

УДК 537.528:621.763

Н. И. КУСКОВА, А. Д. РУДЬ, С. В. ПЕТРИЧЕНКО, Д. И. ЧЕЛПАНОВ, П. Л. ЦОЛИН**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Показана перспективність методу електророзрядної обробки рідких і газоподібних вуглеводнів для синтезу радіопоглинаючих вуглецевих наноматеріалів. Досліджені електрофізичні властивості синтезованих вуглецевих наноматеріалів, що відрізняються структурним станом. Показано, що ВНТ і нановуглець цибулинної структури, які характеризуються великими величинами питомої електропровідності і містять ферромагнітні наночастинки, є ефективними поглиначами електромагнітного випромінювання в частотному діапазоні від 25 до 38 ГГц.

Ключові слова: електророзрядна обробка, вуглецеві наноматеріали, вуглецеві нанотрубки, цибулинні структури вуглецю, електрофізичні властивості.

Показана перспективність методу електророзрядної обробки жидких и газообразных углеводородов для синтеза радиопоглощающих углеродных наноматериалов. Исследованы электрофизические свойства синтезированных углеродных наноматериалов, отличающихся структурным состоянием. Показано, что УНТ и нанотрубка луковичной структуры, характеризующиеся большими величинами удельной электропроводности и содержащие ферромагнитные наночастицы, являются эффективными поглотителями электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц.

Ключевые слова: електророзрядна обробка, углеродные наноматериалы, углеродные нанотрубки, луковичные структуры углерода, электрофизические свойства.

The prospect of the method of electrical discharge treatment of liquid and gaseous hydrocarbons (hexane, cyclohexane, ethanol, kerosene and following gases) for the synthesis of radioabsorbing carbon nanomaterials was shown. Selected electrical and physical properties (specific electrical conductivity, electromagnetic radiation reduction and refraction) of various synthesized carbon nanomaterials distinguished by their structural state (amorphous carbon, carbon films, onion-like carbon, carbon nanotubes) were studied. It was shown that the carbon nanotubes and onion-like nanocarbon characterized by very high values of specific conductivity and comprising ferromagnetic nanoparticles, are efficient absorbers of electromagnetic radiation in the frequency range from 25 to 38 GHz.

Keywords: electrical discharge treatment, carbon nanomaterials, carbon nanotubes, onion-like carbon structures, electrical and physical properties.

Введение. Углеродные наноматериалы (УНМ) могут обладать рядом ценных качеств (высокая электро- и теплопроводность, прочность, устойчивость к механическим и температурным воздействиям). Специфические и уникальные свойства УНМ и углеродных нанотрубок (УНТ) – в виде порошков, пленок и композитов, – делают их перспективными для применения в качестве материалов для силовой электроники, катодов с холодной эмиссией электронов, эффективных электродов для электрических батарей и емкостей, радиочастотных фильтров, экологических сенсоров и т.д. Особый интерес представляют пленки и композиты из УНТ, которые можно использовать для создания высокоэффективных и недорогих систем защиты мобильных телефонов, микроволновых печей и компьютеров от электромагнитных излучений. Для защиты электронного коммерческого и оборонного оборудования требуются материалы с эффективностью экранирования (за счет отражения, поглощения, интерференционного гашения) более 30 дБ [1,2].

Анализ предварительных исследований и литературы. Электроразрядная обработка (ЭРО) углеводородов, благодаря возможности создания экстремальных условий (высоких температур и давлений), приводит к деструкции и разложению молекул сырья с последующим образованием различных видов УНМ и смеси газов (водорода и низших углеводородов). Одновременная обработка как жидких, так и образующихся газообразных углеводородов в разных разрядных камерах при определенных режимах энергет-

вода, использование катализаторов, углеводородов, отличающихся степенью гибридизации атомов углерода в молекулах и строением молекул, позволяет получать различные виды УНМ в одном технологическом процессе [3-7]. Для определения эффективности применения синтезированных УНМ в различных технологиях необходимо исследовать их электрофизические свойства. Наиболее актуальными на сегодняшний день являются экспериментальные исследования электромагнитных свойств УНМ и нанокompозитов.

Цель работы – анализ электрофизических свойств различных УНМ (аморфного углерода, углеродных пленок, луковичных структур углерода (ЛСУ) и УНТ), синтезированных методом ЭРО углеводородов.

Методика исследований. Различные УНМ получали в непрерывном процессе ЭРО органических жидкостей и образующихся газов, реализованном в созданной на базе ВТМ 40-12 установке [7]. ЭРО жидкостей проводили в камере с коаксиальной системой электродов, образующиеся при этом газы обрабатывали электрическими разрядами в другой разрядной камере.

Органические жидкости отличались степенью гибридизации электронов в атомах углерода и строением молекул:

- гексан (C_6H_{14}) – класс алканов, характеризующихся sp^3 -гибридизацией атомов;
- циклогексан (C_6H_{12}) – класс циклоалканов, ха-

рактирующихся sp^3 -гибридизацией атомов в замкнутой в кольцо молекуле; также использовался циклогексан с растворенным в нем ферроценом;

– этанол (C_2H_5OH) – одноатомный спирт, характеризующиеся sp^3 -гибридизацией атомов;

– керосин ТС-1 – смесь углеводородов смешанного состава (массовая доля ароматических углеводородов 0,22; химическая брутто-формула $C_{7.2107}H_{3.2936}$).

Рентгеновские исследования выполнены в Институте металлофизики НАН Украины на стандартном дифрактометре в $Cu\ K\alpha$ и $Mo\ K\alpha$ излучениях. Электронная микроскопия проводилась на микроскопе высокого разрешения JEOL JEM-2100F.

Измеряли электрические сопротивления порошковых УНМ в процессе сжатия. Это позволяло найти значение плотности материала, при котором дальнейшее сжатие образца не вызывает роста удельной электрической проводимости [8].

Измерения электрофизических параметров наноматериалов в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне длин волн проводили на основе разработанных физических методов. Для измерений использовали образцы различных электроразрядных УНМ в виде таблеток, полученных прессованием [9,10].

Результаты эксперимента. Действие электрического поля на органические жидкости порождает химические реакции сначала в жидкой, а потом в газоплазменной фазе, которые существенно отличаются. ЭРО углеводородов приводит к каскаду химических превращений, которые включают в себя процессы деструкции (разрыва углеродных связей), дегидрогенизации (разрыва связей $C-H$) и полимеризации (образования новых углеродных связей) [8].

ЭРО жидких алканов и циклоалканов. Известно, что алканы при температуре более 450 оС распадаются на углеводороды с меньшим числом углеродных атомов. Разрыв связи $C-C$ возможен в любом случайном месте молекулы, поэтому образуется смесь алканов и алкенов с меньшей, чем у исходного алкана, молекулярной массой. Процесс ЭРО начинается с диссоциации молекул жидкости, вследствие которой в центральных частях линейных молекул чаще всего происходят разрывы сильных $C-C$ связей, что приводит к образованию углеродных кластеров C_k , водорода и низших углеводородов – газов



где $k + m + p = n$.

В процессе ЭРО циклоалканов, молекулы которых замкнуты в кольцо, часть колец не разрывается, а синтез УНМ происходит вследствие дегидратации – отрыва водорода. Энергия σ -связи $C-C$ в циклоалканах в несколько раз выше энергии связи $C=C$ и выше энергии связи $C-H$, поэтому более вероятным процессом является процесс дегидратации, а разрыв связей $C-C$ приводит к образованию газообразных алканов.

Типичные микрофотографии УНМ, полученных в результате ЭРО жидких циклоалканов и имеющих sp^3 -гибридизацию атомов углерода в молекуле, приведены на рис. 1. Частицы порошков собраны в агломе-

раты и имеют сложное иерархическое строение. Индивидуальные частицы имеют сфероидальную форму, размер частиц от 10 до 20 нм и характеризуются луковичной (onion-like) структурой углерода (рис. 1).

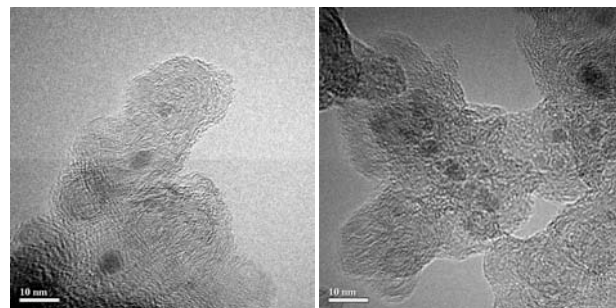


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические изображения ЛСУ, полученных ЭРО циклогексана

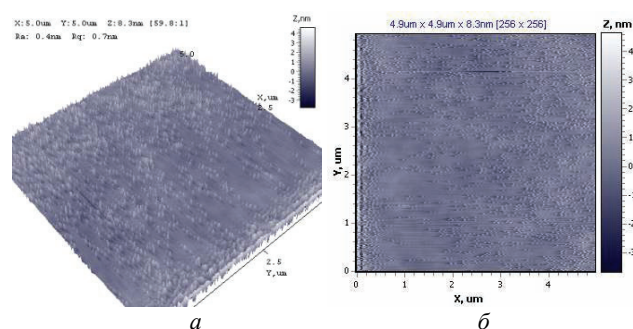


Рисунок 2 – 3D-изображение слоя углеродных частиц (а) и топография поверхности слоя на кварцевом стекле (б)

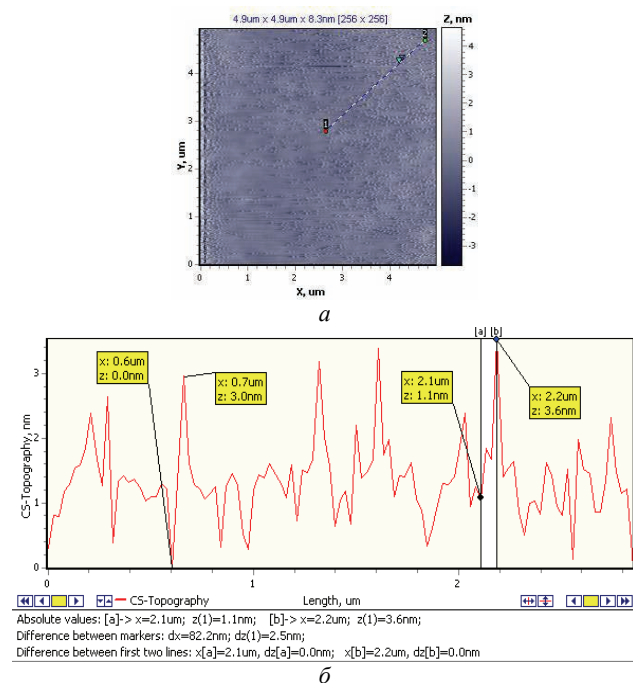


Рисунок 3 – Линия сечения (а) и профиль сечения (б)

Методом атомной силовой микроскопии (АСМ) определены диаметры сферических углеродных частиц, полученных в процессе разрядноимпульсной обработки циклогексана, которые составляют от 27,0 до 70,0 нм. Такие размеры углеродных наночастиц обусловлены их высокими сорбирующими

свойствами, которые приводят к увеличению размера вследствие налипания молекул обрабатываемой жидкости. Для определения истинных размеров частиц порошок УНМ был очищен с помощью многократной промывки растворителями (ацетоном или этилацетатом). Получено 3D-изображение слоя углеродных частиц после очистки и сушки порошка (рис. 2).

На основании следа сечения 1-2 (рис. 3, а) из профиля сечения (рис. 3, б) определены размеры частиц. Диаметр частиц составляет от 2,5 до 3,0 нм. В некоторых сечениях есть частицы до 1 нм.

Таким образом, истинный размер углеродных наночастиц, полученных ЭРО циклогексана, составляет от 1 до 3 нм.

ЭРО образующихся газов. Синтез УНМ в результате ЭРО газов, образующихся из гексана, происходит преимущественно на кварцевой поверхности в виде пленок (рис. 4). Внешняя поверхность пленки содержит кремний (от 10 до 20 %), а внутренняя – только углерод.

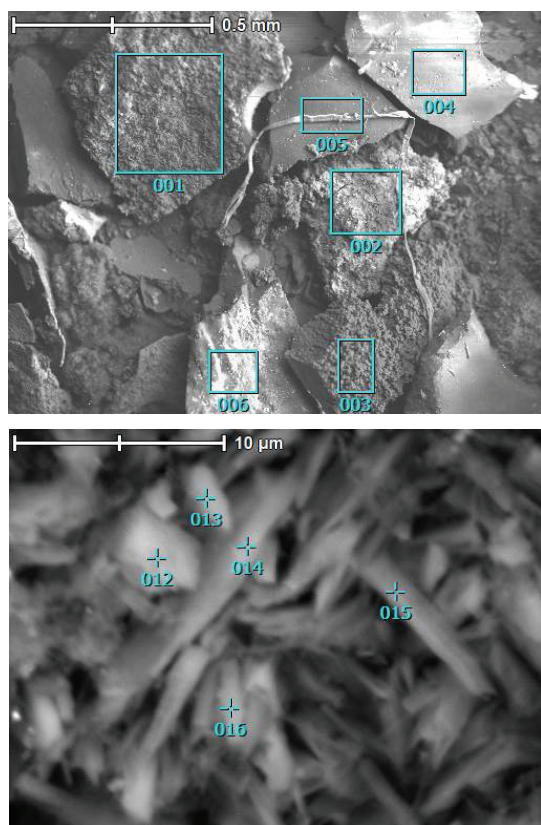


Рисунок 4 – Микрофотографии пленок, полученных на кварцевой подложке в результате ЭРО газов, образующихся из гексана

ЭРО газов, образующихся из циклоалкана, и осаждение синтезируемых УНМ происходит как на никель-хромовой – в виде УНТ, так и на кварцевой подложках – в виде пленок толщиной до 0,1 мм (рис. 5). Химический состав пленки: участок 017: С – 94,4 %; Si – 1,4 %; Cr – 1,9 %; Ni – 2,3%; участок 018: С – 94,3 %; Si – 1 %; Cr – 1,4 %; Fe – 1,5 %; Ni – 1,8 %.

Синтезированные на катализаторе УНТ (рис. 6)

полностью покрывают поверхность подложки. Размер получаемых трубок зависит от дисперсности катализатора.

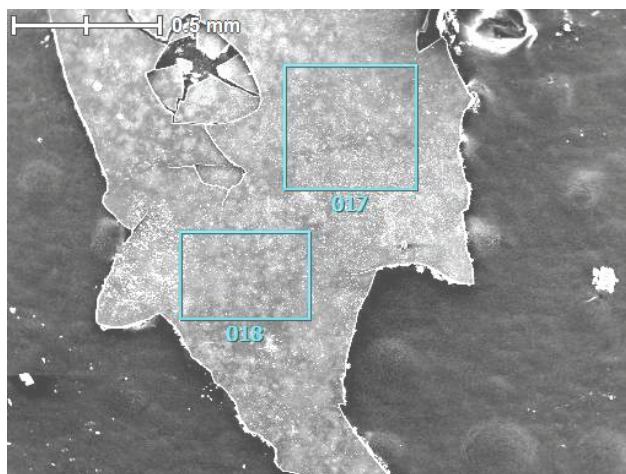


Рисунок 5 – Микрофотографии пленок, полученных на кварцевой подложке в результате ЭРО газов, образующихся из циклогексана

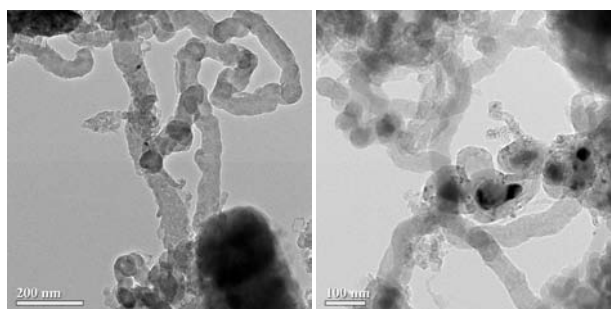


Рисунок 6 – Электронно-микроскопические фотографии УНТ, синтезированных на никелевых подложках из газов, образующихся при ЭРО циклогексана

ЭРО одноатомных спиртов приводит к синтезу алкенов (C_nH_{2n}), к которым относятся этилен и др. Так, дегидратация этанола приводит к синтезу этилена $CH_3-CH_2-OH \rightarrow CH_2=CH_2 + H_2O$.

Газоподобные алкены сначала выделяют в жидкости, а затем поступают для дальнейшей ЭРО в газовую разрядную камеру. Энергия связи С-Н в молекулах алкенов ($\epsilon_1 = 433$ кДж/моль) меньше, чем энергия двойной связи $C=C$ ($\epsilon_2 = 588$ кДж/моль), поэтому ЭРО газообразных алкенов приводит к синтезу УНМ, имеющих преимущественно sp^2 -гибридизацию атомов углерода в твердой фазе. Возбужденные молекулы и радикалы алкенов, в которых электроны находятся в sp^2 -состоянии, не взаимодействуют с диэлектрическими поверхностями, а вступают в реакцию только с металлическими катализаторами группы железа.

Электронная микроскопия высокого разрешения выявила сложную морфологию индивидуальных частиц синтезированных УНМ, которая зависит от типа источника углерода. ЭРО алкенов, образующихся в результате обработки одноатомных спиртов, приводит к образованию только УНТ (рис. 7).

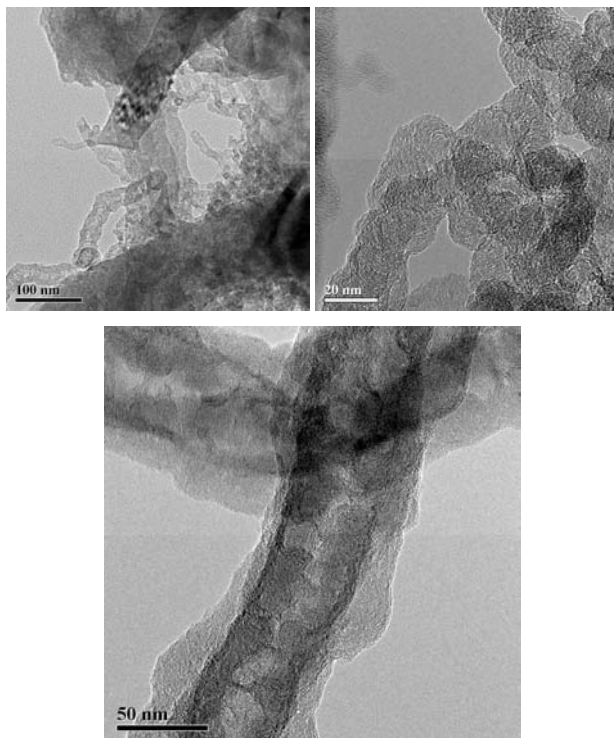


Рисунок 7 – Электронно-микроскопические фотографии УНТ, полученных из газов, образующихся при ЭРО этанола

Электрофизические свойства электроразрядных УНМ. Результаты измерения удельной электропроводности порошков УНМ, полученных при ЭРО жидких и газообразных углеводородов (табл. 1), показали большой разброс величин электропроводности, обусловленный различной степенью гибридизации электронов в атомах углерода обрабатываемых жидкостей и газов, а также материалом подложек. Самые высокие значения удельной электропроводности имеют УНТ.

Таблица 1 – Структурное состояние и удельная электропроводность синтезированных УНМ

№ образца	Источник углеорода	Структурное состояние синтезированных УНМ	Удельная электропроводность, См/м
1(383)	Циклогексан	Луковичные структуры углерода	10^{-4}
2(R009)	Гексан	Аморфный УНМ	10^{-2}
3(R018)	Керосин ТС-1	Аморфный УНМ	2
4(Ц1+Fe)	Циклогексан с добавлением ферроцена	Аморфный УНМ + Fe	80
5(R029)	Газ, образованный при ЭРО циклогексана	Пленочные УНМ	10^{-3}
6(R008)	Газ, образованный при ЭРО керосина ТС-1	УНТ + Ni	30
7(R005)	Газ, образованный при ЭРО этанола	УНТ + Ni	10^2

Исследование ослабления и отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) полученными образцами УНМ проведено в Институте ядерных проблем Белорусского государственного университета. Величину ослабления фиксировали как отношение средних за период мощностей волн, которые падают на УНМ и проходят сквозь него. Как видно из результатов исследования ослабления и отражения ЭМИ в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц, представленных на рис. 8 и 9, все УНМ, синтезированные электроразрядным методом, являются радиопоглощающими.

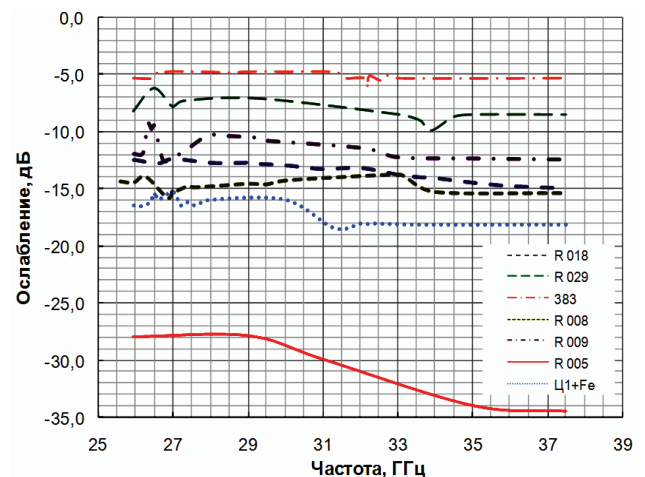


Рисунок 8 – Ослабление ЭМИ разными УНМ

Расположение кривых (сверху вниз), характеризующих рост величины ослабления ЭМИ образцами УНМ, соответствует увеличению удельной электропроводности образцов от 10^{-4} до 10^2 См/м.

Наибольшее ослабление ЭМИ в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц достигнуто при использовании образца, материал которого синтезирован из смеси углеводородных газов, образующихся в процессе ЭРО этанола, на никелевом катализаторе. Этот наноматериал имеет самую большую величину удельной электрической проводимости.

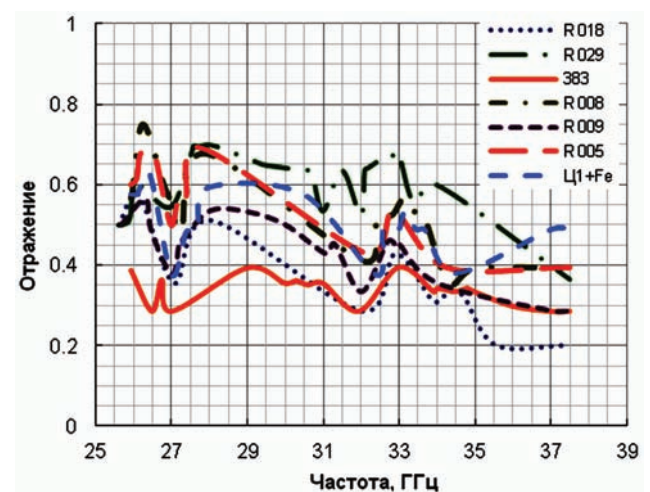


Рисунок 9 – Отражение ЭМИ разными УНМ

Наибольшие величины коэффициента отражения ЭМИ в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц имеют

образцы электроразрядных УНМ, содержащих ферромагнитные наночастицы (Ni, Fe, Cr).

Определена также частотная зависимость ослабления ЭМИ при разной толщине d образцов УНМ, синтезированных методом ЭРО циклогексана с добавлением ферроцена (рис. 10).

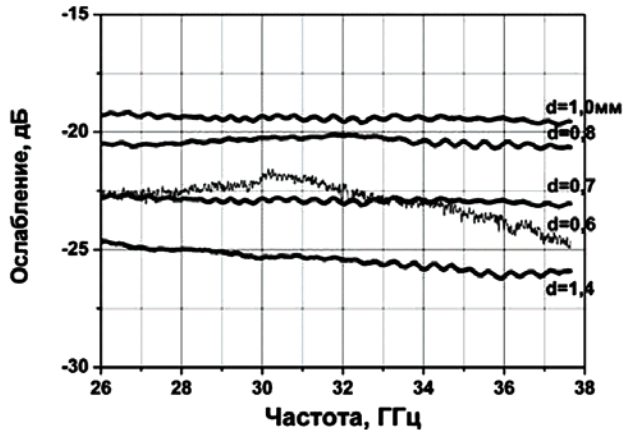


Рисунок 10 – Частотные зависимости величины ослабления ЭМИ УНМ, синтезированного ЭРО циклогексана с добавлением ферроцена, при разной толщине образцов d

Линейные зависимости и величины ослабления ЭМИ углеродными нанотрубками и наноматериалами с луковичной структурой, полученными электроразрядной обработкой углеводородов и содержащими ферромагнитные наночастицы, в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц показывают, что эти материалы являются эффективными поглотителями.

Выводы. Результаты исследования ослабления и отражения электромагнитного излучения разными УНМ (аморфный УНМ, УНТ, ЛСУ и пленки), синтезированными методом электроразрядной обработки жидких и газообразных углеводородов с разной степенью гибридизации электронов в атомах углерода, показали перспективность электроразрядного метода для получения радиопоглощающих композитных наноматериалов.

Показано, что УНТ и наноглерод луковичной структуры, характеризующиеся большими величинами удельной электропроводности и содержащие ферромагнитные наночастицы, являются эффективными поглотителями электромагнитного излучения. Наибольшее ослабление электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц достигнуто при использовании образца, материал которого состоит из углеродных нанотрубок и наночастиц ферромагнитного никеля и имеет большую величину удельной электрической проводимости – 100 См/м. Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать электроразрядные УНМ для их практического применения в качестве материалов или добавок к материалам, используемым в технологиях защиты электронных приборов от сбоев и выхода из строя.

Список литературы

1. *Vovchenko L.* Electromagnetic loss in carbon based materials / *L. Vovchenko, L. Matzui, I. Korotash, O. Rzheshavska* //

Functional materials. – 2006. – 13, № 3. – P. 484–488.

2. *Labunov V. A.* Resonance properties of magnetically functionalized multi-wall carbon nanotubes in millimeter waves / *V. A. Labunov, V. A. Karpovich, B. G. Shulickiy, I. V. Komissarov, V. N. Rodionova* // *Nanotechnology*. – 2010. – 3 (23). – P. 62–66.

3. *Kuskova N. I.* Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials / *N. I. Kuskova, K. V. Dubovenko, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, S. O. Chaban* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2013. – Vol. 49, no 3. – P. 35–42.

4. *Rud A. D.* Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques / *A. D. Rud, N. I. Kuskova, L. I. Ivaschuk, L. Z. Boguslavskii, A. E. Perekos* // *Nanomaterials*. – InTech. – 2011. – P. 211–230.

5. *Kuskova N. I.* Dependence of the Yield of Carbon Nanomaterials on the Molecular Structure of Organic Liquids in the Process of Electrodischarge Treatment / *N. I. Kuskova, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, and V. Yu. Bacelar* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2013. – Vol. 49, no. 1. – P. 14–19.

6. *Рудь А. Д.* Структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов высоковольтными электроразрядными методами / *А. Д. Рудь, Н. И. Кускова, Л. З. Богуславский, И. М. Кирьян, Г. М. Зелинская, Н. М. Белый* // *Известия ВУЗОВ. Серия: Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56, вып. 7. – С. 99–104.

7. *Кускова Н. И.* Пат. 80684, Україна. Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів з органічних рідин / *Н. І. Кускова, О. І. Христо, А. Ю. Терехов, А. П. Малюшевська, О. О. Зубенко* – 2013.

8. *Yushchishina A. N.* On possible processes of the formation of carbon nanomaterials with electrodischarge treatment of hydrocarbons / *A. N. Yushchishina, N. I. Kuskova, D. I. Chelpanov* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2015. – Vol. 51, iss. 3. – P. 203–207.

9. *Комаров Ф. Ф.* Ослабление электромагнитного излучения СВЧ-диапазона бумагой из углеродных нанотрубок / *Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, В. Н. Родионова, В. Б. Карпович, Р. М. Кривошеев* // *ЖТФ*. – 2011. – Т. 81, вып. 11. – С. 140–145.

10. *Рудь А. Д.* Структура и электродинамические свойства УНМ, синтезированных методом электроразрядной обработки углеводородов / *А. Д. Рудь, Н. И. Кускова, И. М. Кирьян, В. Н. Родионова, А. Н. Кириченко* // *Углеродные наночастицы в конденсированных средах: сборник научных статей*. – Минск, 2013. – С. 183–188.

References (transliterated)

1. *Vovchenko L., Matzui L., Korotash I., Rzheshavska O.* Electromagnetic loss in carbon based materials. *Functional materials*. 2006, 13, vol. 3, pp. 484–488.

2. *Labunov V. A., Karpovich V. A., Shulickiy B. G., Komissarov I. V., Rodionova V. N.* Resonance properties of magnetically functionalized multi-wall carbon nanotubes in millimeter waves. *Nanotechnology*. 2010, 3(23), pp. 62–66.

3. *Kuskova N. I., Dubovenko K. V., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Chaban S. O.* Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013, vol. 49, no 3, pp. 35–42.

4. *Rud A. D., Kuskova N. I., Ivaschuk L. I., Boguslavskii L. Z., Perekos A. E.* Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques. *Nanomaterials*, InTech. 2011, pp. 211–230.

5. *Kuskova N. I., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Bacelar V. Yu.* Dependence of the Yield of Carbon Nanomaterials on the Molecular Structure of Organic Liquids in the Process of

Electrodischarge Treatment. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013, vol. 49, no. 1, pp.14–19.

6. Rud' A. D., Kuskova N. I., Boguslavskiy L. Z., Kir'yan I. M., Zelinskaya G. M., Belyy N. M. Strukturno-energeticheskie aspekty sinteza uglevodnykh nanomaterialov vysokovol'tnymi elektrorazryadnymi metodami [Structural and power aspects of the synthesis of carbon nanomaterials by high-voltage electrical discharge methods]. Izvestiya VUZOV. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2013, vol. 56, iss. 7, pp. 99–104.

7. Kuskova N. I., Khrysto O. I., Terekhov A. Yu., Malyshevskaya A. P., Zubenko O. O. Sposib oderzhannya vuhletevnykh nanomaterialiv z orhanichnykh ridyn [The way of production of carbon nanomaterials from organic liquids] Patent UA, no. 80684, 2013.

8. Yushchishina A. N., Kuskova N. I., Chelpanov D. I. On possible processes of the formation of carbon nanomaterials with

electrodischarge treatment of hydrocarbons. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015, vol. 51, iss. 3, pp. 203–207.

9. Komarov F. F., Mil'chanin O. V., Rodionova V. N., Karpovich V. B., Krivosheev R. M. Oslablenie elektromagnitnogo izlucheniya SVCh-diapazona bumagoy iz uglevodnykh nanotrubok [Reduction of SHF-range electromagnetic emission using the paper made of carbon nanotubes]. ZhTF. 2011, vol. 81, iss. 11, pp. 140–145.

10. Rud' A. D., Kuskova N. I., Kir'yan I. M., Rodionova V. N., Kirichenko A. N. Struktura i elektrodinamicheskie svoystva UNM, sintezirovannykh metodom elektrorazryadnoy obrabotki uglevodorodov [Structure and electrodynamic properties of CNM synthesized by electrical discharge treatment of hydrocarbons]. Uglevodnye nanochastitsy v kondensirovannykh sredakh: sbornik nauchnykh statey. Minsk, 2013, pp. 183–188.

Поступила (received) 27.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Електрофізичні властивості вуглецевих наноматеріалів / Н.І. Кускова, О.Д. Рудь, С.В. Петриченко, Д.І. Челпанов, П.Л. Цолін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Электрофизические свойства углеродных наноматериалов / Н.И. Кускова, А.Д. Рудь, С.В. Петриченко, Д.И. Челпанов, П.Л. Цолин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Electrical and physical properties of carbon nanomaterials / N.I. Kuskova, A.D. Rud, S.V. Petrichenko, D.I. Chelpanov, P.L. Tsolin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кускова Наталія Іванівна – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Кускова Наталья Ивановна – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Рудь Олександр Дмитрович – доктор фізико-математичних наук, зав. лабораторією Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, тел.: (044) 424-23-10; e-mail: rud@imp.kiev.ua.

Рудь Александр Дмитриевич – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией Института металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины; тел.: (044) 424-23-10; e-mail: rud@imp.kiev.ua.

Rud Aleksandr Dmitrievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Laboratory Head of the G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (044) 424-23-10; e-mail: rud@imp.kiev.ua.

Петриченко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, заступник директора Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України, (067) 887-39-30; e-mail: petrishsergey@gmail.com.

Петриченко Сергей Викторович – кандидат технических наук, заместитель директора Института импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (067) 887-39-30; e-mail: petrishsergey@gmail.com.

Petrichenko Sergey Victorovich – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (067) 887-39-30; e-mail: petrishsergey@gmail.com.

Челпанов Дмитро Ілліч – аспірант, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Челпанов Дмитрий Ильич – аспирант, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Ilych – Postgraduate Student, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Цолін Павло Леонідович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Цолин Павел Леонидович – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Tsolin Pavel Leonidovich – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; email: tsolinpasha@gmail.com.