

*А. О. ПЛЮЩ, А. А. СОКОЛ, Ю. В. ФЕДОСЕЕВА (РОССИЯ), К. Н. ЛАПКО, П. П. КУЖИР,  
С. А. МАКСИМЕНКО, Л. Г. БУЛУШЕВА (РОССИЯ), А. В. ОКОТРУБ (РОССИЯ)*

## **ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК БОРОМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФОСФАТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Исследована возможность создания многофункциональных композитных электромагнитных материалов на основе безобжиговых термостойких механически прочных фосфатных керамик. Изучен потенциал использования недопированных и допированных бором многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ и В-МУНТ соответственно) в качестве функциональных добавок к фосфатной матрице. Установлено, что определяющим фактором, влияющим на электропроводность и высокочастотную проводимость композита, является длина МУНТ. Рост собственной проводимости борсодержащих МУНТ, по сравнению с их недопированными аналогами, не оказывает существенного влияния на возможное уменьшение сопротивления композита на их основе в статическом режиме и на его способность к электромагнитной экранировке. Причина слабого влияния заключается в малой длине В-МУНТ и, соответственно, в значительно большей, чем исследованные (до 1,5 мас. %), концентрации, необходимой для достижения порога перколяции. Напротив, использование длинных чистых МУНТ в небольших концентрациях оказывает колоссальное влияние на электромагнитные свойства фосфатного композита: при введении 1,5 мас. % МУНТ наблюдается рост электропроводности на 13 порядков и композит МУНТ/фосфат толщиной 1 мм оказывается непрозрачным для микроволнового излучения. Учитывая интерес к использованию бор-допированных МУНТ также в качестве нейтрон-поглощающих материалов, сделан вывод о необходимости усовершенствования методики синтеза В-МУНТ в целях увеличения длины последних.

**Ключевые слова:** композиционные материалы; углеродные нанотрубки; допирование; бор; электромагнитный отклик; экранирующие свойства.

The work presents a study of the possibility to develop the multifunctional composite materials based on the electromagnetically absorbing nonfired, mechanically strong and heat-resistant phosphate ceramics. The potentialities of using pure and boron doped multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs and B-MWCNTs, respectively) as functional additives to the phosphate matrix were investigated. It was found that a length of MWCNT is the determining factor for the electrical conductivity and high-frequency conductivity of the composite. Growth of the intrinsic conductivity of boron-containing MWCNTs, compared to their undoped counterparts, has no significant influence on the possible resistance decrease of the composite on their basis in the static mode and also on its ability to electromagnetic shielding. This is due to a small length of B-MWCNTs and hence much greater concentrations required to achieve the percolation threshold than those studied (up to 1,5 wt. %). On the contrary, the use of long pure MWCNTs in small concentrations has

a tremendous impact on the electromagnetic properties of the phosphate composite: on introduction of 1,5 wt. % of MWCNTs one can observe increase in the conductivity by 13 orders of magnitude, and the composite MWCNTs/phosphate 1 mm thick is opaque to microwave radiation. Taking into account the interest in using the boron-doped MWNT also as neutron-absorbing materials, it is essential to improve the synthesis methods of B-MWCNTs with the aim of increasing their length.

**Key words:** composite materials; carbon nanotubes; doping; boron; electromagnetic probing; shielding abilities.

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой особый класс углеродных наноматериалов со специфическими электрофизическими свойствами, обусловленными особенностями их строения (малый диаметр, высокое аспектное отношение, наличие внутренней полости). В настоящее время перспективы использования УНТ в электромагнитных приложениях вызывают большой интерес [1, 2]. Это связано с тем обстоятельством, что свои исключительные свойства (высокие электропроводность, механическая прочность, химическая стойкость) УНТ не теряют и в составе композитных материалов. Добавление малого количества УНТ (до 2 мас. %) в диэлектрическую матрицу (полимеры, неорганика) резко меняет ее электромагнитный отклик, приводя, в частности, к росту проводимости на несколько порядков [3]. Это означает, что композитные материалы на основе УНТ характеризуются низким порогом перколяции.

Вместе с тем имеется по крайней мере два обстоятельства, мотивирующие поиск дополнительных возможностей понижения перколяционного порога. Во-первых, УНТ по-прежнему остаются достаточно дорогим материалом, во-вторых, введение УНТ меняет не только электромагнитные характеристики композита, но и физико-химические характеристики матрицы.

Одним из наиболее эффективных способов увеличения проводимости УНТ является их допирование [4–10], так как увеличение доли точечных дефектов, образующихся вследствие замещения углеродных атомов решетки на примесные, их квазипериодичность приводят к снижению перколяционного порога. В частности, известно, что слабое фторирование УНТ приводит к заметному росту проводимости [11]. Модельный расчет электронной структуры таких УНТ из первых принципов является весьма трудоемкой и затратной по времени задачей [12]. Однако методы квантовой химии и молекулярной механики уже успешно применяются для оценки поляризуемости идеальных УНТ с одиночными и неупорядоченными дефектами [13].

Благодаря близости атомных размеров бора, азота и углерода, бор и азот являются идеальными элементами, способными замещать атомы углерода в стенках УНТ. Углеродные нанотрубки, допированные этими атомами, привлекают внимание конструкторов электронных наноустройств в связи с перспективами их использования в качестве наноструктурированных полупроводников *p*- и *n*-типа [14–17]. Количество *2p*-электронов у атомов азота на единицу больше, чем у углерода, поэтому в допированных азотом УНТ появляются избыточные электроны. Разработка способов допирования привела к созданию полевых транзисторов из графеновых нанолент [18]. В работе [19] разработана технология изготовления наноуглерода с *n*-типом проводимости путем токового отжига в аммиаке. Азот-допированные УНТ обладают улучшенными автоэмиссионными свойствами [20]. Встраивание в структуру нанотрубок атомов бора приводит к увеличению концентрации дырок на уровне Ферми.

Цель работы – экспериментальное исследование композиционных материалов на основе фосфатной керамической матрицы с добавлением недопированных и допированных атомами бора многостенных углеродных нанотрубок и сравнительный анализ электротранспортных свойств, а также эффективности экранировки электромагнитного излучения данными композиционными материалами.

В качестве матрицы используются безобжиговые термостойкие механически прочные фосфатные композиции [21], температура синтеза которых меняется от комнатной до 300 °С, в то время как диапазон рабочих температур достигает 1700 °С. Физические свойства матрицы позволяют создавать многофункциональные композитные электромагнитные материалы, имеющие большой потенциал, в том числе и для решения ряда прикладных задач в области ядерных и радиационных технологий, а также для космических приложений. Некоторые из ранее разработанных фосфатных составов были успешно использованы в узлах ракетно-космической системы «Энергия-Буран» [22, 23].

#### **Синтез исходных и бор-допированных МУНТ**

Массивы ориентированных МУНТ были синтезированы методом химического осаждения из газовой фазы 2 % раствора ферроцена в толуоле при температуре 800 °С на кремниевые подложки. Схема экспериментальной установки и подробности синтеза описаны в работе [24]. В результате синтеза были получены массивы ориентированных перпендикулярно подложке МУНТ одинаковой длины. Бор-допированные УНТ были получены в установке электродугового испарения графита, конструкция которой детально описана в [25]. В результате испарения графитового катода, в который было добавлено около 10 мас. % аморфного бора, в атмосфере гелия при пониженном давлении образовался плотный нарост, содержащий В-МУНТ.

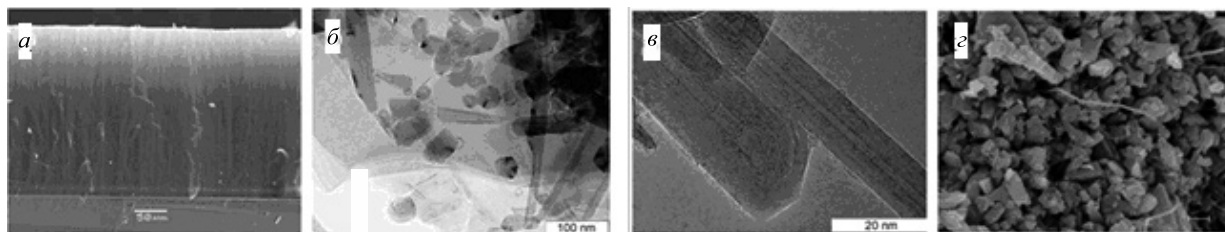


Рис. 1. СЭМ-изображение массива МУНТ на кремнии (а); ПЭМ-изображение В-МУНТ с разным разрешением (б, в); СЭМ-изображение фосфатного композита с 1 мас. % включений МУНТ (г)

Анализ обзорных рентгеновских фотоэлектронных спектров синтезированных углеродных материалов показал доминирование в образцах углерода и наличие не более  $10 \pm 0,1$  ат. % бора и кислорода. Источником кислорода в образцах являются кислородсодержащие молекулы воздуха, сорбированные на поверхности камеры и графитового электрода, наряду с кислородсодержащими примесями в буферном газе и окисленными состояниями бора, которые присутствуют в реагенте аморфного бора. Длина массивов МУНТ и В-МУНТ оценивалась методами растровой электронной (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) соответственно. Установлено, что длина чистых МУНТ составляет около 120 мк (рис. 1, а), в то время как В-МУНТ – очень короткие, их средняя длина не превышает 1 мк (рис. 1, б, в). В составе образца В-МУНТ, как видно из рис. 1, б, присутствуют и трубы, и луковично подобные структуры округлой формы (многослойные фуллерены), причем количество последних существенно.

### Изготовление фосфатных композитов

Для изготовления керамических композитных материалов в качестве матрицы использовалась термостойкая фосфатная керамика, состоящая из алюмофосфатной связки и наполнителя. Алюмофосфатная связка была изготовлена путем растворения гидроксида алюминия в растворе фосфорной кислоты с массовой долей фракций 60 %. Мольное отношение  $H_3PO_4/Al(OH)_3$  равно 3. Растворение проводилось при непрерывном перемешивании и небольшом нагреве ( $80-90$  °С) до получения прозрачного однородного раствора. После охлаждения до комнатной температуры ( $15-25$  °С) раствор был разбавлен дистиллированной водой до плотности  $1,35-1,45$  г/см<sup>3</sup>. Наполнитель керамики представляет собой однородную смесь порошков оксида и нитрида алюминия с массовым соотношением 9 : 1.

Массивы ориентированных МУНТ, снятые с подложки, перемалывались в механической мельнице. В результате длина МУНТ уменьшилась примерно до 20 мкм. Алюмофосфатную связку, смесь основного наполнителя и нанотрубок перетирали в агатовой ступке (30–40 мин) до получения однородной массы, которую затем прессовали в таблетки толщиной 1 мм и диаметром 10 мм под давлением 4,9 МПа. Анализ изображений с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) показывает, что полученный композитный материал характеризуется однородным распределением индивидуальных нанотрубок в фосфатной матрице, укороченных до 3–5 мкм в результате процесса размола для недопированных МУНТ (рис. 1, г). Изготовлена серия композитных материалов с массовой концентрацией 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 мас. % МУНТ и В-МУНТ.

### Электрофизические свойства МУНТ, В-МУНТ и композитов на их основе

Измерение электропроводности исходных и допированных бором МУНТ проводилось четырехконтактным методом на постоянном токе. Порошок МУНТ уплотнялся в измерительной ячейке до тех пор, пока значение проводимости не переставало меняться. Для измерения электропроводности В-МУНТ из катодного нароста вырезался образец размером  $0,5 \times 1,0 \times 8,0$  мм. Контакты к образцу подводились золотой проволокой и закреплялись на нем серебряной пастой.

Значение электропроводности В-МУНТ составляет  $313 \pm 5$  См/см, в то время как электропроводность МУНТ –  $163 \pm 5$  См/см. Допирование МУНТ бором приводит к практически двукратному увеличению проводимости относительно образца с недопированными МУНТ. Таким образом, внедрение атомов бора вызывает увеличение концентрации носителей заряда, обуславливая преимущественно дырочный характер проводимости В-МУНТ.

Измерения проводимости композиционных материалов на переменном токе проводились с помощью емкостного моста E4980A Precision LCR Meter в частотном диапазоне 1kHz–2MHz по схеме Z–theta (импеданс и угол потерь) при комнатной температуре. Образцы вырезались в виде прямоугольников со сторонами 7,2 и 3,4 мм и на поверхность образца наносилась серебряная паста. Установлено, что в случае композитов имеет место обратная тенденция: если введение МУНТ приводит к колоссальному росту проводимости композита (на 13 порядков при концентрации МУНТ 1,5 мас. %), то включение В-МУНТ в небольших количествах не влияет на проводимость композита (таблица).

## Электропроводность композитного материала фосфат/МУНТ и фосфат/В-МУНТ на частоте 1 кГц

Концентрация	$\rho_{\text{МУНТ}}, \text{См/м}$	$\rho_{\text{В-МУНТ}}, \text{См/м}$
0	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-12}$
0,25	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$\sim 10^{-12}$
0,5	$2,63 \cdot 10^{-9}$	$\sim 10^{-12}$
1,0	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$\sim 10^{-12}$
1,5	10,47	$\sim 10^{-12}$

Причина слабого влияния добавки В-МУНТ на проводимость фосфатной матрицы заключается в малой длине В-МУНТ (менее 1 мкм) и существенной доле квазисферических частиц (около 40 %) (см. рис. 1), в то время как длина МУНТ в готовом фосфатном композите не менее 3 мк. Таким образом, для достижения электрической перколяции необходима значительно меньшая объемная концентрация длинных МУНТ, чем коротких, квазисферических В-МУНТ. Оценка концентрации используемого материала, содержащего В-МУНТ, необходимой для достижения порога перколяции, составляет 12–15 мас. %. В то же время для длинных исходных МУНТ порог перколяции достигается уже при 1 мас. % включений, что сопровождается скачком проводимости (таблица). Таким образом, было установлено, что, несмотря на существенно большую проводимость, демонстрируемую В-МУНТ по сравнению с чистыми МУНТ, эффект их длины при изготовлении композитного материала играет доминирующую роль.

## Электромагнитные свойства в СВЧ-диапазоне

Измерение электромагнитных свойств исследуемых образцов в диапазоне частот 26,0–37,5 ГГц проводилось с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячих волн и ослабления P2-408 P, который предназначен для измерения модуля коэффициентов отражения и передачи ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$  соответственно, рис. 2, а). Коэффициенты прохождения ( $T$ ), отражения ( $R$ ) и поглощения ( $A$ ) определяются из измеренных  $S$ -параметров:  $R = S_{11}^2$ ,  $T = S_{21}^2$ ,  $A = 1 - T - R$  (рис. 2, б).

Композит фосфат/МУНТ (толщина 1 мм) с концентрацией включений 1,5 мас. % обеспечивает, как видно из рис. 2, а, значительное ослабление электромагнитного (ЭМ) сигнала (на уровне 16–20 дБ), в то время как введение такой же концентрации В-МУНТ не оказывает существенного влияния на способность композита к электромагнитной экранировке (ее эффективность для фосфатного композита с 1,5 мас. % В-МУНТ определяется главным образом эффективностью экранировки фосфатной матрицы (см. рис. 2, б).

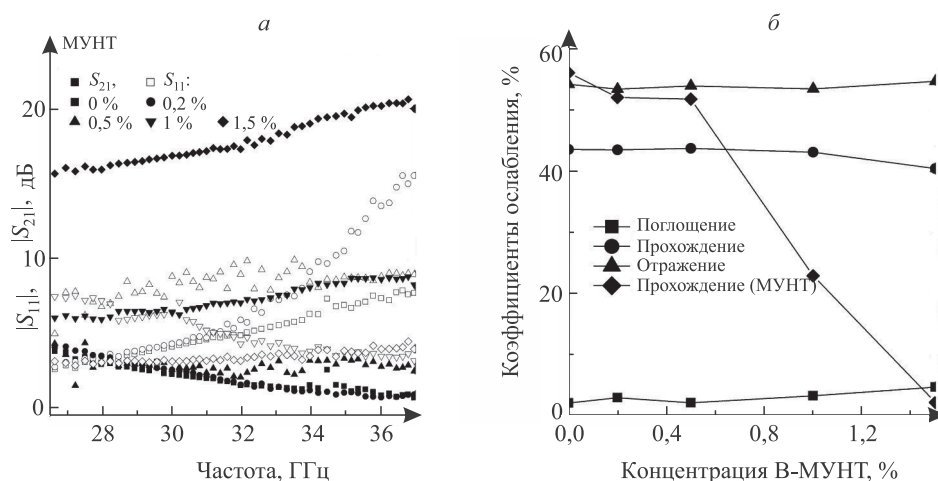


Рис. 2. Зависимость параметров  $S_{21}$  и  $S_{11}$  от частоты для исследуемых образцов с различной концентрацией МУНТ (а); поглощение ( $A$ ), прохождение ( $T$ ) и отражение ( $R$ ) на частоте 30 ГГц, обеспечиваемые фосфатным композитом с различной концентрацией В-МУНТ (б)

С использованием методики расчета диэлектрической проницаемости элементов матрицы рассеяния, измеренных волноводным методом [26, 27], восстановлена эффективная диэлектрическая проницаемость исследуемых композитов (рис. 3).

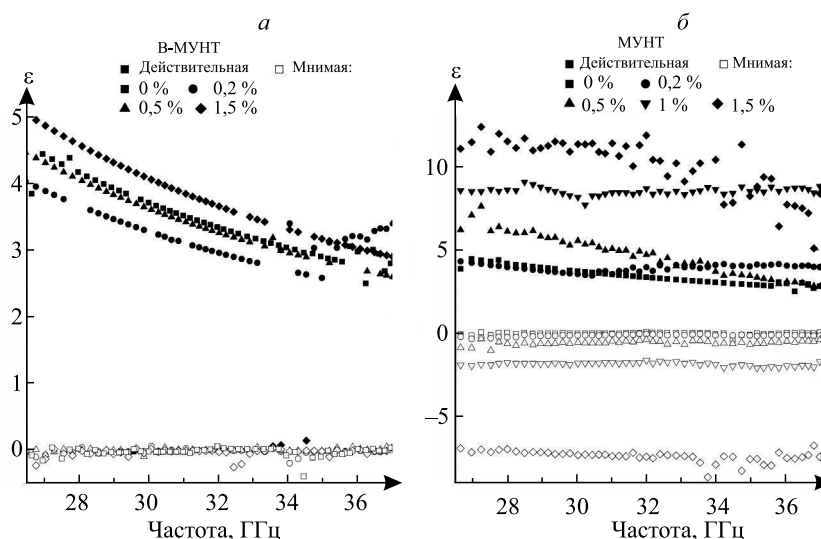


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$  от частоты для исследуемых образцов с различной концентрацией В-МУНТ (а) и МУНТ (б)

В отличие от статического случая в СВЧ-диапазоне, где между В-МУНТ работает электромагнитная связь [28], рост концентрации включений В-МУНТ приводит к некоторому росту диэлектрической проницаемости (рис. 3, а). Однако в сравнении со случаем исходных МУНТ (рис. 3, б) эти изменения не столь значительны и не приводят к существенному росту способности В-МУНТ-содержащих фосфатных керамик к электромагнитной экранировке. Как и в случае проводимости на постоянном токе, причиной такого ЭМ-поведения В-МУНТ является их малая, по сравнению с исходными МУНТ, длина. Соотношение длины к диаметру МУНТ – ключевой фактор. Если внедрение атомов фтора в МУНТ приводит к росту их поляризуемости на десятки процентов по сравнению с высокочастотной поляризуемостью УНТ одной длины [8], то при увеличении длины УНТ от 100 нм до 3–5 мк привело к скачку поляризуемости на 3 порядка [28, 29]. Подобные выводы сделаны нами в результате сопоставления ЭМ-характеристик коротких азот-допированных и длинных исходных МУНТ [29].

Экспериментально установлено, что электропроводность, измеренная при постоянном токе, В-МУНТ примерно в два раза больше электропроводности исходных МУНТ. Однако из-за малой длины В-МУНТ их использование в качестве функционального наполнителя для термостойких алюмофосфатных керамик является неэффективным как для роста проводимости последней, так и для использования в СВЧ-полях в качестве экранирующего материала. Если введение 1,5 мас. % чистых МУНТ длиной 3–5 мк приводит к скачку проводимости на 13 порядков и делает 1 мм фосфатной керамики непрозрачным для микроволнового излучения, то добавка В-МУНТ в той же массовой доле не оказывает влияния ни на проводимость, ни на ослабляющие ЭМ-излучение свойства.

Мы предполагаем, что для создания композитных материалов с улучшенными электромагнитными характеристиками, по сравнению с исходными МУНТ, необходима разработка методики синтеза длинных МУНТ, допированных бором. Кроме того, значительный интерес вызывает возможность использования борсодержащих УНТ для создания защиты от ионизирующих излучений. Стабильный изотоп  $^{10}\text{B}$  является высокоэффективным нейтронным поглотителем. Его сечение захвата нейтронов достигает 4000 б, что в совокупности с другими ядерно-физическими параметрами определяет уникальность этого химического элемента в приложениях. Кроме того, допирование УНТ бором приводит к повышению их температурной стабильности и инертности к окислительным средам. Ранее возможности использования материалов на основе борсодержащих УНТ для защиты от ионизирующих излучений не исследовались. Улучшение функциональных свойств электромагнитного экрана на основе термостойкой фосфатной безобжиговой керамики для радиационной защиты заметно повысит его ценность [30].

Работа проводилась при поддержке проектов БРФФИ Ф013Д-002, Ф013Ф-004. Авторы выражают благодарность А. Г. Куреня и Л. И. Насоновой (ИНХ СО РАН) за изготовление образцов МУНТ и В-МУНТ, а также В. К. Ксеновичу (физический факультет БГУ) за помощь в проведении измерений проводимости композитов в низкочастотном диапазоне.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hanson G. Fundamental transmitting properties of carbon nanotube antennas // IEEE Trans. Antennas Propag. 2005. Vol. 53. P. 3426.
2. Burke P. J., Shengdong Li., Zhen Yu. Quantitative theory of nanowire and nanotube antenna performance // IEEE Trans. Nanotechnol. 2006. Vol. 5. P. 314.

3. Qin F., Brosseau C. A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111. P. 061301.
4. Czerw R., Terrones M., Charlier J.-C., Blase X., Foley B., Kamalakaran R., Grobert N., Terrones H., Tekleab D., Ajayan P. M., Blau W., Rühle M., Carroll D. L. Identification of Electron Donor States in N-Doped Carbon Nanotubes // *Nano Lett.* 2001. Vol. 1 (9). P. 457.
5. Ewels C. P., Glerup M. Nitrogen Doping in Carbon Nanotubes // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2005. Vol. 5. P. 1345.
6. Villalpando-Paez F., Zamudio A., Elias A.L., Son H., Barros E.B., Chou S.G., Kim Y. A., Muramatsu H., Hayashi T., Kong J., Terrones H., Dresselhaus G., Endo M., Terrones M., Dresselhaus M. S. Synthesis and characterization of long strands of nitrogen-doped single-walled carbon nanotubes // *Chem. Phys. Lett.* 2006. Vol. 424 (4/6). P. 345.
7. Ismagilov Z. R., Shalagina A. E., Podyacheva O. Yu., Ischenko A. V., Kibis L. S., Boronin A. I., Chesalov Yu. A., Kochubey D. I., Romanenko A. I., Anikeeva O. B., Buryakov T. I., Tkachev E. N. Structure and electrical conductivity of nitrogen-doped carbon nanofibers // *Carbon.* 2009. Vol. 47. P. 1922.
8. Nemilentsau A. M., Shuba M. V., Slepyan G. Ya., Kuzhir P. P., Maksimenko S. A., D'yachkov P. N., Lakhtakia A. Substitutional doping of carbon nanotubes to control their electromagnetic characteristics // *Phys. Rev. B.* 2010. Vol. 82. P. 235424.
9. Xu E., Wei J., Wang K., Li Z., Gui X., Jia Yi., Zhu H., Wu D. Doped carbon nanotube array with a gradient of nitrogen concentration // *Carbon.* 2010. Vol. 48 (11). P. 3097.
10. Latil S., Roche S., Mayou D., Charlier J. C. Mesoscopic transport in chemically doped carbon nanotubes // *Phys. Rev. Letters.* 2004. Vol. 25. P. 92.
11. Dettlaff-Weglikowska U., Skakalova V., Meyer J., Cech J., Mueller B. G., Rothet S. Effect of fluorination on electrical properties of single walled carbon nanotubes and C<sub>60</sub> peapods in networks // *Cur. Appl. Phys.* 2007. Vol. 7. P. 42.
12. Choi W. I., Park S., Kim T.-E., Park N., Lee K.-R., Lee Y. H., Ihm J., Han S. Band-gap sensitive adsorption of fluorine molecules on sidewalls of carbon nanotubes: an ab initio study // *Nanotechnology.* 2006. Vol. 17. P. 5862.
13. Guo G. Y., Chu K. C., Wang D., Duan Ch. Linear and nonlinear optical properties of carbon nanotubes from first-principles calculations // *Phys. Rev. B.* 2004. Vol. 69. P. 205416.
14. Wilder W. G., Venema L. C., Rinzler A.G., Smalley R. E., Dekker C. Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes // *Nature.* 1998. Vol. 391. P. 59.
15. Chan L. H., Hong K. H., Xiao D. Q., Lin T. C., Lai S. H., Hsieh W. J., Shih H. C. Resolution of the binding configuration in nitrogen-doped carbon nanotubes // *Phys. Rev. B.* 2004. Vol. 70. P. 125408.
16. Pan H., Feng Y. P., Lin J. Ab initio study of single-wall BC<sub>2</sub>N nanotubes // *Phys. Rev. B.* 2006. Vol. 74. P. 045409.
17. Schultz D., Droppa R. Jr., Alvarez F., dos Santos M. C. Stability of Small Carbon-Nitride Heterofullerenes // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 90. P. 015501.
18. Li X., Wang X., Zhang Li, Lee S., Dai H. Chemically Derived, Ultrasoft Graphene Nanoribbon Semiconductors // *Science.* 2008. Vol. 319. P. 1229.
19. Wang X., Li X., Zhang Li, Yoon Y., Weber P. K., Wang H., Guo J., Dai H. N-Doping of Graphene Through Electrothermal Reactions with Ammonia // *Science.* 2009. Vol. 324. P. 768.
20. Doytcheva M., Kaisera M., Verheijen M. A., Reyes-Reyes M., Terrones M., de Jonge N. Electron emission from individual nitrogen-doped multi-walled carbon nanotubes // *Chem. Phys. Lett.* 2004. Vol. 396. P. 126.
21. Судакас Л. Г. Фосфатные вяжущие системы. СПб., 2008.
22. Корпусь В. А., Крылова З. Ф., Дорожкина Л. И., Тикавый В. Ф., Захаров И. А., Шевергина Г. А. Огнеупорная масса : пат. Рос. Федерации. № 2035432 ; опубл. 20.05.95.
23. Крылова З. Ф., Дорожкина Л. И., Захаров И. А., Базарова А. Е., Корпусь В. А., Тикавый В. Ф. Состав высокотемпературной клеевой композиции : пат. Рос. Федерации. № 2066335 ; опубл. 10.09.96.
24. Okotrub A. V., Bulusheva L. G., Kudashov A. G., Belavin V. V., Komogortsev S. V. Arrays of carbon nanotubes aligned perpendicular to the substrate surface: Anisotropy of structure and properties // *Nanotechnol. Russ.* 2008. Vol. 3. P. 191–200.
25. Окоотруб А. В., Шевцов Ю. В., Насонова Л. И., Синяков Д. Е., Чувиллин А. Л., Гутаковский А. К., Мазалов Л. Н. Дугоразрядный синтез однослойных углеродных // *Неорган. материалы.* 1996. Т. 32, № 8. С. 974.
26. Chung B.-K. Dielectric constant measurement for thin material at microwave frequencies // *Progress in Electromagnetic Research.* 2007. Vol. 75. P. 239.
27. Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K. *Microwave Electronics: Measurement and material at microwave frequencies.* London, 2004.
28. Shuba M. V., Slepyan G. Ya., Maksimenko S. A., Thomsen C., Lakhtakia A. Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes // *Phys. Rev. B.* 2009. Vol. 79 (15). P. 155403.
29. Kanygin M. A., Sedelnikova O. V., Asanova I. P., Bulusheva L. G., Okotrub A. V., Kuzhir P. P., Plyushch A. O., Maksimenko S. A., Lapko K. N., Sokol A. A., Ivashkevich O. A., Lambin Ph. Effect of nitrogen doping on the electromagnetic properties of carbon nanotube-based composites // *J. of Appl. Physics.* 2013. Vol. 113. P. 144315.
30. Craft A. E., King J. C. Adiation shielding options for a nuclear reactor power system landed on the lunar surface // *Nuclear technology.* 2010. Vol. 172. P. 255.

Поступила в редакцию 11.08.2014.

**Артём Олегович Плющ** – аспирант кафедры физики твердого тела.

**Алексей Анатольевич Сокол** – младший научный сотрудник НИЛ неорганической и общей химии.

**Юлия Владимировна Федосеева** – младший научный сотрудник лаборатории физикохимии наноматериалов Института неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН.

**Константин Николаевич Лапко** – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ неорганической и общей химии химического факультета.

**Полина Павловна Кужир** – кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией электродинамики неоднородных сред НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ.

**Сергей Афанасьевич Максименко** – доктор физико-математических наук, доцент, директор НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ.

**Любовь Геннадьевна Булушева** – доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физикохимии наноматериалов Института неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН.

**Александр Владимирович Окотруб** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физикохимии наноматериалов Института неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН.