УДК: 538.911

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-57-67

НОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СИЛОКСАНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Мащенко В. И.¹, Константинов М. С.¹, Цебрук И. С.¹,
Чаусова О. В.², Беляев В. В.¹**

¹ Московский государственный областной университет

141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

² Технологический университет

141070 Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42, Российская Федерация

Аннотация. Целью данной работы являются разработка способа получения длинных агрегатов (более 1 см) многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), диспергированных в растворителе при помощи направленной агломерации электрической дугой в жидкой фазе, а также исследование процессов, сопровождающих формирование данных агрегатов. Был получен углеродный агломерат, ориентированный по полю и установлено, что в такой системе образуются слюдopodobные структуры с включениями аморфного углерода и агломератов нанотрубок. Методом перколяции установлено условие сшивания МУНТ в агломерат при разных значениях напряжения, определено, что при малых концентрациях вероятность сшивания частиц составляла не более 5%. Полученные результаты могут представлять практический интерес для предприятий энергетической промышленности при производстве современных типов электрооборудования.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки; дуговой разряд, агломерат, фрактальный анализ.

NEW ELECTRICALLY CONDUCTIVE NANOCOMPOSITES BASED ON SILOXANE MATERIALS

V. Mashchenko¹, M. Konstantinov¹, I. Cebрук¹, O. Chausova², V. Belyaev¹

¹ Moscow Region State University

ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation

² University of Technology

ul. Gagarina 42, 141070 Korolev, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. We report the development of a method for producing long aggregates (more than 1 cm) of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) dispersed in a solvent by means of directed agglomeration with an electric arc in the liquid phase, as well as study the processes accompanying the formation of these aggregates. A field-oriented carbon agglomerate is obtained and it is found that mica with inclusions of amorphous carbon and agglomerates of nanotubes are formed in such a system. By percolation, the condition of MWCNT crosslinking into the agglomerate at different stress values is established; it is determined that at low

concentrations the probability of particle crosslinking is no more than 5%. The obtained results may be of practical interest for the enterprises of power industry in the production of modern types of electrical equipment.

Keywords: multi-walled carbon nanotubes, arc discharge, agglomerate, fractal analysis.

Введение

Углеродные нанотрубки с момента их открытия Сумио Ииджимой [1] в 1991 г. привлекают большое внимание исследователей благодаря их уникальным физическим и механическим свойствам. Для синтеза нанотрубок традиционно используют такие методы, как дуговой разряд в инертном газе [1; 2] или в атмосфере водорода [3], лазерная абляция [4; 5], каталитический пиролиз углеводородов [6–8] на железе, никеле или кобальте. Как правило, процессы ориентации молекул под действием внешних полей [9–11] в сложно структурированных структурах [12] кардинально влияют на физические свойства всей системы. Традиционный дуговой разряд требует сложной вакуумной системы и системы теплосъёма.

Дуговой разряд в жидких средах является сравнительно новым методом синтеза нанотрубок [13–17]. Для этого используется источник постоянного тока и сосуд, наполненный жидким азотом, деионизированной водой или солевым водным раствором. Этот метод не требует вакуумного оборудования, реакционных газов, высоких температур и системы теплообмена. Впервые многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) таким способом были получены в жидком азоте [13]. В работе [16] получены МУНТ в растворе NaCl. За счёт высокой проводимости солевого раствора удалось длительно поддерживать стабильную дугу при токе 50 А и напряжении 26 В.

Дуговой разряд в жидкой фазе используется также для химической модификации углеродных нанотрубок [18].

Целью данной работы являются разработка способа получения длинных агрегатов (более 1 см) МУНТ, диспергированных в растворителе при помощи направленной агломерации электрической дугой в жидкой фазе, а также исследование процессов, сопровождающих формирование данных агрегатов.

Такие материалы могут быть использованы при проектировании современных систем отображения информации [19; 20].

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов использована стеклянная ячейка специальной конструкции с впаянным конденсатором (рис. 1), подключенная к генератору высокого напряжения. В качестве обкладок использовали стальные электроды.

В качестве растворителя использована непроводящая жидкая органическая среда – негорючее силиконовое масло с высокой вязкостью.

В работе использовали МУНТ Baytubes® C 150 P (Bayer) (рис. 2). Их предварительно диспергировали в растворителе с использованием ультразвука (рис. 3) на ультразвуковой ванне «Сапфир» с частотой 35 кГц.

Рис. 1 Схема установки.

Растворитель подбирали таким образом, чтобы он не смешивался с силиконовым маслом.

Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки образцов МУНТ (а, б, в, г: длина шкалы соответственно 300, 10, 3, 1 мкм).

Сшивание МУНТ проводили при помощи высоковольтного (15 кВ) дугового разряда.

Микроскопические снимки сделаны с использованием цифрового поляризационного микроскопа – Альтами Полар 3.

Электронно-микроскопические снимки получены с помощью электронной сканирующей микроскопии (прибор CamScan-S2).

Рис. 3. Микроскопические снимки образцов МУНТ в растворителе после обработки ультразвуком (а, б, в, г, д.: длина шкалы соответственно 500, 200, 100, 20, 10 мкм).

Обсуждение результатов

Из представленных электронно-микроскопических снимков (рис. 2) видно, что исходные МУНТ представляют собой объёмные агломераты нанотрубок размером 300–600 мкм, состоящие из спутанных протяжённых волокнообразных наночастиц толщиной около 0,05 мкм.

При дроблении взвеси данных агломератов нанотрубок в ультразвуке эти клубки разбиваются на более мелкие агломераты. На рис. 3а–г видно, что МУНТ после обработки самопроизвольно образуют вытянутые легко разрушающиеся от механического воздействия агрегаты шириной около 10 мкм и длиной до 100 мкм. Эти агрегаты в свою очередь образуются из более мелких агломерированных частиц размером менее 1 мкм. Их можно обнаружить: они видны в виде точек, из которых состоят удлинённые объекты (рис. 3г).

При попадании капли дисперсии с нанотрубками в электрическое поле последовательно происходят следующие процессы (см. рис. 4).

- Капля растягивается от одной пластины до другой (рис. 4.1–4.6).
- Наступает момент полного вытягивания, когда агломераты нанотрубок выстраиваются в проводящую цепочку от одной пластины до другой.
- Происходит пробой по образовавшейся нити из агломератов нанотрубок (рис. 4.6–4.8).
- За счёт протекания тока высокой силы происходит короткое замыкание, сопровождаемое:
 - образованием дуги (рис. 4.6–4.11);
 - яркой вспышкой и хрустящим звуком разряда (рис. 4.9);
 - резким повышением температуры;
 - разложением окружающих дугу веществ (растворитель, нанотрубки, силикон) со выделением газов (продукты разложения, газообразный растворитель) и образованием слоёподобных слоёв и обуглившихся включений;

– разложением силикона (По-видимому, происходит с образованием различных полупродуктов и выделением диоксида кремния SiO_2 и аморфного углерода. Можно предположить, что в таких условиях образуется целый ряд газообразных продуктов, таких как вода, водород, кислород, углекислый и угарный газы);

– микровзрывом вследствие мгновенного выделения газообразных продуктов, сопровождаемым образованием «гриба», содержащего газообразные вещества (рис. 4.8–4.11).

• Через образовавшуюся дугу начинает течь ток. Так как измеренное сопротивление дуги составляет около 700 Ом, течение тока сопровождается разогреванием и свечением дуги жёлтым цветом, а также продолжающимся разложением веществ с выделением газообразных продуктов (рис. 4.11).

Образовавшаяся дуга (рис. 4.12) является довольно хрупкой, при раздавливании издаёт характерный хруст подобно хрусту раздавливаемого битого стекла, что, по-видимому, указывает на её слюдоподобную структуру.

Рис. 4. Покадровая съёмка процесса формирования агломерата из нанотрубок.

Цвет образовавшихся пластин – от жёлто-коричневого до тёмно-коричневого с чёрными вкраплениями. По-видимому, пластины представляют собой слюду с включениями аморфного углерода и агломератов нанотрубок (рис. 5).

Исходя из изложенного и анализа микрофотографий дуги (рис. 5), можно предположить, что структура получаемой дуги представляет собой покрытые слоями слюды ветви из агломератов МУНТ. Прочность связи между агломератами нанотрубок представляет особый интерес для дальнейшего исследования.

Была проведена серия экспериментов по определению вероятности сшивания МУНТ при различной концентрации в капле. В камеру с электрическим полем помещались капли при постоянной концентрации углеродных нанотрубок и фиксировалась вероятность сшивания. Число испытаний при каждой концентрации составляло 150 измерений при напряжении поля 5 кВ и 10 кВ.

Рис. 5. Фотография и микрофотографии с разным увеличением полученного агломерата.

В первом приближении распределение МУНТ в пространстве можно описать решёточной моделью (рис. 6а). Пространство между электродами разбивалось на сектора размером, сравнимым с размерами МУНТ ~ 10 мкм. Заполнение с вероятностью иметь пустой узел решётки, равной $P = 0,15$, показано на рис. 5, при этом при повторении экспериментов всегда получались новые конфигурации агломератов. Перколяционные агломераты [21], простирающиеся по всей решётке, начинают возникать при $P \approx 0,59$.

Результаты протекания процесса показаны на рисунке 6б. При малых концентрациях вероятность P_N сшивания частиц составляла не более 5%. При повышении концентрации МУНТ вероятность сшивания растёт нелинейно и резко возрастает при $P \approx 0,59$.

Перколяционная кривая рассматриваемого процесса свидетельствует о фрактальной природе вероятности сшивания МУНТ.

Рис. 6. а) Квадратная решётка, частично заполненная МУНТ. б) Вероятность P_N сшивания агломерата как функция вероятности P того, что узел не заполнен.

Выводы

В жидкой органической среде проведены исследования сшивания МУНТ при помощи высоковольтного (15 кВ) дугового разряда. Был получен углеродный агломерат, ориентированный по полю и исследована его структура методами электронной и оптической микроскопии.

Исследована фрактальная природа вероятности сшивания МУНТ высоковольтным дуговым разрядом от концентрации углеродных трубок, установлен перколяционный порог протекания процесса.

Предполагается, что полученные результаты могут представлять практический интерес для модификации нанотрубок, получения волокон, а также новых источников светового излучения.

Статья поступила в редакцию 10.01.2019 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантами РФФИ № 18-29-18095мк, 19-07-01005 А.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant Nos. 18-29-18095mk and 19-07-01005 A).

ЛИТЕРАТУРА

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. Vol. 354. Iss. 6348. P. 56–58.
2. Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique / Journet C., Maser W. K., Bernier P., Loiseau A., Lamy de la Chapelle M., Lefrant S., et al. // Nature. 1997. Vol. 388. Iss. 6644. P. 756–758.
3. Morphology of carbon allotropes prepared by hydrogen arc discharge / Zhao X., Ohkohchi M., Shimoyama H., Ando Y. // Journal of Crystal Growth. 1999. Vol. 198–199. Part 2. P. 934–938.
4. Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes: process, product, and character-

- ization / Rinzler A. G., Liu J., Dai H., Nikolaev P., Huffman C. B., Rodriguez-Macias F. J., et al. // *Applied Physics A*. 1998. Vol. 67. Iss. 1. P. 29–37.
5. The effect of laser power on the formation of carbon nanotubes prepared in CO₂ continuous wave laser ablation at room temperature / Zhang H., Ding Y., Wu C., Chen Y., Zhu Y., et al. // *Physica B: Condensed Matter*. 2003. Vol. 325. P. 224–229.
 6. Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide / Nikolaev P., Bronikowski M. J., Bradley R. K., Rohmund F., Colbert D. T., Smith K. A., et al. // *Chemical Physics Letters*. 1999. Vol. 313. Iss. 1–2. P. 91–97.
 7. Large scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons / Cheng H. M., Li F., Su G., Pan H. Y., He L. L., Sun X., et al. // *Applied Physics Letters*. 1998. Vol. 72. Iss. 25. P. 3282–3284.
 8. Continuous production of aligned carbon nanotubes: a step closer to commercial realization / Andrews R., Jacques D., Rao A. M., Derbyshire F., Qian D., Fan X., et al. // *Chemical Physics Letters*. 1999. Vol. 303. Iss. 5–6. P. 467–474.
 9. Anchoring energy of liquid crystals / Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Belyaev V. V., Chausov D. N., Noah O. V., Chigrinov V. G. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2012. Vol. 560. P. 108–114.
 10. Моделирование ориентации молекул жидкокристаллического октилцианбифенила на поверхности кристаллов / Дадиванян А. К., Чаусов Д. Н., Пашинина Ю. М., Беляев В. В. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2010. № 4 (34). С. 61–69.
 11. Orientation of mesogen and hydrocarbon molecules on graphite and polyethylene crystal surfaces / Belyaev V. V., Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Chausov D. N., Solomatin A. S. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2011. Vol. 545. Iss. 1. P. 159–167.
 12. Nanomesh Aluminum Films for LC Alignment. Theoretical and Experimental Modeling / Dadivanyan A. K., Belyaev V. V., Chausov D. N., Stepanov A. A., Smirnov A. G., Tsybin A. G., Osipov M. A. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2015. Vol. 611. Iss. 1. P. 117–122.
 13. A simple method for the continuous production of carbon nanotubes / Ishigami M., Cumings J., Zettl A., Chen S. // *Chemical Physics Letters*. 2000. Vol. 319. Iss. 5–6. P. 457–459.
 14. Production and in-situ metal filling of carbon nanotubes in water / Hsin Y. L., Hwang K. C., Chen F.-R., Kai J.-J. // *Advanced Materials*. 2001. Vol. 13. Iss. 11. P. 830–833.
 15. Formation of carbon nanotubes in water by the electric-arc technique / Zhu H. W., Li X. S., Jiang B., Xu C. L., Zhu Y. F., Wu D. H., et al. // *Chemical Physics Letters*. 2002. Vol. 366. Iss. 5–6. P. 664–669.
 16. Behabtu N., Green M. J., Pasquali M. Carbon nanotube-based neat fibers // *Nanotoday*. 2008. Vol. 3. Iss. 5–6. P. 24–34.
 17. Debasis Bera. Arc-discharge in solution: a novel synthesis method for carbon nanotubes and in situ decoration of carbon nanotubes with nanoparticles: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Orlando, Florida, 2005. 155 p.
 18. Effect of Barrier Discharge on Homogeneous Dispersion of Carbon Nanotubes in Octylalcohols / Ishibashi Y., Hanaoka R., Osawa N., Takata S., Kanamaru Y., Anzai H. // *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 5. No. 1. P. 62–67.
 19. Программно-аппаратный комплекс оценки эффективности деятельности опе-

- раторов / Чаусов Д. Н., Петухов И. В., Беляев В. В., Богачев К. А., Курасов П. А. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2014. № 2. С. 80–86.
20. Петухов И.В., Чаусов Д. Н., Беляев В. В., Курасов П. А., Танрывердиев И. О. Зрительное утомление человека-оператора в процессе восприятия информации с электронных дисплеев // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2014. № 2. С. 87–94.
21. Feder J. *Fractals*. New York, London: Plenum Press, 1991. 254 p.

REFERENCES

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. In: *Nature*, 1991, vol. 354, iss. 6348, pp. 56–58.
2. Journet C., Maser W. K., Bernier P., Loiseau A., Lamy de la Chapelle M., Lefrant S., et al. Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique. In: *Nature*, 1997, vol. 388, iss. 6644, pp. 756–758.
3. Zhao X., Ohkohchi M., Shimoyama H., Ando Y. Morphology of carbon allotropes prepared by hydrogen arc discharge. In: *Journal of Crystal Growth*, 1999, vol. 198–199, part 2, pp. 934–938.
4. Rinzler A. G., Liu J., Dai H., Nikolaev P., Huffman C. B., Rodriguez-Macias F. J., et al. Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes: process, product, and characterization. In: *Applied Physics A*, 1998, vol. 67, iss. 1, pp. 29–37.
5. Zhang H., Ding Y., Wu C., Chen Y., Zhu Y., et al. The effect of laser power on the formation of carbon nanotubes prepared in CO₂ continuous wave laser ablation at room temperature. In: *Physica B: Condensed Matter*, 2003, vol. 325, pp. 224–229.
6. Nikolaev P., Bronikowski M. J., Bradley R. K., Rohmund F., Colbert D. T., Smith K. A., et al. Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide. In: *Chemical Physics Letters*, 1999, vol. 313, iss. 1–2, pp. 91–97.
7. Cheng H. M., Li F., Su G., Pan H. Y., He L. L., Sun X., et al. Large scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons. In: *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 72, iss. 25, pp. 3282–3284.
8. Andrews R., Jacques D., Rao A. M., Derbyshire F., Qian D., Fan X., et al. Continuous production of aligned carbon nanotubes: a step closer to commercial realization. In: *Chemical Physics Letters*, 1999, vol. 303, iss. 5–6, pp. 467–474.
9. Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Belyaev V. V., Chaurov D. N., Noah O. V., Chigrinov V. G. Anchoring energy of liquid crystals. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2012, vol. 560, pp. 108–114.
10. Dadivanyan A. K., Chaurov D. N., Pashinina Yu. M., Belyaev V. V. [Simulation of LC octylcyanobiphenyl molecules orientation on crystals surface]. In: *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application. Russian Journal], 2010, no. 4 (34), pp. 61–69.
11. Belyaev V. V., Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Chaurov D. N., Solomatin A. S. Orientation of mesogen and hydrocarbon molecules on graphite and polyethylene crystal surfaces. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2011, vol. 545, iss. 1, p. 159–167.
12. Dadivanyan A. K., Belyaev V. V., Chaurov D. N., Stepanov A. A., Smirnov A. G., Tsybin A. G., Osipov M. A. Nanomesh Aluminum Films for LC Alignment. Theoretical and Experimental Modeling. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, vol. 611, iss. 1, pp. 117–122.

13. Ishigami M., Cumings J., Zettl A., Chen S. A simple method for the continuous production of carbon nanotubes. In: *Chemical Physics Letters*, 2000, vol. 319, iss. 5–6, pp. 457–459.
14. Hsin Y. L., Hwang K. C., Chen F.-R., Kai J.-J. Production and *in-situ* metal filling of carbon nanotubes in water. In: *Advanced Materials*, 2001, vol. 13, iss. 11, pp. 830–833.
15. Zhu H. W., Li X. S., Jiang B., Xu C. L., Zhu Y. F., Wu D. H., et al. Formation of carbon nanotubes in water by the electric-arc technique. In: *Chemical Physics Letters*, 2002, vol. 366, iss. 5–6, pp. 664–669.
16. Behabtu N., Green M. J., Pasquali M. Carbon nanotube-based neat fibers. In: *Nanotoday*, 2008, vol. 3, iss. 5–6, pp. 24–34.
17. Debasis Bera. Arc-discharge in solution: a novel synthesis method for carbon nanotubes and in situ decoration of carbon nanotubes with nanoparticles: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Orlando, Florida, 2005. 155 p.
18. Ishibashi Y., Hanaoka R., Osawa N., Takata S., Kanamaru Y., Anzai H. Effect of barrier discharge on homogeneous dispersion of carbon nanotubes in octylalcohols. In: *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 62–67.
19. Chaurov D. N., Petukhov I. V., Belyaev V. V., Bogachev K. A., Kurasov P. A. [Hardware-software complex for evaluation of the operator's activity]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2014, no. 2, pp. 80–86.
20. Petukhov I. V., Chaurov D. N., Belyaev V. V., Kurasov P. A., Tanryverdiev I. O. [Visual fatigue of the human operator in the information perception from electronic displays]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2014, no. 2, pp. 87–94.
21. Feder J. *Fractals*. New York, London, Plenum Press Publ., 1991. 254 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мащенко Владимир Игоревич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;
e-mail: mashchenko@belozersky.msu.ru

Константинов Михаил Сергеевич – мастер производственного обучения учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;
e-mail: jawa-m.k@mail.ru

Цебрук Иван Сергеевич – студент физико-математического факультета Московского государственного областного университета;
e-mail: 19962015ivan@gmail.com

Чаусова Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и естественнонаучных дисциплин Технологического университета;
e-mail: Chaurova.ov@ut-mo.ru

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Московского государственного областного университета;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Mashchenko – PhD in Chemical Sciences, senior researcher of the Educational and Scientific Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;
e-mail: mashchenko@belozersky.msu.ru

Mihail S. Konstantinov – master of Industrial Training at the Educational and Scientific Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;
e-mail: jawa-m.k.s@mail.ru

Ivan S. Cebruk – student at Physical and Mathematical Faculty, Moscow Region State University;
e-mail: 19962015ivan@gmail.com

Olga V. Chausova – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Mathematics and Natural Sciences, Moscow Region State University;
e-mail: Chausova.ov@ut-mo.ru

Victor V. Belyaev – Doctor in Engineering Sciences, professor, Head of the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Машченко В. И., Константинов М. С., Цебрук И. С., Чаусова О. В., Беляев В. В. Новые электропроводящие нанокompозиты на основе силоксановых материалов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2019. № 1. С. 57–67.

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-57-67

FOR CITATION

Mashchenko V. I., Konstantinov M. S., Cebruk I. S., Chausova O. V., Belyaev V. V. New electrically conductive nanocomposites based on siloxane materials. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 1, pp. 57–67.

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-57-67.