

13. Klimin V.S., Es'kov A.V., Petrov N.N. Issledovanie vliyaniya rezhimov plazmokhimicheskogo travleniya poverkhnosti arsenida galliya v plazme $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$ [Research of influence of modes of plasma-chemical etching of the surface of the gallium arsenide in the plasma of a $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 6-14.
14. Ageev O.A., Klimin V.S., Solodovnik M.S., Eskov A.V., Krasnoborodko S.Y. The study of influence of the gas flow rate to etched layer thickness, and roughness of the anisotropy field of gallium arsenide is etched in the plasma chemical etching process, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, No. 1, pp. 012178.
15. Klimin V.S., Solodovnik M.S., Smirnov V.A., Eskov A.V., Tominov R.V., Ageev O.A. A study of the vertical walls and the surface roughness GaAs after the operation in the combined plasma etching, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Ser. "International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016" 2016*, pp. 102241Z.
16. Klimin V.S. Issledovanie vliyaniya rezhimov profilirovaniya poverkhnosti struktur na osnove arsenida galliya metodom plazmokhimicheskogo travleniya s uchetom potoka khlorosoderzhashchego gaza [Research of influence of modes of surface profiling of structures based on gallium arsenide by plasma etching with consideration of the flow of the chlorine-containing gas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 169-178.
17. Tominov R.V., Bespoludin V.V., Klimin V.S., Smirnov V. A. and Ageev O.A. Profiling of nanostructures by scratching probe nanolithography and plasma chemical etching, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 256, pp. 012023.
18. Klimin V.S., Tominov R.V., Eskov A.V., Krasnoborodko S.Y. and Ageev O.A. The influence of the chemical and physical component of the plasma etching of the surface of gallium arsenide on the etching rate in the chloride plasma of the combined discharge, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 917, pp. 092005.
19. Ageev O.A. Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Study of modes of formation of oxide nanoscale structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
20. Ageev O.A., Solodovnik M.S., et al. Effect of GaAs native oxide upon the surface morphology during GaAs MBE growth, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, No. 1, pp. 012012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Климин Виктор Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: kliminv.s@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. «Е»; тел.: 88634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Klimin Viktor Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: kliminv.s@mail.ru; 2, Shevchenko street, build. "E", Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.38-022.533

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-75-84

О.И. Ильин

БИОМИМИЧЕСКИЕ АДГЕЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Представлены результаты исследований закономерностей влияния режимов выращивания углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на геометрические размеры и адгезионные свойства массивов нанотрубок. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния времени активации, мощности плазмы, температуры и времени роста на параметры углеродных нанотрубок. Показано, что выдержка в плазме аммиака приводит к травлению каталитических центров Ni и уменьшению их диамет-

ра. При этом с увеличением времени «активации» увеличивается вероятность объединения мелких каталитических центров в более крупные вследствие поверхностной диффузии, что приводит к увеличению диаметра и снижению плотности углеродных нанотрубок. Установлено, что повышение мощности плазмы до 40 Вт способствует полному удалению мелких каталитических центров и образованию индивидуальных вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. Время «активации» менее 5 сек способствует повышению адгезии каталитических центров к подложке и позволяет управлять механизмом роста. С увеличением температуры до 675 °С наблюдается одновременное протекание процессов сублимации и поверхностной диффузии, что приводит к уменьшению диаметра, высоты и плотности углеродных нанотрубок. Также повышение температуры приводит к ускорению десорбции ацетилена с поверхности образца и углеродсодержащий газ откачивается вакуумной системой, не прореагировав с каталитическими центрами. Установлено, что отсутствие вектора напряженности электрического поля, определяющего направление роста углеродных нанотрубок, приводит к формированию разориентированного массива УНТ. Показано, что управление технологическими режимами роста позволяет создавать массивы углеродных нанотрубок различных типов: переплетенные, индивидуальные, разветвленные и разориентированные. Проведены исследования адгезии экспериментальных образцов методом атомно-силовой микроскопии. Установлено, что наибольшую величину силы адгезии (11121 нН) показывают ориентированные массивы углеродных нанотрубок, которые в процессе выращивания были сгруппированы в пучки с диаметром отдельных нанотрубок 51 нм, высотой 0,69 мкм и плотностью 69 мкм⁻¹. Результаты исследований могут быть использованы при создании адгезионных покрытий и механических контактов высокой прочности для космической индустрии и робототехники, а также при создании элементов углеродной наноэлектроники.

Углеродные нанотрубки; плазмохимическое осаждение из газовой фазы; адгезия; атомно-силовая микроскопия; адгезионные покрытия.

O.I. P'in

BIOMIMETIC ADHESION COATING BASED ON CARBON NANOTUBES

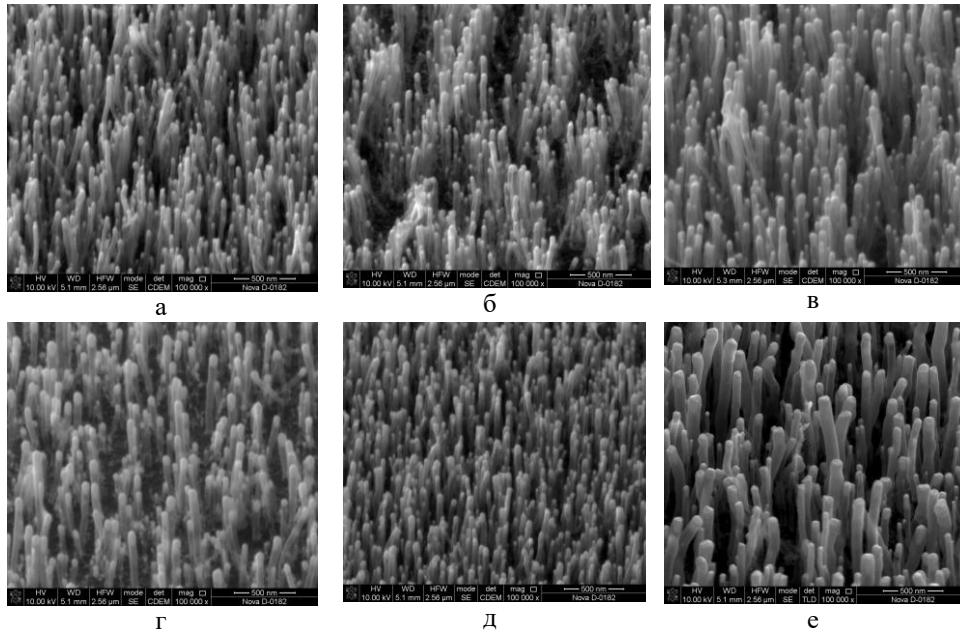
The article presents the results of studies of regularities in the carbon nanotubes growing modes influences by plasma enhanced chemical vapor deposition on the geometric dimensions and adhesion properties of nanotube arrays. The results of experimental studies of the effect of activation time, plasma power, temperature and growth time on the parameters of carbon nanotubes are presented. It is shown that exposure in an ammonia plasma leads to etching of Ni catalytic centers and a decrease in their diameter. With an increase in the "activation" time increases the probability of association of small catalytic centers into larger due to surface diffusion, which leads to an increase in diameter and decrease in the density of carbon nanotubes. It has been established that an increase of the plasma power up to 40 W promotes to complete removal of small catalytic centers and the formation of individual vertically aligned carbon nanotubes. "Activation" time of less than 5 sec promotes an increase in the catalytic centers adhesion to the substrate and allows controlling the growth mechanism. With an increase temperature to 675 °C, simultaneous processes of sublimation and surface diffusion occur, which leads to a decrease in the diameter, height, and density of carbon nanotubes. Also, temperature increasing leads to an acceleration of the desorption of acetylene from the surface of the sample and the carbon-containing gas is evacuated by the vacuum system without reacting with the catalytic centers. It is established that the absence of a vector of electric field strength which determining the direction of growth of carbon nanotubes leads to the formation of a disoriented arrays of CNTs. It is shown that the management of technological modes makes it possible to growth arrays of carbon nanotubes of various types: interwoven, individual, branched and disoriented. Studies of the adhesion of experimental samples by atomic force microscopy have been carried out. It has been established that the greatest value of the adhesion force (11121 nN) is shown by aligned arrays of carbon nanotubes, which were grouped in bundles during the growing process with the diameter of individual nanotubes 51 nm, height 0.69 μm and density 69 μm⁻¹. The results of the research can be used for creating adhesion coatings and mechanical contacts of high strength for the space industry and robotics, as well as for the creation of elements of carbon nanoelectronics.

Carbon nanotubes; plasma enhanced chemical vapor deposition; atomic-force microscope; adhesion coatings.

1. Введение. Развитие нанотехнологий и возможности создания пространственно-ориентированных наноразмерных структур, породили широкий интерес к исследованиям в области создания искусственных биоподобных структур, в которых воспроизведение параметров биологических объектов [1–6] позволяет решить ряд задач на предприятиях микро- и нанoeлектронной промышленности корпусирования микросхем, в космической отрасли, а также при создании ремонтных материалов с «сухой» адгезией, работающих в условиях вакуума. Среди искусственных биомимических наноструктур наилучшими адгезионными характеристиками обладают вертикально ориентированные углеродные нанотрубки (ВОУНТ) [1, 7–10], что связано с повышением силы адгезии за счет увеличения числа контактирующих с поверхностью наноструктур [11]. При этом для контролируемого выращивания углеродных нанотрубок (УНТ) с заданными характеристиками наиболее перспективен метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) [12–15]. Однако большое количество параметров метода PECVD требуют установления однозначной взаимосвязи их влияния на выращивание углеродных нанотрубок с требуемыми параметрами.

Целью данной работы является исследование закономерностей влияния режимов выращивания углеродных нанотрубок методом PECVD на их геометрические размеры и адгезионные свойства.

2. Методика эксперимента. В качестве подложки при создании экспериментальных образцов с массивами УНТ использовалась пластина химически очищенного кремния Si(100). На подложке методом магнетронного распыления были сформированы барьерный (TiN) и каталитический (Ni) слои [16] с толщинами 100 и 10 нм, соответственно, после чего подложка скрайбировалась на отдельные образцы. Для исследования влияния параметров УНТ на величину силы адгезии были выращены 12 образцов четырех типов: ВОУНТ объединенные в пучки (рис. 1,а-в), индивидуальные ВОУНТ (рис. 1,г-е), разветвленные УНТ (рис. 1,ж-и) и разориентированные УНТ (рис. 1,к-м). Выращивание ВОУНТ проводилось методом PECVD с использованием специализированного модуля кластерного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия) [17].



а

б

в

г

д

е

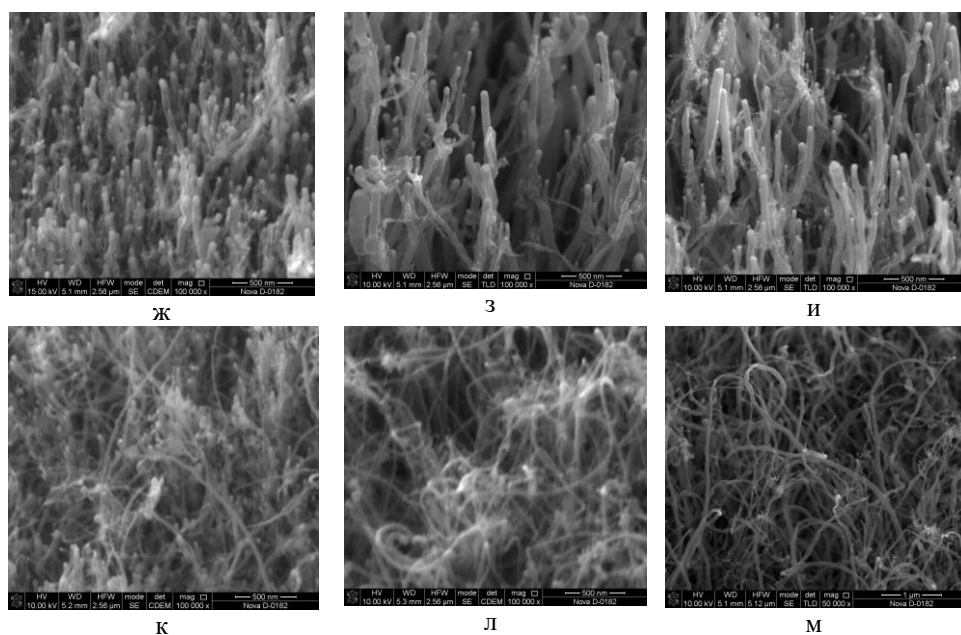


Рис. 1. РЭМ-изображения экспериментальных образцов: (а)-(в) А1-А3, (г)-(е) В1-В3, (ж)-(и) С1-С3, (к)-(м) D1-D3

Выращивание УНТ проводилось в 3 стадии: «нагрев», «активация» и «рост». На стадии «нагрева» формирование каталитических центров Ni из сплошной пленки каталитического материала проводилось путем нагрева образцов до заданных температур за 20 минут в атмосфере аргона (40 sccm) и аммиака (15 sccm) при давлении 4.5 Торр. После проводилась «активация» – выдержка подложек в атмосфере аммиака (210 sccm), при этом, в зависимости от типа выращиваемых образцов дополнительно могла инициироваться плазма. Инициация плазмы проводилась с помощью высоковольтного источника постоянного тока. На этапе «роста» одновременно с аммиаком в камеру подавался ацетилен (70 sccm) и проводилось выращивание УНТ по вершинному механизму. Для создания вертикальной направленности роста УНТ относительно подложки инициировалась плазма. Значения времени активации ($t_{акм}$), мощности плазмы (W), температуры (T) и времени роста ($t_{рост}$) изменялись для создания образцов с различными параметрами УНТ. Оценка геометрических параметров массивов УНТ экспериментальных образцов проводилась с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Nova NanoLab 600 (FEI, Нидерланды) [18, 19]. Параметры роста массивов УНТ и их геометрические размеры УНТ представлены в табл. 1.

Исследование силы адгезии экспериментальных образцов проводилось с использованием зондовой нанолaborатории Ntegra (NT-MDT, Россия) [20]. В качестве зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) использовался коллоидный зонд серии CPC_SiO₂-20/Au с радиусом закругления 20 мкм и коэффициентом жесткости $k = 0,3$ Н/м. Измерения величины адгезии проводились в 10 точках массива каждого экспериментального образца в режиме силовой спектроскопии АСМ. В процессе силовой спектроскопии измерялись зависимости величины изгиба кантилевера (сигнал J_{DFL}) от степени выдвижения z-пьезоэлемента сканера (сигнал h) на прямом (сплошная линия) и обратном (пунктирная линия) ходе кантилевера [21]. Экспериментальные зависимости $\Delta J_{DFL}(h)$ представлены на рис. 2.

Таблица 1

Параметры УНТ и расчетные значения адгезии экспериментальных образцов

№ образца	Диаметр, нм	Высота, мкм	Плотность, мкм ⁻¹	Параметры выращивания УНТ		Сила адгезии, нН
				Постоянные	Изменяемые	
A1	43,8	0,65	82	T = 660 °C, W = 25 Вт, t _{рост} = 12 мин	t _{акт} , сек	20
A2	35,6	1,21	72			40
A3	51	0,69	69			60
B1	44,1	0,35	95	T = 660 °C, W = 40 Вт, t _{рост} = 12 мин	t _{акт} , сек	120
B2	62	0,28	54			180
B3	63,2	0,65	38			240
C1	42,1	0,42	71	t _{акт} = 5 сек, W = 50 Вт, t _{рост} = 12 мин	T, °C	645
C2	50,1	15,97	44			660
C3	44,7	12,45	26			675
D1	34,6	2,11	89	T = 660 °C, t _{акт} = 60 сек, W = 0 Вт	t _{рост} , мин	4
D2	28,7	2,87	52			8
D3	28,8	3,07	45			12

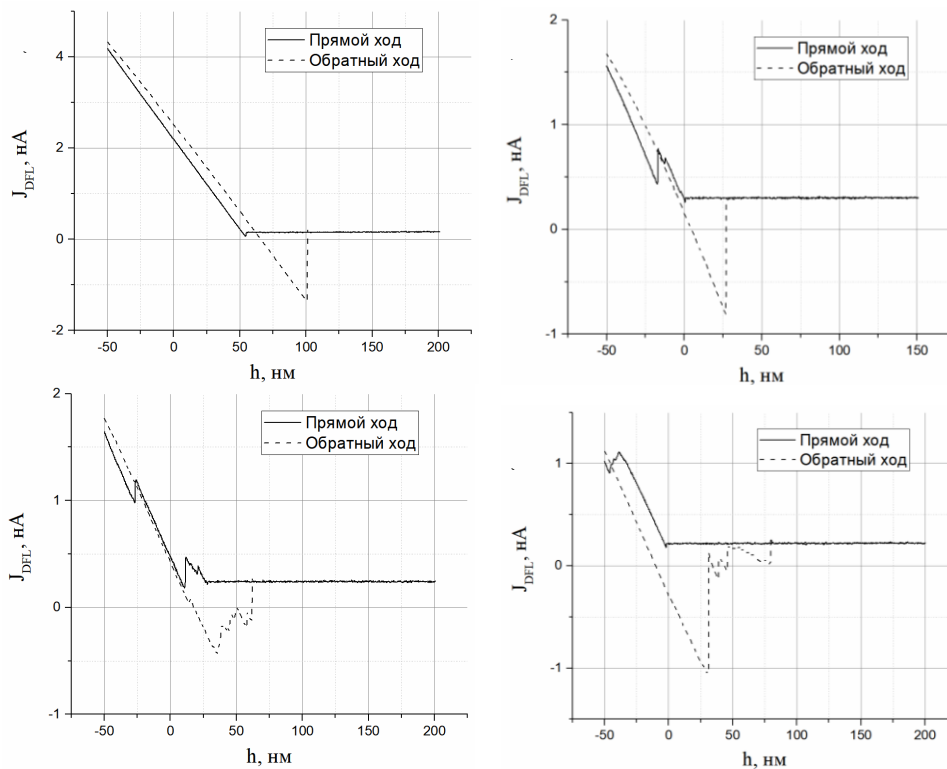


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\Delta J_{DFL}(h)$: а – ВОУНТ объединенные в пучки; б – индивидуальные ВОУНТ; в – разветвленные УНТ; г – разориентированные УНТ

С помощью полученных в результате силовой спектроскопии АСМ зависимостей оценивалась сила адгезии массива ВОУНТ F_a к поверхности зонда АСМ [21]:

$$F_a = \Delta J_{DFL} (dh / dJ_{DFL}) k, \quad (1)$$

где ΔJ_{DFL} – величина, равная разности сигнала ΔJ_{DFL} в точке полного отрыва зонда от массива УНТ и в точке максимального отрицательного значения сигнала ΔJ_{DFL} .

3. Результаты и обсуждение. Анализ РЭМ-изображений экспериментальных образцов *A1-A3* показал, что при параметрах, представленных в табл. 1, выдержка в плазме аммиака приводит к травлению каталитических центров (КЦ) Ni и уменьшению их диаметра с 43,8 нм до 35,6 нм в образцах *A1* и *A2*, соответственно. Однако с увеличением времени «активации» увеличивается вероятность объединения мелких КЦ в более крупные вследствие поверхностной диффузии, что приводит к увеличению диаметра и снижению плотности УНТ в образце *A3*. При этом режимы выращивания УНТ со временем «активации» менее 1 мин способствует образованию пучков УНТ.

В образцах *B1-B3* увеличение времени «активации» также сопровождалось процессами объединения мелких КЦ в более крупные с увеличением диаметра и снижения плотности. При этом повышение мощности плазмы до 40 Вт способствовало полному удалению мелких КЦ и большей напряженности электрического поля, что позволило получить массивы индивидуальных ВОУНТ.

Одной из особенностей процесса выращивания УНТ методом PECVD заключается в том, что величина температуры на этапе «нагрева», затем сохраняется на этапах «активации» и «роста». Таким образом, при изменении температуры «роста» от 645 до 675 °С на РЭМ-изображениях образцов *C1-C3* видно интегральное влияние температуры, связанное с двумя процессами:

- 1) образования каталитических центров на этапах «нагрева» и «активации»;
- 2) роста УНТ на каталитических центрах сформировавшихся при заданной температуре.

При этом малое время «активации» способствует повышению адгезии КЦ к подложке. В результате чего происходит рост как по «вершинному», так и «корневому» механизму с образованием массивов разветвленных УНТ. С увеличением температуры до 675 °С наблюдается одновременное протекание процессов сублимации и поверхностной диффузии, что приводит к уменьшению диаметра, высоты и плотности УНТ. Также повышение температуры приводит к ускорению десорбции ацетилена с поверхности образца и углеродсодержащий газ откачивается вакуумной системой не прореагировав с КЦ.

Для получения экспериментальных образцов *D1-D3* в процессе роста не инициировалась плазма. Отсутствие вектора напряженности электрического поля, определяющего направление роста УНТ, привело к формированию разориентированного массива УНТ. Увеличение времени роста от 4 до 12 мин позволило получить массивы УНТ с высотой от 2,11 до 3,07 мкм.

Значения адгезии полученных экспериментальных образцов, рассчитанные на основании формулы (1), представлены в табл. 1.

Анализ результатов измерений показал, что наибольшим средним значением силы адгезии (8228 нН) обладали экспериментальные образцы *A1-A3*. Данный эффект может быть связан с тем, что в процессе измерения преобладала продольная деформация УНТ и отсутствовало дополнительное слипание нанотрубок между собой при взаимодействии с зондом АСМ.

Индивидуальные ВОУНТ экспериментальных образцов *B1-B3* демонстрировали наименьшую величину адгезии среди всех серий образцов (1510 нН), что может быть связано с преобладанием поперечной деформацией УНТ и слипанием их между собой в процессе измерений. При этом следует отметить, что среди образцов *B1-B3* наблюдалось увеличение силы адгезии ВОУНТ с ростом аспектного соотношения и их плотности в массиве.

Анализ результатов измерений адгезии в образцах с разветвленными (*C1-C3*) и разориентированными (*D1-D3*) УНТ показал, что среднее значение силы адгезии составило 3957 и 3724 нН, соответственно. Видно, что сила адгезии данных образцов меньше, чем у образцов *A1-A3*, но превышает величину адгезии для образцов *B1-B3* (табл. 1). Данная зависимость может быть связана с тем, что в процессе измерений образцов *C1-C3* и *D1-D3* зонд взаимодействовал не с вершинами нанотрубок, а с их боковыми стенками, в отличие от измерений образцов *A1-A3*. Но при этом не происходило слипания вершин УНТ между собой в отличие от образцов *B1-B3*.

Также необходимо учитывать, что изменение геометрических параметров выращенных УНТ приводит к изменению их модуля Юнга [22], оказывающего влияние на величину силы адгезии. Таким образом, показано, что режимы роста значительно влияют на параметры УНТ, что позволяет управлять величиной адгезии УНТ от 671 до 11121 нН. Максимальное значение силы адгезии 11121 нН достигается при режиме выращивания пучков УНТ при времени активации 60 сек, температуре роста 660 °С, мощности плазмы 25 Вт и времени роста 12 мин.

При этом использование при измерениях коллоидного зонда радиусом 20 мкм позволяет определить значение макроадгезии УНТ, которое в несколько раз превышает значение локальной адгезии УНТ, получаемое при измерении стандартным кремниевым зондом АСМ радиусом 20 нм [21].

Заключение. В работе проведены экспериментальные исследования выращивания массивов УНТ и измерения величины силы адгезии от параметров углеродных нанотрубок. Показано, что управление временем активации, мощности плазмы, температуры и времени роста позволяет создавать массивы с нанотрубками различных типов: переплетенных, индивидуальных, разветвленных и разориентированных УНТ.

Установлено, что наибольшую величину силы адгезии показывают массивы пучков УНТ. Среди индивидуальных УНТ для достижения максимального значения силы адгезии следует выращивать УНТ с высокими аспектными соотношениями (более 10).

Результаты исследований могут быть использованы при создании адгезионных покрытий и механических контактов высокой прочности для космической индустрии и робототехники, а также при создании элементов углеродной наноэлектроники [12, 23–25].

Благодарности

Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного использования «Нанотехнология» Южного Федерального Университета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-14023 офи_м; № 18-32-00652 мол_а) и внутреннего гранта Южного Федерального Университета (проект ВнГр-07/2017-26).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Qu L., Dai L.* Gecko-foot-mimetic aligned single-walled carbon nanotube dry adhesives with unique electrical and thermal properties // *Adv. Mater.* – 2007. – Vol. 19. – P. 3844-3849.
2. *Lau K., Bico J., Teo K., Chhowalla M., Amaratunga G., Milne W.I., McKinley G.H., Gleason K.K.* Superhydrophobic carbon nanotube forests // *Nano Letters.* – 2003. – Vol. 3, No. 12. – P. 1701-1705.
3. *Rouhrig M., Thiel M., Worgull M., Houscher H.* 3D Direct Laser Writing of Nano- and Microstructured Hierarchical Gecko-Mimicking Surfaces // *Small.* – 2012. – Vol. 8, No. 19. – P. 3009-3015.

4. Autumn K., Liang Y.A., Hsieh S.T., Zesch W., Chan W.P., Kenny Th.W., Fearing R., Full R.J. Adhesive force of a single gecko foot-hair // *Nature*. – 2000. – Vol. 405. – P. 681-685.
5. Jeong H.E., Lee S.H., Kim P., Suh K.Y. High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2008. – Vol. 313-314. – P. 359-364.
6. Majidi C., Groff R.E., Autumn K., Baek S., Bush B., Gravish N., Maboudian R., Maeno Y., Schubert B., Wilkinson M., Fearing R.S. High friction from a stiff polymer using micro-fiber arrays // *Physical Review Letters*. – 2006. – Vol. 97. – P. 076103.
7. Ge L., Sethi S., Ci L., Ajayan P.M., Dhinojwala A. Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes // *Proc. Nat. Acad. Sciences*. – 2007. – Vol. 104, No. 26. – P. 10792-10795.
8. Qu L., Dai L., Stone M., Xia Z., Wang Z.L. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off // *Science*. – 2008. – Vol. 322. – P. 238-242.
9. Yurdumakan B., Raravikar N.R., Ajayan P.M., Dhinojwala A. Synthetic gecko foot-hairs from multiwalled carbon nanotubes // *Chemical Communications*. – 2005. – Vol. 2005. – P. 3799-3801.
10. Ageev O.A., Блинов Ю.Ф., Ильина М.В., Ильин О.И., Смирнов В.А., Цуканова О.Г. Исследование адгезии вертикально ориентированных углеродных нанотрубок к подложке методом атомно-силовой микроскопии // *Физика твердого тела*. – 2016. – № 2. – С. 301-306.
11. Greiner C., Campo A.D., Arzt E. Adhesion of bioinspired micropatterned surfaces: effects of pillar radius, aspect ratio, and preload // *Langmuir*. – 2007. – Vol. 23, No. 7. – P. 3495-502.
12. Ageev O.A., *etc. al.* Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices // *Springer Proceedings in Physics*. – 2016. – Vol. 175. – P. 563-580.
13. Ильин О.И., Климин В.С., Рубашкина М.В., Сергиенко К.С., Семенов А.С., Федотов А.А., Чинь Ван Мьой, Яненко В.Ю. Термодинамический анализ взаимодействия в системе Ni-Cr-Si при выращивании углеродных нанотрубок методом химического осаждения из газовой фазы // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 79-92.
14. Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Ageev O.A. The growth temperature effect on vertically aligned carbon nanotubes parameters // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 92-94.
15. Klimin V.S., Il'ina M.V., Il'in O.I., Rudyk N.N., Ageev O.A. Research of influence of the underlayer material on the growth rate of carbon nanotube arrays for manufacturing non-volatile memory elements with high speed // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. – 2017. – Vol. 917. – P. 092023.
16. Ageev O.A., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Пилипенко В.А. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС. – Харьков: НТК “Институт монокристаллов”, 2008. – 392 с.
17. Достанко А.П., Аваков С.М., Ageev O.A. и др. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники. – Минск: Белорусская наука, 2016. – 251 с.
18. Алексеев А.Н., Соколов И.А., Ageev O.A., Коноплёв Б.Г. Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.
19. Ageev O.A., Быков В.А. Технологическое оборудование для создания наносистемной техники // *Нанотехнологии Экология Производство*. – 2010. – № 5. – С. 68-70.
20. Коноплёв Б.Г., Ageev O.A. Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
21. Ageev O.A., Ильин О.И., Климин В.С., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Сюржик Ю.В., Цуканова О.Г. Исследование возможности создания биомимических адгезионных покрытий на основе массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 58-67.
22. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomytsev A.S., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Investigation of effect of geometrical parameters of vertically aligned carbon nanotubes on their mechanical properties // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 894. – P. 355-359.
23. Ageev O.A., Ильин О.И., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Цуканова О.Г. Определение удельного сопротивления вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами сканирующей зондовой микроскопии // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85, № 7. – С. 100-106.

24. Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Yu.F., Smirnov V.A., Kolomiytsev A.S., Fedotov A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes // *Carbon*. – 2017. – Vol. 123. – P. 514-524.
25. Ageev O.A., Быков A.B., Коломийцев A.C., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Цуканова О.Г. Исследование методов модификации зондов для атомно-силовой микроскопии критических размеров осаждением углеродных нанотрубок // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 127-136.

REFERENCES

1. Qu L., Dai L. Gecko-foot-mimetic aligned single-walled carbon nanotube dry adhesives with unique electrical and thermal properties, *Adv. Mater.*, 2007, Vol. 19, pp. 3844-3849.
2. Lau K., Bico J., Teo K., Chhowalla M., Amaratunga G., Milne W.I., McKinley G.H., Gleason K.K. Superhydrophobic carbon nanotube forests, *Nano Letters*, 2003, Vol. 3, No. 12, pp. 1701-1705.
3. Rouhrig M., Thiel M., Worgull M., Houlcher H. 3D Direct Laser Writing of Nano- and Microstructured Hierarchical Gecko-Mimicking Surfaces, *Small*, 2012, Vol. 8, No. 19, pp. 3009-3015.
4. Autumn K., Liang Y.A., Hsieh S.T., Zesch W., Chan W.P., Kenny Th.W., Fearing R., Full R.J. Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature*, 2000, Vol. 405, pp. 681-685.
5. Jeong H.E., Lee S.H., Kim P., Suh K.Y. High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, Vol. 313-314, pp. 359-364.
6. Majidi C., Groff R.E., Autumn K., Baek S., Bush B., Gravish N., Maboudian R., Maeno Y., Schubert B., Wilkinson M., Fearing R.S. High friction from a stiff polymer using micro-fiber arrays, *Physical Review Letters*, 2006, Vol. 97, pp. 076103.
7. Ge L., Sethi S., Ci L., Ajayan P.M., Dhinojwala A. Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes, *Proc. Nat. Acad. Sciences*, 2007, Vol. 104, No. 26, pp. 10792-10795.
8. Qu L., Dai L., Stone M., Xia Z., Wang Z.L. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off, *Science*, 2008, Vol. 322, pp. 238-242.
9. Yurdumakan B., Raravikar N.R., Ajayan P.M., Dhinojwala A. Synthetic gecko foot-hairs from multivalled carbon nanotubes, *Chemical Communications*, 2005, Vol. 2005, pp. 3799-3801.
10. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Il'ina M.V., Il'in O.I., Smirnov V.A., Tsukanova O.G. Issledovanie adgezii vertikal'no orientirovannykh uglevodnykh nanotrubok k podlozhke metodom atomno-silovoy mikroskopii [Study of adhesion of vertically oriented carbon nanotubes to the substrate by atomic force microscopy], *Fizika tverdogo tela [Solid state physics]*, 2016, No. 2, pp. 301-306.
11. Greiner C., Campo A.D., Arzt E. Adhesion of bioinspired micropatterned surfaces: effects of pillar radius, aspect ratio, and preload, *Langmuir*, 2007, Vol. 23, No. 7, pp. 3495-502.
12. Ageev O.A., etc. al. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices, *Springer Proceedings in Physics*, 2016, Vol. 175, pp. 563-580.
13. Il'in O.I., Klimin V.S., Rubashkina M.V., Sergienko K.S., Semenov A.S., Fedotov A.A., Chin' Van Myoy, Yanenko V.Yu. Termodinamicheskiy analiz vzaimodeystviya v sisteme Ni-Cr-Si pri vyrashchivaniy uglevodnykh nanotrubok metodom khimicheskogo osazhdeniya iz gazovoy fazy [Thermodynamic analysis of interaction in the Ni-Cr-Si system for growing carbon nanotubes by chemical deposition from the gas phase], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2014, No. 9 (158), pp. 79-92.
14. Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Ageev O.A. The growth temperature effect on vertically aligned carbon nanotubes parameters, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 92-94.
15. Klimin V.S., Il'ina M.V., Il'in O.I., Rudyk N.N., Ageev O.A. Research of influence of the underlayer material on the growth rate of carbon nanotube arrays for manufacturing non-volatile memory elements with high speed, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, Vol. 917, pp. 092023.
16. Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S., Konakova R.V., Milenin V.V., Pilipenko V.A. Fazy vnedreniya v tekhnologii poluprovodnikovyykh priborov i SBIS [The implementation phase in the technology of semiconductor devices and VLSI]. Khar'kov: NTK "Institut monokristallov", 2008, 392 p.

17. *Dostanko A.P., Avakov S.M., Ageev O.A. i dr.* Tekhnologicheskie komplekсы integrirovannykh protsessov proizvodstva izdeliy elektroniki [Technological complexes of integrated processes of production of electronic products]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2016, 251 p.
18. *Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G.* Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for r&d center. The experience in implementing of SEC «nanotechnology» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
19. *Ageev O.A., Bykov V.A.* Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya sozdaniya nanosistemnoy tekhniki [Technological equipment for the creation of nanosystem technology], *Nanotekhnologii Ekologiya Proizvodstvo* [Nanotechnology Ecology Production], 2010, No. 5, pp. 68-70.
20. *Konoplev B.G., Ageev O.A.* Elionnye i zondovye nanotekhnologii dlya mikro- i nanosistemnoy tekhniki [Leonnie and probe nanotechnologies for micro- and nanosystem technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (89), pp. 165-175.
21. *Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Syurik Yu.V., Tsukanova O.G.* Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya biomimicheskikh adgezionnykh pokrytiy na osnove massiva vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok [Study of the possibility of creating biomimic adhesive coatings based on an array of vertically oriented carbon nanotubes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 58-67.
22. *Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A.* Investigation of effect of geometrical parameters of vertically aligned carbon nanotubes on their mechanical properties, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 894, pp. 355-359.
23. *Ageev O.A., Il'in O.I., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Tsukanova O.G.* Opredelenie udel'nogo soprotivleniya vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok metodami skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Determination of specific resistance of vertically oriented carbon nanotubes by scanning probe microscopy], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2015, Vol. 85, No. 7, pp. 100-106.
24. *Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Yu.F., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Fedotov A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A.* Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes, *Carbon*, 2017, Vol. 123, pp. 514-524.
25. *Ageev O.A., Bykov A.V., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Tsukanova O.G.* Issledovanie metodov modifikatsii zondov dlya atomno-silovoy mikroskopii kriticheskikh razmerov osazhdeniem uglerodnykh nanotrubok [The study of methods of modification of probes for atomic force microscopy critical size by the deposition of carbon nanotubes], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2015, Vol. 20, No. 2, pp. 127-136.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

Ильин Олег Игоревич – Южный федеральный университет; e-mail: oiilin@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. «Е»; тел.: 88634371611; к.т.н.; доцент.

Il'in Oleg Igorevich – Southern Federal University; e-mail: oiilin@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, bild. "E", Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; associate professor.