измерений экранирующих характеристик производилась калибровка Anritsu Wiltron 37369A по стандартной методике. Исследуемые пакетированные в полиэтилен порошки плотно заполняли резонатор. В диапазоне частот 20–40 ГГц были получены абсолютные величины частотных зависимостей S₂₁ (RL) и S₁₁ как коэффициента отражения стоячей волны по напряжению (КСВН).

Результаты и обсуждения. По данным растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энерго дисперсионного анализа (ЭДА) углеродные частицы обладают преимущественно вытянутой формой размерами 0.5 – 1.0 мкм, тогда как образования со сфероподобной формой, в соответствии с данными ЭДА являющиеся металлическими включениями, имеют размеры от 50 до 200 нм (Рис. 1 а – г). По данным элементного состава (в атомных массах) исследуемых образцов 1 и 4 (Табл. 2) после термической обработки атомное содержание всех порошковых образцов Fe–Ni, Ni, Fe и Fe–Co понижается с 20 % в исходном состоянии до 16.4, 3.6, 5.5 и 3.1%, соответственно.

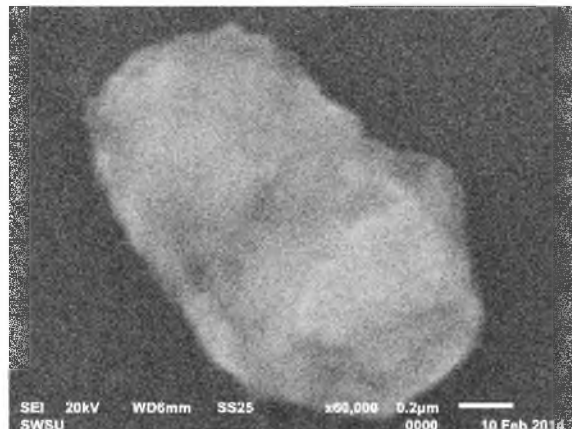
Таблица 2: Данные энергодисперсионного анализа

Номер образца	Распределение элементов, в атомных массах					
	C	N	O	Fe	Co	Ni
1	50.2	19.9	13.6	8.6	0	7.8
2	63.9	20.4	12.1	3.6	0	0
3	65.3	22.3	7.0	0	0	5.5
4	96.9	0	0	1.5	1.6	0

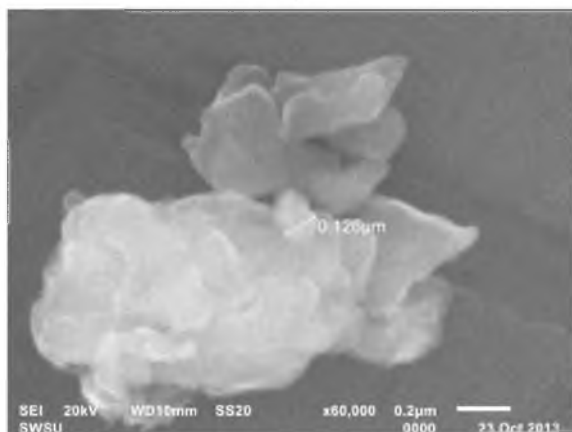
Результаты РФА представлены в виде дифрактограмм (Рис. 2 а – г). Для образцов 1 и 4 отмечается формирование дифракционных максимумов на углах 2 Θ = 26.6 и 26.2°, характерных для гексагональной структуры графита с межслоевым расстоянием d равным 3.40Å и 3.35Å от плоскостей (002) и (004), соответственно, тогда как для образца 3 в диапазоне 15 – 30° можно говорить о формировании аморфного гало. Рефлексы 2 Θ = 43.32 и 2 Θ =44.76° в образцах 2 и 3 соответствуют кубическим решеткам железа (d=2.01Å) и никеля (d=1.95Å), а рефлексы 2 Θ = 33.0°, 35.7°, 37.1° и 44.9°, 45.0° – соединениям железа – Fe₂O₃ и FeC, а 2 Θ = 37.0°, 43.1° и 44.9°, 45.1 – никеля – NiO и Ni₃C, соответственно, что согласуется с данными [2, 8]. Максимумы 2 Θ =25.9°, 43.0° (рис. 2, в) соответствуют плоскостям (002) и (100) гексагональной структуры с



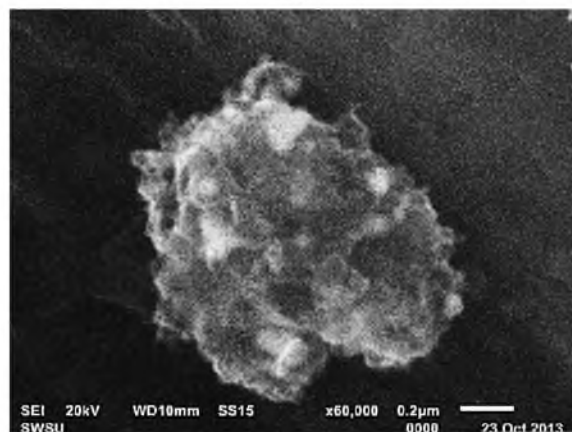
a)



b)



c)



d)

Рис. 1: РЭМ изображения углеродных композитов с включениями металлических частиц: а) Fe-Ni; б) Fe; в) Ni; г) Fe-Co (60000× – 200000×).

параметрами 3.53\AA и 2.26\AA , что характерно для материалов, содержащих углеродные нанотрубки и, вероятно, обусловлено наличием значительного количества свободных атомов Ni в реакционной камере при ИК-нагреве, способных вызывать рост углеродных нанотрубок из газообразных углеродсодержащих компонентов [10]. Особо выделяется дифрактограмма для образца 4, на которой, помимо гало углеродной матрицы с максимумом $2\Theta = 26.6^\circ$, содержатся линии $2\Theta = 44.8^\circ$ и меньшей интенсивности $2\Theta = 65.5^\circ$ (Рис 2, г), отвечающие ОЦК-решетке соединения «железо–кобальт» с межплоскостными расстояниями 2.01\AA и 1.42\AA от плоскостей (110) и (200) [2, 3]. Возникновение на дифрактограммах образцов 1÷3 рентгенофазового гало указывает на высокую степень аморфности матрицы. В то же время, для образца 4 наблюдается более четкий максимум, а также гало отличается меньшей степенью размытости, что указывает на более упорядоченную структуру углеродной матрицы нанокompозита. С ростом температуры синтеза нанокompозитов (800°C) сохраняется четкая кристаллическая структура для

сплава Fe–Co, при этом увеличивается интенсивность линии, отвечающей углеродной графитоподобной матрице.

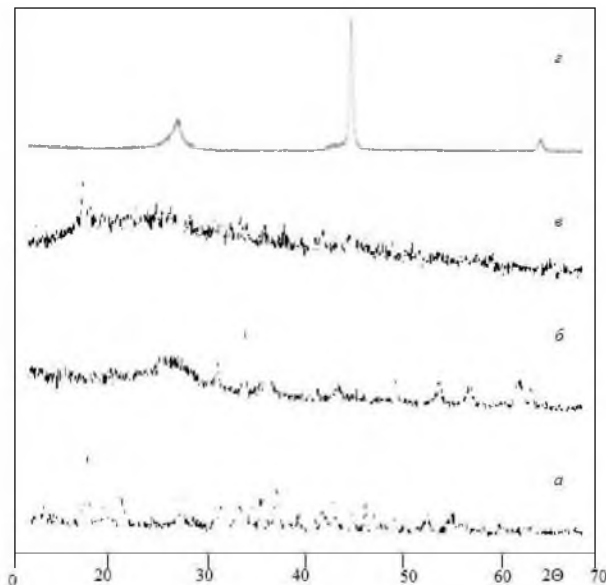


Рис. 2. РФА углеродных композитов (образцы 1–4), с включениями металлических частиц: а) Fe – Ni; б) Fe; в) Ni; г) Fe – Co.

На основании результатов РФА и СЭМ+ЭДА можно утверждать, что металлоуглеродные нанокompозиты представляют собой наночастицы металлов (сплавов) либо оксидов, распределенных в углеродной матрице с различной степенью аморфности, что определяется как условиями процесса синтеза, так и химическим составом металлической составляющей нанокompозита.

Особенности химической структуры углеродной матрицы, составляющей наибольшую часть массы нанокompозита, изученные методом комбинационного (Рамановского) рассеяния света (КРС) представлены на рис. 3. Во всех образцах отмечалось возбуждение тангенциальных колебаний атомов углерода в плоскости графитового слоя G-полоса в области $1500 \div 1600 \text{ см}^{-1}$, что в ряде публикаций относят к наличию углеродных нанотрубок (УНТ) или аналогичных углеродных образований, характеризующихся сильным искривлением графеновых плоскостей [9, 10]. Степень упорядоченности структуры графита определяется четкостью формы и интенсивностью G-полосы, что характерно только для образца 4. Интенсивность возбуждений в D-полосе в диапазоне $1300 \div 1400 \text{ см}^{-1}$ в 1–3 образцах доминировала, что свидетельствует о высокой дефектности плоскостных образований, т. е. степени аморфизации графитового слоя, обусловленной нерегулярным смещением или искривлением углеродных плоскостей, состоящих из sp^2 -гибридизованных атомов углерода. Это согласуется с данными РЭМ (Рис. 1). Для характеристики степени упорядоченности углеродных структур используется отношение интенсивностей полос I_D/I_G . Сравнение полученных таким образом величин демонстрируют данные таб. 3. Наибольшим упорядочением отличается образец 4 (Fe–Co). Для образцов с 1 по 3 отмечается расширение G-полосы за счет возбуждения



близких по частоте колебаний. К примеру, для образца 3 – 1487, 1509, 1530 и 1576 см^{-1} , по разнице между которыми можно оценить диаметры УНТ: $1/\Delta\omega \sim$ от 6.6 до 22 нм. Такое вырождение в форме G-полосы говорит о многостенной форме УНТ и металлической электропроводности. Для всех исследованных образцов в области низких частот обнаруживаются радиальные колебания УНТ (RBM-полоса на вставке к рис. 3), что указывает на существование одностенных УНТ, так как радиальные колебания соседних атомов углерода в многостенных УНТ невозможны. Диаметр УНТ обратно пропорционален частотам в RBM-полосе [10]. Для всех образцов в RBM-полосе возбуждается ряд линий (три и более) в диапазоне $480 \div 672 \text{ см}^{-1}$. Приняв во внимание, определенный по расширению в G-полосе для образца 3 наименьший диаметр УНТ – 6.6 нм, и выводы [10] ($\omega_{RBM} \sim A/d - B$, где A и B – эмпирические постоянные, а d – диаметр УНТ) можно ожидать образование УНТ с d более 10 нм (вставка на рис. 3).

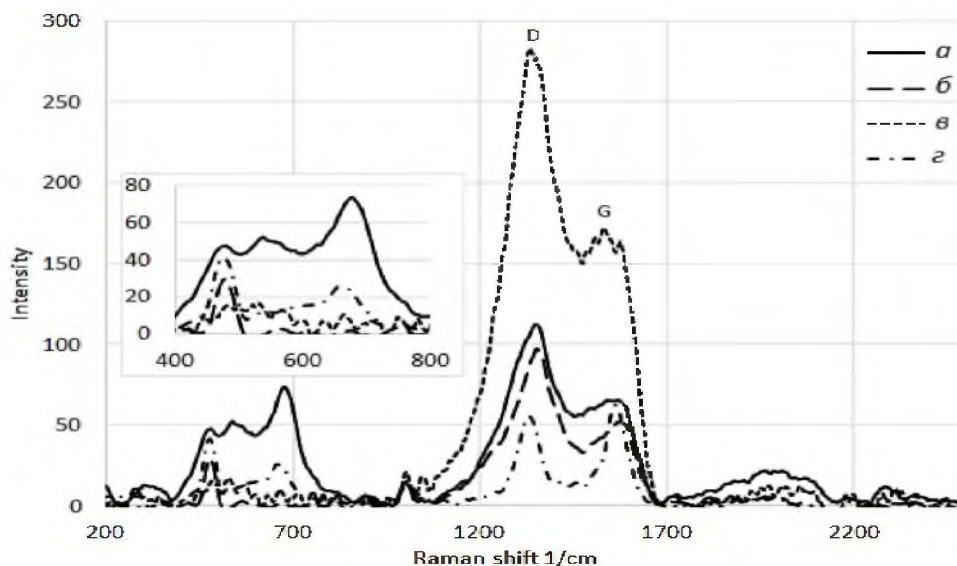


Рис. 3. КРС углеродных композитов 1–4, с включениями металлических ферромагнитных частиц: а) Fe – Ni; б) Fe; в) Ni; г) Fe – Co.

Таблица 3: Аморфизация образцов, рассчитанная по G- и D- полосам

Образцы	G		D		Степень аморфизации
	Волновое число, см^{-1}	Интенсивность, отн. ед.	Волновое число, см^{-1}	Интенсивность, отн. ед.	
1	1571.4	280.9	1356.6	323.1	1.15
2	1559.3	156.5	1359.6	203.7	1.30
3	1529.6	441.5	1344.4	538.8	1.22
4	1561.1	154.5	1329.9	146.5	0.95



Электрические характеристики исследуемых образцов (сопротивление, индуктивность, емкость, тангенс угла потерь и добротность) были изучены LCR-метром Instek LCR-819. Проводимость порошковых образцов 1÷3 оказалась порядка 1×10^{-6} См/м, то есть была близкой по значениям к диэлектрической, тогда как для образца 4–2 См/м — была близкой к металлической. Столь существенная разница определяется как степенью упорядоченности углеродной матрицы нанокompозита, так и отсутствием окисных форм металла. Комплексность диэлектрической и магнитной проницаемости среды: $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$ и $\mu^* = \mu' - i\mu''$ определяет как эффективность СВЧ-поглощения по величине мнимых составляющих ε'' и μ'' , так и передачи электромагнитной энергии по действительным — ε' и μ' . В режиме согласованного импеданса: свободное пространство Z_0 (вакуум, воздух) и внешний слой поглотителя $Z_{\text{пог}}$ имеет место слабое отражение электромагнитных волн от поверхности материала диэлектрическая и магнитная проницаемости совпадают $\varepsilon^* = \mu^*$ и по величине приближаются к единице. Таким условиям вполне могут удовлетворять пористые или композитные материалы. Коэффициент отражения RL в СВЧ-диапазоне для них: $RL = 20 \log |(Z_{\text{пог}} - Z_0)/(Z_{\text{пог}} + Z_0)|$ [11], что делает возможным создание из них экранирующих покрытий с высокой электропроводностью. Релаксационные потери $P_{\text{рлп}}$, очевидно, будут обусловлены дипольной поляризацией диэлектрика, что происходит потому, что скорость поляризации P заведомо отстает от скорости изменения электрического поля E излучения: $k_l a = ka(\varepsilon\mu)^{-1/2}$, где k_l и k — волновые векторы, a — радиус сферической поверхности, ε и μ — проницаемости среды. Величина потерь характеризуется работой $W_{\text{рлп}}$, затрачиваемой переменным электрическим полем на поляризацию единицы объема диэлектрика: $P = \int (r - R)d^3r$, здесь — электронная плотность, R — радиус частицы. Величина P , к примеру, для одного атома Ni мала и составляет 1.11×10^{-30} Кл·м [12]. Однако ситуация изменяется, при переходе к наноразмерам и еще более сильно к кластерным образованиям, которые возникают в исследуемых образцах (Рис. 1). С учетом реально наблюдаемых размеров кластеров — до нескольких мкм, величина P для агломератов металлических частиц может на несколько порядков возрасти. Существенной становится ферромагнитная природа используемых частиц металлов (Fe, Ni и Co), которым свойственно возбуждение вихревых поверхностных токов Фуко, тем более в СВЧ-диапазоне за счет скин-эффекта. Глубина проникновения СВЧ-излучения: $\delta = (\pi f \xi \sigma)^{-1/2}$ [6], где f — частота СВЧ, $\xi = \mu_0 \mu^*$, σ — электропроводность, может быть рассчитана с учетом размеров капсулированных в углеродной оболочке ферромагнитных наночастиц [9], которые по данным просвечивающей электронной микроскопии, составляют ~ 10 –50 нм, так и области ими занимаемой по Результатам РЭМ — несколько сотен нм (рис. 1, а и б). Исходя из данных предпосылок δ была оценена по значениям магнитной проницаемости μ^* для углеродной оболочки равной 1, а для ферромагнитных частиц 10^3 , электропроводности σ для углерода и частиц составили 1 и 10^7 См/см. В исследованном диапазоне частот $f = 2 \times \div 4 \times 10^{10}$ Гц, δ для углеродной оболочки — 1 см, а для ядра — 100 нм. Таким образом, рассеяние микроволновой энергии носит объемный характер.

На рис. 4 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ S_{21} для всех изученных образцов, полученные на Anritsu Wiltron 37369A. Видно, что величина S_{21} для образцов с диэлектрической проводимостью является довольно низкой с пиковыми зна-

чениями – 8.68 для образца 1, 12.93 – 2 и 7.07 дБ – 3 в частотном диапазоне 20–40 ГГц. Отметим, что при величине поглощения 20 дБ значения микроволновой энергии уменьшаются на 99% [6]. Таким образом, обнаруженные в образцах 1÷3 величины S_{21} можно считать вполне приемлемыми. Образец 4, показавший хорошую проводимость, обладает СВЧ-поглощением со значением, характерным для металлов: более 40 дБ во всём исследуемом диапазоне [1]. То есть S_{21} резко отличается. Качественное объяснение наблюдаемых особенностей в спектрах СВЧ-поглощения (Рис. 4) применительно к образцам 1÷3 и 4, видимо, обусловлено разными механизмами.

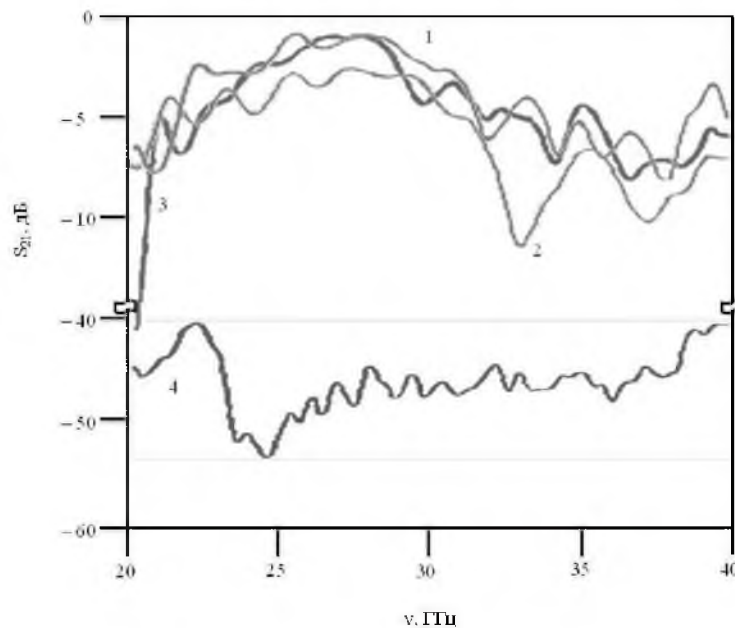


Рис. 4. АЧХ коэффициента передачи для углеродных композитов №1–4, с включениями металлических частиц: 1–Fe/Ni; 2–Fe; 3–Ni; 4–Fe/Co.

Для образцов первой группы (образцы 1-3) СВЧ-поглощение вызывается вкладами как диэлектрических потерь в сильно аморфной углеродной матрице, содержащей продукты пиролиза ПАН, обладающей низким значением электропроводности, так и рассеянием электрической и магнитной составляющей падающей электромагнитной волны ферромагнитными включениями. Собственное поглощение твердофазными полярными комплексами в углеродной матрице нанокompозитов, содержащей продукты пиролиза ПАН, при прохождении СВЧ-излучения, когда исключались ионизация (энергия меньше $E_{\text{ион}}$) и электронная поляризация (частота меньше 10^{13} ГГц), может быть вызвано только резонансными явлениями в исследуемом диапазоне частот (20÷40 ГГц), что подтверждается видом спектра СВЧ-поглощения (Рис. 4). По данными ИК-спектроскопии, полученным на ИК-Фурье спектрометре iS50 в среднем диапазоне, в образцах 1-3 наблюдалось поглощение на близких частотах в интервалах: $500 \div 800$, $840 \div 1600$, $1700 \div 2400$ и $2900 \div 3600$ см^{-1} , которые соответствуют колебаниям УНТ и различных комплексов с ними связанных [11]. Очевидно, что интенсивность



возбуждаемых вихревых токов (плотностью j) возрастает с ростом проводимости, также как и величина пондеромоторной силы в переменном магнитном поле (Н) СВЧ-излучения: $F = \mu_0 \mu j H$, которая приводит к упругим колебаниям в системе «наноклеродные структуры-ферромагнитные наночастицы», в частности, на УНТ, наличие которых предположительно установлено по результатам КРС (Рис. 3). Таким образом, поглощение в образцах 1-3 может быть обусловлено резонансным поглощением комплексов [9] «углеродные структуры – ферромагнитные частицы» при совпадении частоты их собственных колебаний ω_0 с частотами СВЧ-излучения: $\omega_0 = (1/2\pi)(\gamma/m)$, где γ – жесткость, а m – масса УНТ, оценка которых указывает на их совпадение с СВЧ-частотами.

СВЧ-поглощение для образца 4 оказалось наибольшим при f – частоте СВЧ 24.27 ГГц и достигло 52.83дБ. Отметим, что этот композит обладает значениями электропроводности, характерной для полупроводников (2 См/м). ИК-Фурье спектр этого образца во многом согласуется со спектром C_{60} [9], в нем возникает самая интенсивная линия поглощения: 530 см^{-1} . Также образование фуллеренов либо подобных им структур при 800°C подтверждается и наличием соответствующей линии в спектре КРС (Рис. 4) – 1460 см^{-1} . Таким образом, комплекс «углеродные структуры – ферромагнитные частицы» в образце 4 может приводить к экранированию для СВЧ-излучения. Учитывая, что удельная намагниченность насыщения системы наночастиц FeCo на 80% выше, чем у FeNi: 210 и 120 Гс/г [4], соответственно, потери на вихревые токи должны быть дополнены гистерезисными магнитными потерями из-за перемагничивания в ферромагнитных включениях.

Заключение. Таким образом, показано, что металлоуглеродные нанокомпозиты с ферромагнитными металлическими включениями, полученные под действием ИК-нагрева, являются эффективными поглотителями ЭМ-излучения. Установлено, что введение ферромагнитных наночастиц в углеродные наноструктурированные матрицы увеличивает коэффициент СВЧ-поглощения во всех исследуемых образцах. Экспериментально установлено, что СВЧ-поглощение в практически значимом динамическом диапазоне может быть обусловлено, как составом и структурой углеродной матрицы, так и включениями ферромагнитных наночастиц.

Литература

1. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн // Физическая инженерия поверхности. – 2003. – №2. – С.161–173.
2. Lu Wei, Ping Huang, Chenchong He, Biao Yan XRD, SEM and XAS Studies of FeCo Films Electrodeposited at Different Current Density // Int. J. Electrochem. – 2013. – 8. – P.914–923.
3. Lee G.H., Lee G.H., Huh S.H., Jeong J.W. Structural and magnetic properties of bimetallic FeCo nanoclusters // Journal of the Korean Physical Society. – 2003. – 42. – P.367–370.
4. Meshcheryakov V.F., Fetisov Y.K. et al. Magnetic and microwave properties of nanocomposite films on the basis of Fe–Co–Ni particles of various shapes // Journal of applied physics. – 2008. – 104. – P.063910–1 – 063910–8.
5. Bayrakdar H. Electromagnetic propagation and absorbing property of ferrite–polymer nanocomposite structure // Progress In Electromagnetics Research. – 2012. – 25. – P.269–281.



6. Jingbo Guo, Yuping Duan, Lidong et al. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Carbonyl-Iron/Fe₉₁Si₉ Composites in Gigahertz Range // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. – 2011. – 3. – P.140 – 146.
7. Yan S.J., Yan S.J., Zhen L., Xu C.Y. Synthesis, characterization and electromagnetic properties of Fe_{1-x}Co_x alloy flower-like microparticles // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2011. – 323. – P.515–520.
8. Jingjing Jiang, Han Wang, Huaihong Guo et al. Microwave absorption properties of Ni/(C, silicides) nanocapsules // *Nanoscale Research Letters*. – 2012. – 238. – P.1–7.
9. Dong X.L., Dong X.L., Zhang Z.D., Jin S.P., Kim B.K. Carbon-coated Fe–CoC nanocapsules prepared by arc discharge in methane // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – 86. – P.6701–6706.
10. Удовицкий В.Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // *Физическая инженерия поверхности*. – 2009. – №4. – С.351–373.
11. Kim U.J., Liu X.M., Furtado C.A. et al. Infrared-Active Vibrational Modes of Single-Walled Carbon Nanotubes // *PRL*. – 2005. – 95. – 157402-1–157402-4.
12. Han Z., Li D., Wang H. et al. Broadband electromagnetic-wave absorption by FeCo/C nanocapsules // *Applied physics letters*. – 2009. – 95. – P.023114-1–023114-3.
13. Astakhov M.V., Muratov V.A., Frantsuzov A.A. Natural frequencies of vibration of fine particles and interaction of the particles with electromagnetic radiation // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 1995. – 7. – P.4565–4571.
14. Кожитов Л.В., Козлов В.В., Костицова А.В., Попкова А.В. и др. Новые металлоуглеродные наноконкомпозиты и углеродный нанокристаллический материал с перспективными свойствами для развития электроники // *Известия Вузов. Материалы электронной техники*. – 2012. – №3. – С.60–68.
15. Kozhitov L.V., Kuzmenko A.P., Kozhitov S.L. Influence of the ratio of metal composed nanocomposites Fe–Co/C on phase composition // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2013. – 5, №4. – P.040007-1–040007-4.

MICROWAVE PROPERTIES OF METAL-CARBON NANOCOMPOSITES WITH FERROMAGNETIC METALLIC INCLUSIONS

*L.V. Kozhitov, **A.P. Kuzmenko, *D.G. Muratov, **V.V. Rodionov, *A.V. Popkov
*E.V. Yakushko

*National University of Science and Technology "MISIS
Leninsky Av., 4, Moscow, Russia

**Regional Nanotechnology Center of Southwest State University,
October St., 50, Kursk, Russia

Abstract. Metalcarbon nanocomposites based on polyacrylonitrile and metal compounds (Fe, Ni, Co), synthesized under the influence of infrared heating and investigated by SEM, XRD, Raman, IR spectroscopy are characterized by carbon graphite nanostructured amorphous matrix with homogeneously distributed metal nanoparticles - FeNi₃ and FeCo (10-30 nm), MWCNT (~7-22 nm), and C₆₀. It is shown high absorption of EM waves in the frequency range 20-40 GHz. Two mechanisms of absorption: dielectric losses in the amorphous carbon matrix and dispersion of the electric and magnetic component of ferromagnetic inclusions are proposed.

Keywords: polyacrylonitrile, infrared heating, metalcarbon nanocomposites, metal nanoparticles, Raman spectroscopy, carbon nanotubes, ferromagnetic nanoparticles, absorbing materials, the gain, the reflection coefficient.