

## Влияние функционализации углеродных нанотрубок в плазме на процесс формирования электродного композитного материала УНТ – оксид никеля

*А.В. Алексеев<sup>1</sup>, Е.А. Лебедев<sup>1</sup>, И.М. Гаврилин<sup>1</sup>, Е.П. Кицюк<sup>2</sup>,  
Р.М. Рязанов<sup>1,2</sup>, А.А. Дудин<sup>3</sup>, А.А. Полохин<sup>1</sup>, Д.Г. Громов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники  
Российской академии наук, г. Москва, Россия

*salvionn@gmail.com*

Уникальные свойства углеродных нанотрубок (УНТ) делают их перспективными для создания композитных электродных материалов на основе комбинации УНТ с оксидами переходных металлов.

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния исследовано влияние параметров функционализации вертикально ориентированных массивов УНТ в ВЧ-плазме смеси аргона и кислорода на их структурные характеристики. При большем парциальном расходе аргона и низком общем расходе газов рабочей смеси определено влияние времени обработки на распределение по массиву УНТ оксида никеля, осаждаемого методом SILAR. Результаты растровой электронной спектроскопии показали, что увеличение времени функционализации с 30 до 1200 с позволяет увеличить глубину покрытия поверхности УНТ слоем оксида никеля с 300 нм до 2,5 мкм.

Полученные композитные структуры могут быть использованы в качестве электрода суперконденсатора.

*Ключевые слова:* функционализация углеродных нанотрубок; плазма; УНТ; оксид никеля; метод SILAR; композит; суперконденсатор.

*Для цитирования:* Влияние функционализации углеродных нанотрубок в плазме на процесс формирования электродного композитного материала УНТ – оксид никеля / А.В. Алексеев, Е.А. Лебедев, И.М. Гаврилин и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №2. – С. 128–137. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-128-137

## Carbon Nanotubes Plasma Functionalization Effect on Formation Process of CNT – Nickel Oxide Composite Electrode Material

A.V. Alekseyev<sup>1</sup>, E.A. Lebedev<sup>1</sup>, I.M. Gavrilin<sup>1</sup>, E.P. Kitsuk<sup>2</sup>,  
R.M. Ryazanov<sup>1,2</sup>, A.A. Dudin<sup>3</sup>, A.A. Polokhin<sup>1</sup>, D.G. Gromov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup>SMC «Technological Centre», Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Nanotechnologies of Microelectronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

salvionn@gmail.com

Unique properties of carbon nanotubes (CNTs) make them promising for creating composite electrode materials, based on the combination of CNTs with transition metals oxides.

The influence of the RF plasma functionalization on vertically aligned carbon nanotubes arrays structural characteristics has been studied using the combinational scattering spectroscopy. At a higher partial argon consumption and low total gases expenditure the processing time pull with nickel oxide distribution, deposited by the SILAR method, upon the nanotubes has been determined. By means of the scanning electron microscopy it has been shown that an increase of the functionalization time from 30 to 1200 seconds permits to increase the depth of CNT surface coverage by the nickel oxide layer from 300 nm to 2.5  $\mu\text{m}$ .

The resultant composite structures can be used as a supercapacitor electrode.

**Keywords:** functionalization carbon nanotubes; plasma; carbon nanotubes; nickel oxide; SILAR; composite; supercapacitor.

**For citation:** Carbon Nanotubes Plasma Functionalization Effect on Formation Process of CNT-Nickel Oxide Composite Electrode Material / A.V. Alekseyev, E.A. Lebedev, I.M. Gavrilin et.al // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №2. – P. 128–137. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-2-128-137

**Введение.** В последнее время создаются и исследуются композитные материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) для применения в электрохимических накопителях энергии [1, 2]. Уникальные механические свойства, высокая электропроводность и электрохимическая устойчивость отдельных УНТ, а также возможность формирования массивов УНТ непосредственно на токовых коллекторах обеспечивают стабильность и высокие мощностные характеристики источников тока на их основе [3]. Наиболее перспективно – создание композитных электродных материалов на основе комбинации УНТ с оксидами переходных металлов ( $\text{MeO}_x$ ). Последние значительно повышают удельные емкостные характеристики композитного материала за счет фарадеевских процессов [4]. Использование оксидов переходных металлов, например  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Ir}_2\text{O}_3$ , в чистом виде в качестве электродного материала неэффективно из-за низкой электропроводности и значительных механических напряжений,

возникающих в процессе циклической зарядки и приводящих к быстрой деградации. Перечисленные недостатки отсутствуют у оксида рутения  $\text{RuO}_2$ , однако его высокая стоимость, токсичность и эффективность исключительно в водных электролитах, ограничивающих диапазон рабочих напряжений, значительно снижают возможности его использования в коммерческих приложениях [5].

Сочетание УНТ и оксидов переходных металлов в композитном материале компенсирует недостатки его составляющих. УНТ являются матрицей, которая обеспечивает высокую электропроводность, увеличивает значение удельной площади поверхности, снижает механические напряжения, образует мезопористую структуру и позволяет ионам электролита свободно перемещаться. Оксиды переходных металлов выполняют функцию наполнителя. Степень заполненности матрицы, или соотношение УНТ/ $\text{MeO}_x$ , будет определять баланс емкостных (мощностных) характеристик создаваемого устройства.

В настоящей работе рассматривается формирование электрода на основе композита УНТ –  $\text{MeO}_x$  в условиях контролируемого равномерного осаждения оксида металла на поверхность УНТ методом молекулярного наплаивания (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction, SILAR). Метод SILAR позволяет послойно формировать покрытия из оксидов и халькогенидов, при этом практически отсутствуют ограничения на материал, размер и профиль поверхности осаждения и не требуется сложного и дорогостоящего оборудования. Однако гидрофобная природа массивов УНТ является серьезным препятствием для реализации метода SILAR, в котором используются жидкие прекурсоры. Поэтому в технологический маршрут синтеза композитного электрода УНТ –  $\text{MeO}_x$  включен этап функционализации массивов УНТ, что обеспечивает смачиваемость массивов и улучшает их взаимодействие с осаждаемым материалом [6]. Плазменная функционализация вертикальных массивов УНТ имеет определенные преимущества перед ковалентной химической модификацией с помощью сильных жидких окислителей [7].

**Методика эксперимента.** Процесс формирования композитного электрода УНТ –  $\text{MeO}_x$  можно разделить на четыре этапа (рис.1).

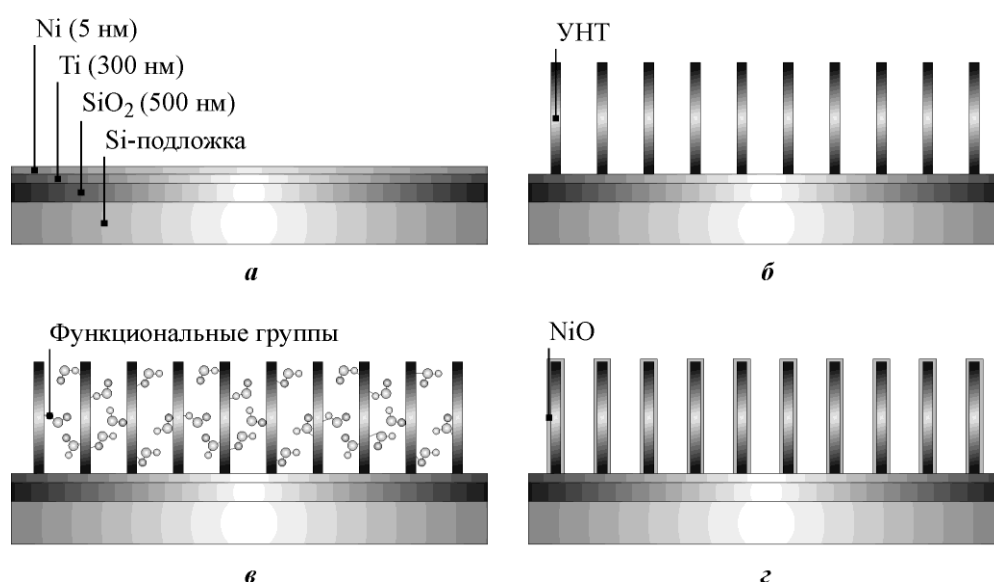


Рис.1. Основные этапы процесса создания композитного электродного материала: а – подготовка подложки и осаждение технологических слоев; б – синтез массивов УНТ; в – функционализация УНТ в плазме; г – осаждение оксида никеля на поверхность УНТ методом SILAR

На первом этапе проводились предварительная отмывка кремниевой подложки и ее окисление (толщина оксида  $\sim 500$  нм). Затем методом магнетронного распыления последовательно наносились слой Ti ( $\sim 300$  нм) в качестве токового коллектора и каталитический слой Ni ( $\sim 5$  нм), необходимый для синтеза УНТ (рис.1,а).

На втором этапе осуществлялся синтез ориентированных массивов многослойных УНТ методом плазмостимулированного химического парофазного осаждения (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) из атмосферы смеси этилена и ацетилена на установке Oxford PlasmaLab System 100 Nanofab 800 Agile (рис.1,б).

Третий этап – функционализация УНТ в плазме (рис.1,в). Образцы обрабатывались на установке реактивного ионного травления МВУ ТМ РИТ с высокочастотным источником разряда (13,56 МГц). При этом варьировались состав плазмы (изменялись рабочие газы (Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) и их соотношения), расход газов (от 0 до 3,6 л/ч), мощность разряда (от 0 до 200 Вт) и время воздействия (от нескольких секунд до нескольких минут).

Изменения количества дефектов и функциональных групп на поверхности УНТ определялись методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (СКР) на установке Horiba LabRam HR Evolution ( $\lambda = 514$  нм). На полученных диаграммах смещения рассматривались три пика интенсивности:  $I \sim 520$  см<sup>-1</sup> (соответствует кремнию, высота пика косвенно характеризует концентрацию углеродного материала на подложке);  $I_D \sim 1370$  см<sup>-1</sup> (так называемая D-линия, отвечающая  $sp^3$ -форме связи и рассеянными дефектами структуры УНТ);  $I_G \sim 1600$  см<sup>-1</sup> (так называемая G-линия, характеризующая наличие  $sp^2$ -связи между атомами углерода).

На четвертом этапе осаждался оксид никеля NiO методом SILAR (рис.1,г).

Метод SILAR основан на необратимых реакциях, протекающих в ходе попеременного наращивания слоев компонентов требуемого соединения на поверхности твердого тела в несколько стадий: 1) адсорбция изначального активного слоя; 2) удаление излишних и физически сорбированных частиц; 3) реакция активного слоя с противоионами из раствора их соединения; 4) удаление частиц, сорбированных физически, избыточных противоионов и побочных соединений.

Создание качественного первого слоя – важная задача. В идеальном случае одному циклу соответствует наращивание на исходной поверхности одного монослоя необходимого химического соединения. Удаление избытков частиц осуществляется в замкнутом объеме деионизованной воды. pH раствора, содержащего катионы металла, должен быть больше 7, иначе могут образоваться труднорастворимые гидроксиды металлов в объеме раствора, сорбирующиеся на выращиваемую пленку.

Для осаждения оксида никеля на вертикально ориентированные массивы УНТ использовались емкости с источником ионов Ni<sup>2+</sup>, деионизованной водой (две емкости) и источником кислорода. В качестве источника ионов Ni<sup>2+</sup> использовался 0,01 М раствор гексагидрата нитрата никеля (II) Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, доведенный до pH = 12 добавлением гидроксида аммония NH<sub>4</sub>OH. В качестве источника кислорода применялась деионизованная вода, нагретая до 90 °С. Для нанесения первого слоя образцы погружались в раствор с ионами никеля на 10 мин, далее поочередно на 20 с – в деионизованную воду комнатной температуры, горячую деионизованную воду (90 °С), снова в деионизованную воду комнатной температуры, затем в раствор с ионами никеля. Деионизованная вода заменялась каждые пять циклов.

Полученные структуры изучались с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) на микроскопе SEM JEOL JSM-6010 Plus.

**Результаты и обсуждение.** Исследована зависимость структурных изменений УНТ в ходе плазменной функционализации от регистрируемого в рабочей камере давления при подаче смеси газов  $\text{Ar} + \text{O}_2$ , сочетающей принципиально различные механизмы взаимодействия плазмы с поверхностью УНТ. Аргон является инертным газом, ионы которого физически распыляют его поверхностные слои и создают активные центры для последующей функционализации кислородом, взаимодействующим с поверхностью химически. Реакции стимулируются низкоэнергетической электронной и ионной бомбардировкой, а также воздействием излучения. Как отмечено в [8], эффективность плазменной обработки в смеси  $\text{Ar} + \text{O}_2$  выше, чем в чистом кислороде, поскольку выше содержание активного кислорода вследствие реакции гашения:  $\text{Ar}^M + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ar} + \text{O}^+ + \text{O}^-$ , где  $\text{Ar}^M$  – метастабильный атом.

Для всех образцов мощность разряда составляла 50 Вт, время обработки 30 с. Несмотря на уменьшение степени дефектности УНТ (отношения  $I_D/I_G$ ), элементный анализ показал увеличение относительного содержания кислорода (рис.2).

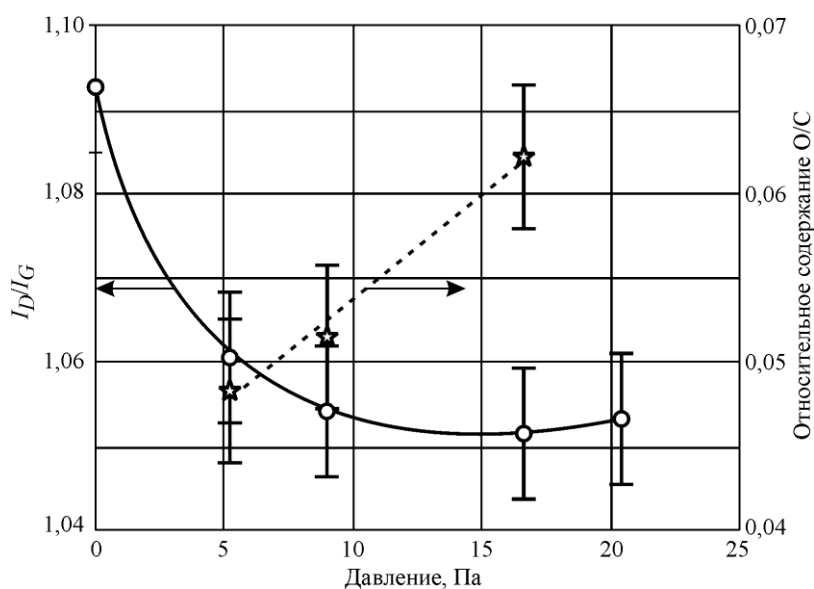


Рис.2. Зависимость отношения  $I_D/I_G$  и относительного содержания кислорода в массивах УНТ от давления в процессе плазменной обработки

С учетом изначальной высокой дефектности синтезированных УНТ уменьшение соотношения пиков, вероятно, связано со снижением концентраций аморфного углерода и дефектов в структуре УНТ, которые гораздо более реактивны, чем атомы упорядоченной графитовой структуры, и легко удаляются в ходе плазменной обработки. С увеличением расхода газовой смеси данный процесс происходит быстрее из-за роста числа возбужденных частиц. В то же время чем выше расход газовой смеси, тем быстрее обогащаются кислородом оборванные связи на поверхности УНТ, в том числе новые. При достижении определенной концентрации поверхность УНТ насыщается кислородом и окисление замедляется.

Таким образом, учитывая эффективность, характеризующуюся соотношением количества кислорода с объемом подаваемой газовой смеси, выбран процесс с расходом газов 0,2 л/ч  $\text{Ar} + 0,2$  л/ч  $\text{O}_2$ , что соответствует давлению 5,24 Па.

В работе [9] показано, что соотношение газов в кислородосодержащей смеси влияет как на образование дефектов, так и на окисление, а изменение мощности разряда слабо влияет на содержание кислорода.

Результаты экспериментов с использованием СКР и ЭДРС показали, что при увеличении мощности в два раза (с 50 до 100 Вт) относительное содержание кислорода практически не меняется, как и дефектность нанотрубок. Но при изменении соотношения расходов газов от 1/1 (0,2 л/ч Ar + 0,2 л/ч O<sub>2</sub>) до 2/1 (0,24 л/ч Ar + 0,12 л/ч O<sub>2</sub>) дефектность УНТ увеличивается, а относительное содержание кислорода не меняется (табл.1).

Таблица 1

**Влияние состава и расхода рабочих газов при плазменной обработке УНТ на их структурные характеристики**

Номер образца	Состав и расходы рабочих газов, л/ч	Давление в рабочей камере $p$ , Па	Мощность разряда $P$ , Вт	Время воздействия разряда $t$ , с	Относительное содержание О/С в образце	$I_D/I_G$
1	Без обработки	—	0	0	0	1,079
2	0,2Ar + 0,2O <sub>2</sub>	5,28	50	30	0,039	1,029
3	0,2Ar + 0,2O <sub>2</sub>	5,19	100	30	0,041	1,032
4	0,24Ar + 0,12O <sub>2</sub>	5,17	100	30	0,038	1,101

Существует максимум концентрации активного кислорода при определенном парциальном давлении аргона [9]. Снижение относительного содержания О/С в образце после достижения максимума объясняется преобладанием распыления поверхностных слоев над образованием радикалов.

При подаче смеси Ar + O<sub>2</sub> в соотношении 2/1 (рис.3) увеличение мощности разряда приводит к существенному росту содержания кислорода и повышению дефектности УНТ. Увеличение мощности с 50 до 100 Вт почти не дает прироста концентрации. Предполагается, что большая мощность увеличивает количество возбужденных частиц и их энергию и при парциальном преобладании аргона распыление с увеличением мощности идет более эффективно. В этом случае разрушается структура УНТ и увеличивается содержание кислорода относительно углерода.

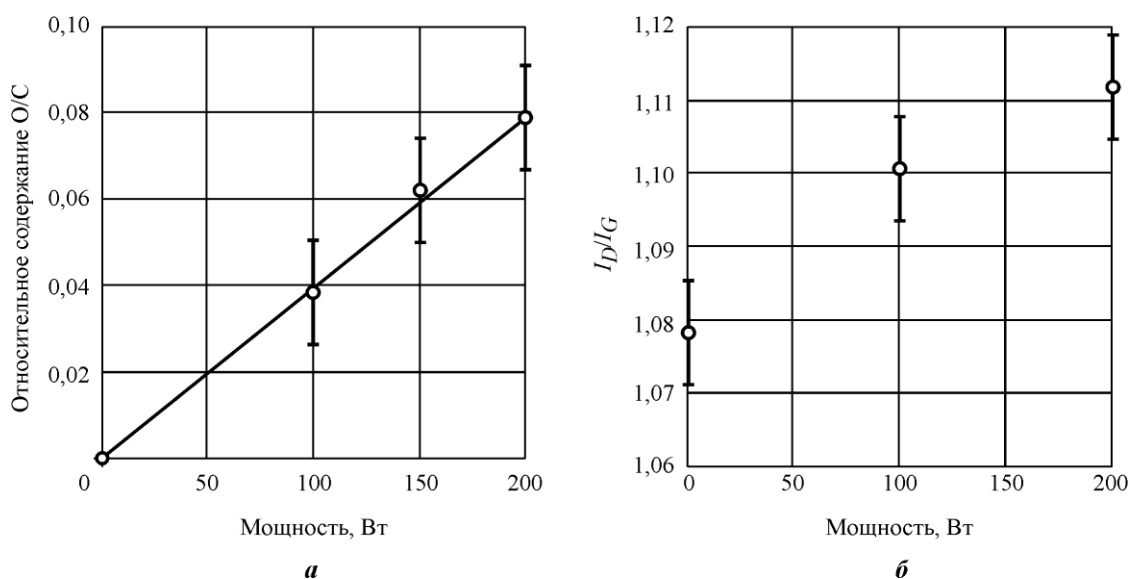


Рис.3. Зависимость относительного содержания кислорода (а) и отношения  $I_D/I_G$  (б) в массивах УНТ от мощности разряда при Ar/O<sub>2</sub> = 2/1

При мощности разряда 100 Вт исследовано влияние длительности времени воздействия плазмы при подаче смеси  $\text{Ar} + \text{O}_2$  в соотношении 2/1 (0,24 л/ч  $\text{Ar}$  и 0,12 л/ч  $\text{O}_2$ ) на массивы УНТ (рис.4). Относительное содержание кислорода в образцах массивов УНТ имеет линейную зависимость от времени обработки. Снижение соотношения  $I_D/I_G$  объясняется первоначальным удалением преимущественно аморфного углерода [10]. Затем начинает преобладать модификация  $sp^2$ -связей.

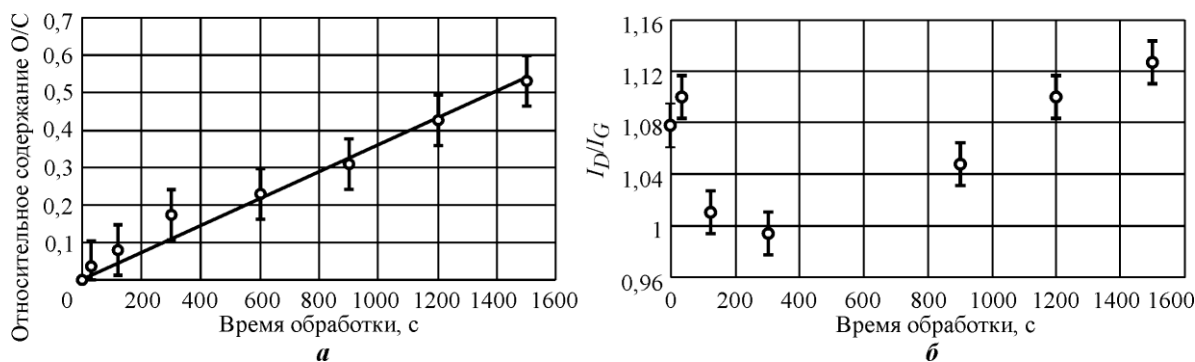


Рис.4. Зависимость относительного содержания кислорода (а) и отношения  $I_D/I_G$  (б) в массивах УНТ от времени обработки при  $\text{Ar}/\text{O}_2 = 2/1$

Объяснить протекающие на поверхности УНТ процессы можно с помощью модели кислородной функционализации, предложенной в [8] на основании рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии обработанных в ВЧ-плазме УНТ. Считается, что сначала на диссоциировавших  $\pi$ -связях  $\text{C}=\text{C}$  образуются радикалы, реагирующие с активными атомами кислорода, в результате образуются связи  $\text{C}-\text{O}$ , которые затем могут переходить в связи  $\text{C}-\text{OH}$ , стабилизируясь атомами водорода. Также на поверхности многослойных УНТ образуются радикалы кислорода, из которых возникают новые связи  $\text{C}=\text{O}$ , способные затем комбинировать с активным кислородом, образуя связи  $\text{O}-\text{C}=\text{O}$ .

С помощью РЭМ определено, что с увеличением мощности морфология массивов УНТ почти не меняется, а с увеличением времени воздействия формируются «пучки». В результате плазменной обработки сильно увеличивается поверхностная энергия вершечек отдельных УНТ, что заставляет их «слипаться» для ее уменьшения.

Образцы массивов УНТ, отличающиеся временем обработки в плазме, покрывались слоями оксида никеля методом SILAR (процесс состоял из 15 циклов). Результаты ЭДРС представлены в табл.2.

Таблица 2

Параметры режимов обработки образцов массивов УНТ и результаты ЭДРС

Номер образца	Состав и расходы рабочих газов, л/ч	Мощность разряда $P$ , Вт	Время воздействия разряда $t$ , с	Давление в рабочей камере $p$ , Па	Содержание элементов после обработки образцов методом SILAR, ат. %				
					C	O	Ni	Si	Al, F
1	Без обработки	0	0	—	84,3	12	3,7	0	0
2	0,24Ar + 0,12O <sub>2</sub>	100	120	5,08	67,8	23,8	5,1	3,3	0
3			900	5,25	32,6	45,9	5,5	8,5	7,5
4			1200	5,20	25,2	46,8	5,0	13,9	9,1

Можно предположить, что во время первой стадии наслаивания в холодном растворе-источнике никеля ионы «салятся» только на верхнюю часть нанотрубок, так как раствор не может проникнуть в глубь массива. При помещении образца в деионизованную воду, нагретую до температуры 90 °С, происходит окисление поверхности по всей длине благодаря меньшему поверхностному натяжению жидкости и большей активности среды из-за нагрева.

Появление пиков алюминия и железа при больших периодах процесса, скорее всего, обусловлено разогревом рабочего пространства и десорбцией этих элементов и их соединений с внутренней поверхности камеры установки реактивного ионного травления.

РЭМ-фотографии показали увеличение глубины осаждения оксида никеля в глубь массивов УНТ с увеличением продолжительности функционализации (рис.5). Высота массивов в результате уменьшилась с 7 мкм у не обработанных в плазме образцов до 5,5 мкм после обработки в течение 1200 с. Осаждение оксида никеля на нефункционализированные массивы происходит на глубину до 150 нм. По мере увеличения продолжительности процесса функционализации УНТ в плазме наблюдается увеличение глубины проникновения оксида в объем массива. В результате обработки в течение 1200 с УНТ оказались покрытыми на глубину более 2 мкм.

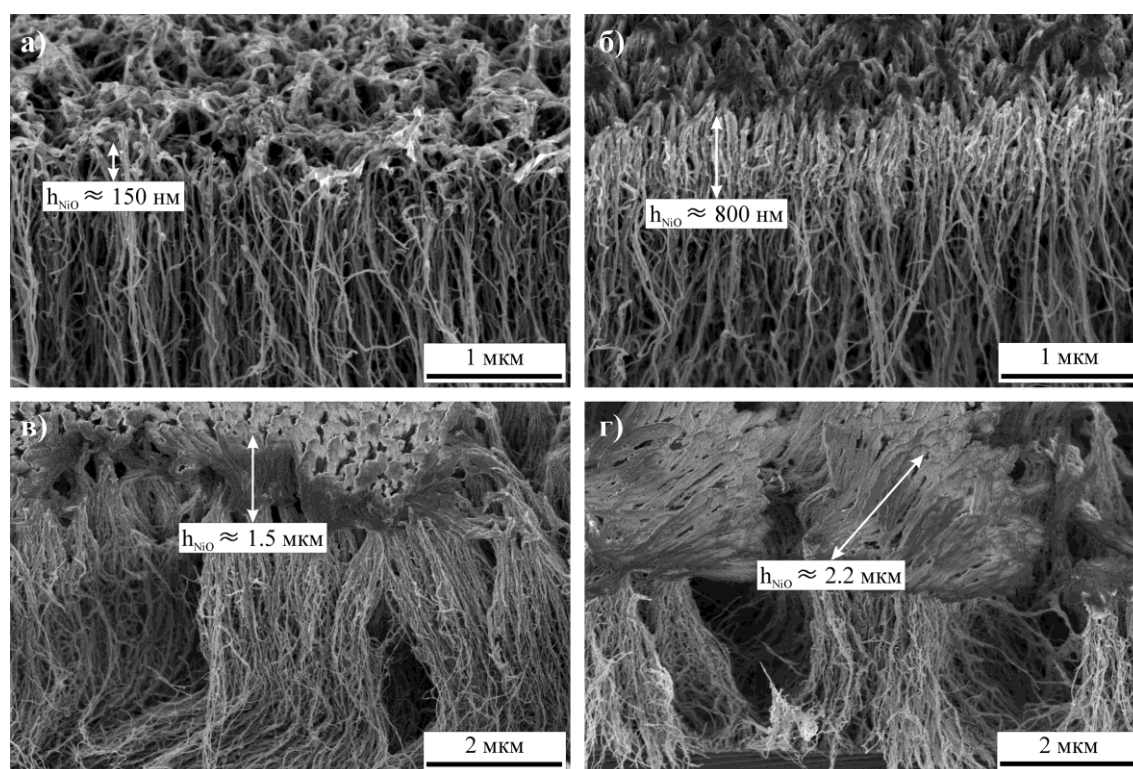


Рис.5. РЭМ-фотографии массивов УНТ с осажденным на их поверхность оксидом никеля без обработки (а) и обработанных в плазме  $\text{Ar} + \text{O}_2$  в течение: 120 с (б); 900 с (в); 1200 с (г)

В ходе плазменной обработки доминирующим является процесс травления структуры УНТ, на что указывает увеличение интенсивности кремниевого пика (сигнала от подложки). Сильное разрушение структуры УНТ ухудшает характеристики электродов, получаемых на основе композитов УНТ – оксид металла.



**Заключение.** Исследование влияния параметров обработки в ВЧ-плазме смеси  $\text{Ar} + \text{O}_2$  на структурные характеристики вертикально ориентированных массивов УНТ показало следующие результаты.

Эффективная функционализация осуществляется при сравнительно низких расходах газов рабочей смеси ( $0,24 \text{ л/ч Ar} + 0,12 \text{ л/ч O}_2$ ) с парциальным преобладанием аргона и при средних значениях мощности разряда. Эксперименты по осаждению оксида никеля на обработанные в плазме вертикально ориентированные массивы УНТ методом SILAR имеют тенденцию к «слипанию» нанотрубок в жидкой среде и осаждению  $\text{NiO}_x$  преимущественно на вершинах УНТ. Использование метода SILAR с оптимизированными параметрами позволяет покрыть вертикально ориентированные массивы УНТ на глубину до  $2,5 \text{ мкм}$ .

Результаты исследований выявили закономерности влияния режимов плазменной обработки на функционализацию поверхности УНТ в массиве. Таким образом, в перспективе возможно покрывать массивы УНТ оксидом никеля на всю его глубину.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10625).*

### Литература

1. Ren Z., Lan Y., Wang Y. Aligned NanoScience and Technology. Carbon Nanotubes Physics, Concepts, Fabrication and Devices. – Berlin – Heidelberg: Springer – Verlag, 2013. – 299 p.
2. Kar K., Pandey J., Rana S. Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application. Volume B: Carbon Nanotube Based Polymer Composites. – Berlin – Heidelberg: Springer – Verlag, 2015. – 601 p.
3. High power supercap electrodes based on vertical aligned carbon nanotubes on aluminum / S. Dörfler, I. Felhösi, T. Marek et al. // J. of Power Sources. – 2013. – Vol. 227. – P. 218–228.
4. Eder D. Carbon Nanotube-Inorganic Hybrids // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110. – P. 1348–1385.
5. Nanostructured carbon–metal oxide composite electrodes for supercapacitors: a review / M. Zhi, C. Xiang, J. Li et al. // Nanoscale. – 2013. – Vol. 5. – P. 72–88.
6. Hooijdonk E.V., Bittencourt C., Snyders R., Colomer J.-F. Functionalization of vertically aligned carbon nanotubes // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2013. – Vol. 4. – P. 129–152.
7. Loos M.R., Nahorny J., Fontana L.C. Plasma Modification of Carbon Nanotubes // Current Organic Chemistry. – 2013. – Vol. 17. – P. 1880–1893.
8. Oxygen functionalization of multiwall carbon nanotubes by microwave-excited surface-wave plasma treatment / C. Chen, B. Liang, A. Ogino et al. // J. Phys. Chem. C. – 2009. – Vol. 113. – P. 7659–7665.
9. Chen C., Ogino A., Wang X., Nagatsu M. Oxygen functionalization of multiwall carbon nanotubes by  $\text{Ar}/\text{H}_2\text{O}$  plasma treatment // Diamond Relat. Mater. – 2011. – Vol. 20. – P. 153–156.
10. Functionalization of MWCNTs with atomic nitrogen: electronic structure / B. Ruelle, A. Felten, J. Ghijsen et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol. 68. – P. 1008–1014.

Поступила после доработки 21.11.2016 г.; принята к публикации 24.01.2017 г.

**Алексеев Алексей Владимирович** – магистрант кафедры материалов функциональной электроники (МФЭ) МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), salvionn@gmail.com.

**Лебедев Егор Александрович** – ассистент кафедры МФЭ МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), dr.beefheart@gmail.com.

**Гаврилин Илья Михайлович** – аспирант кафедры МФЭ МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), gavrilin.ilya@gmail.com.

**Кицюк Евгений Павлович** – начальник сектора научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), Kitsyuk.e@gmail.com.

**Рязанов Роман Михайлович** – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), инженер научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), r.m.ryazanov@gmail.com.

**Дудин Александр Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНМЭ РАН (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 32А), alexanderdudin@msn.com

**Полохин Александр Александрович** – магистрант кафедры биомедицинских систем МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), a.a.polohin@gmail.com.

**Громов Дмитрий Геннадьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры МФЭ МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), gromadima@gmail.com.

### References

1. Ren Z., Lan Y., Wang Y. *Aligned NanoScience and Technology. Carbon Nanotubes Physics, Concepts, Fabrication and Devices*. Berlin, Heidelberg, Springer, Verlag, 2013. 299 p.
2. Kar K., Pandey J., Rana S. *Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application. Volume B: Carbon Nanotube Based Polymer Composites*. Berlin, Heidelberg, Springer, Verlag, 2015. 601 p.
3. Dörfler S., Felhösi I., Marek T., Althues H., Nyikos L., Kaskel S. High power supercap electrodes based on vertical aligned carbon nanotubes on aluminum. *J. of Power Sources.*, 2013, vol. 227, pp. 218–228.
4. Eder D. Carbon Nanotube-Inorganic Hybrids. *Chemical Reviews.*, 2010, vol. 110, pp. 1348–1385.
5. Zhi M., Xiang C., Li J., Li M., Wu N. Nanostructured carbon–metal oxide composite electrodes for supercapacitors: a review. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, pp. 72–88.
6. Hooijdonk E.V., Bittencourt C., Snyders R., Colomer J.-F. Functionalization of vertically aligned carbon nanotubes. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2013, vol. 4, pp. 129–152.
7. Loos M.R., Nahorny J., Fontana L.C. Plasma Modification of Carbon Nanotubes. *Current Organic Chemistry*, 2013, vol. 17, pp. 1880–1893.
8. Chen C., Liang B., Ogino A., Wang X., Nagatsu M. Oxygen functionalization of multiwall carbon nanotubes by microwave-excited surface-wave plasma treatment. *J. Phys. Chem. C.*, 2009, vol. 113, pp. 7659–7665.
9. Chen C., Ogino A., Wang X., Nagatsu M. Oxygen functionalization of multiwall carbon nanotubes by Ar/H<sub>2</sub>O plasma treatment. *Diamond Relat. Mater.*, 2011, Vol. 20, pp. 153–156.
10. Ruelle B., Felten A., Ghijsen J., Drube W., Johnson R.L., Liang D., Erni R., Tendeloo G.V., Dubois P., Hecq M., Bittencourt C. Functionalization of MWCNTs with atomic nitrogen: electronic structure. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, vol. 68, pp. 1008–1014.

Submitted 21.11.2016; accepted 24.01.2017.

### Уважаемые авторы и читатели!



Вышел в свет журнал

**RUSSIAN MICROELECTRONICS**

Vol. 45, No. 7, 2016. - ISSN: 1063-7397

<http://pleiades.online>

<http://www.springerlink.com>