

УДК 539.19:547

К. Л. Левин^{1,2}, С. Д. Ханин¹, В. Г. Соловьев¹, А. Б. Логинов^{3,5}, Б. А. Логинов^{4,5}¹Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного
Санкт-Петербург, Российская Федерация²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация³Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация⁴Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Российская Федерация⁵Образовательный центр «Сириус», Сочи, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ВОЛЬФРАМ-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАФЕНОВ В КАЧЕСТВЕ ЭКРАНОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

Исследованы многослойные графены в качестве экранов для защиты радиоаппаратуры от солнечного воздействия в открытом космосе. Для предохранения графеновой пленки от истирающих воздействий космического пространства нанесен на ее поверхность металлический вольфрам методом магнетронного напыления. Истирающие факторы промоделированы с помощью магнетронного травления. Анализ поверхности образцов до и после травления проведен методом атомно-силовой микроскопии. Установлено защитное действие вольфрама, предохраняющего графеновую пленку от истирания.

Ключевые слова: графены, вольфрам, термозмиссионное напыление, плазменное травление, солнечный ветер, атомно-силовая микроскопия, морфология поверхности.

Для цитирования: Левин К. Л., Ханин С. Д., Соловьев В. Г., Логинов А. Б., Логинов Б. А. Исследование применимости вольфрам-модифицированных графенов в качестве экранов солнечного излучения в открытом космосе // Техника радиосвязи. 2023. Выпуск 3 (58). С. 92–99.

K. L. Levin^{1,2}, S. D. Khanin¹, V. G. Soloviev¹, A. B. Loginov^{3,5}, B. A. Loginov^{4,5}¹Marshal Budyonny Military Signal Academy, Saint Petersburg, Russian Federation²Institute of Macromolecular Compounds RAS, Saint Petersburg, Russian Federation³Physical faculty of Lomonosov MSU, Moscow, Russian Federation⁴National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russian Federation⁵Educational Center “Sirius”, Sochi, Russian Federation

STUDYING WOLFRAM-MODIFIED GRAPHENES APPLICABILITY AS SOLAR RADIATION OUTER SPACE SHIELDS

Multilayer graphenes were studied as screens for protecting radio equipment from solar exposure in outer space. To protect the graphene film from the abrasive factors of outer space, metal tungsten was deposited on its surface by magnetron sputtering. Abrasive factors were modeled using magnetron etching. The surface of the samples before and after etching was analyzed by atomic force microscopy. It has been established that tungsten has a protective influence on graphene films, making them more resistive to abrasive factors of outer space.

Keywords: graphenes, tungsten, thermo-emission sputtering, plasma etching, solar wind, atomic force microscopy, surface morphology.

For citation: Levin K. L., Khanin S. D., Soloviev V. G., Loginov A. B., Loginov B. A. Studying wolfram-modified graphenes applicability as solar radiation outer space shields // Radio communication technology. 2023. Issue 3 (58), pp. 92–99.

Введение

В последние десятилетия в связи с активным освоением космического пространства возрос интерес к конструкционным материалам с экранирующими и отражающими свойствами, способным служить для защиты радиоаппаратуры от факторов открытого космоса и использовать их в качестве электропроводящего покрытия радиоантенн и отражателей солнечной энергии [1–4].

К таким материалам, несомненно, относится графен. К его преимуществам в качестве материала для защиты радиоэлектронной аппаратуры в условиях открытого космоса относится высокий коэффициент поглощения в области видимого света. Этот коэффициент k_1 для одного монослоя равен

$$k_1 = \pi \alpha \approx 2,3 \%, \quad (1)$$

где α – постоянная тонкой структуры (1/137) [5]. Можно задаться условным параметром поглощения экрана 99,99 %, при этом необходимое количество углеродных монослоев составит 400,45, то есть, округляя до целого, 400. При расстоянии между монослоями 0,335 нм [6] толщина такой пачки (stack) l_{st} будет равна 0,34 мкм или с учетом вероятной «волнистости» поверхности графена следует взять большую толщину: $\sqrt{2} l_{st} \approx 0,5$ мкм, или для двукратного запаса надёжности 1 мкм. Тогда масса одного квадратного метра экрана, исходя из плотности графена 2,27 г/см³, составит 2,3 г. При этом толщина аналогичного экрана из алюминия, имеющего на длине волны 555 нм коэффициент оптического поглощения $1,46 \cdot 10^6$ см⁻¹ [7, 8], составит 0,47 мм, а масса, соответственно, 1,27 кг, что, безусловно, заставляет делать выбор в пользу графена. Дополнительным достоинством графена является его высокая термостойкость: температура плавления 3650 °С, что превышает аналогичную температуру для вольфрама (3422 °С). Все это в сочетании с умеренной стоимостью позволяет ожидать значительного снижения массы космического летательного аппарата (ЛА) при использовании экранов с графеновым покрытием.

Вместе с тем, возникает вопрос о механической устойчивости графеновых пленок к истирающим факторам открытого космоса в районе низких орбит. К таким факторам можно отнести как истирающее воздействие протонно-гелиевой составляющей солнечного ветра (СВ), так и динамическое давление остаточной атмосферы на перпендикулярной к вектору скорости части ЛА. Нетрудно заметить, что величиной первого из этих давлений (2,7 нПа – по усреднённым значениям в районе околоземной орбиты) можно пренебречь по сравнению со второй, вызывающей значительный эффект при торможении низкоорбитальных спутников [9–11]. Действительно, используя модифицированную формулу для замедляющего (drag) ускорения $a_d = 1/2 \rho B v^2$, где ρ – плотность атмосферы на данной высоте, v – скорость ЛА, B – баллистический коэффициент (м²/кг), равный $B = C_d A_s / m_s$, здесь C_d – безразмерный коэффициент, учитывающий форму ЛА, A_s – эффективная площадь ЛА в направлении, перпендикулярном движению, m_s – масса ЛА [12], можно вычислить истирающее (erosive) давление $P_{atm\ er}$ на ортого-

нальную к движению ЛА площадку, приняв C_d равным единице: $P_{atm\ er}=1/2 \rho v^2$. Тогда для высоты 450 км это давление окажется равным 130 мПа.

Зададим критерий устойчивости графеновой пленки к истиранию. Будем считать, что экран теряет свою эффективность, когда рельеф его поверхности в результате воздействия истирающих факторов приобретает неровности, превышающие половину толщины, что в нашем случае составит 0,25 мкм.

В качестве имитации истирающего воздействия открытого космоса на графеновую пленку использовали плазменное травление, а в качестве параметра, соотносящего условия лабораторного эксперимента и условия открытого космоса, брали отношение динамического давления открытого космоса к давлению плазмы в установке плазменного травления. Предложенная нами ранее методика расчета параметров плазмы в камере плазменного травления, используя термодинамический подход, описана в [13, 14]. Согласно выбранным экспериментальным условиям, давление в камере плазменного травления составляло 0,10 мПа, то есть при заданных условиях эксперимент по имитации истирающего действия космоса оказался ускоренным в 1300 раз с точностью до некоторого коэффициента k_{sp} , учитывающего соотносимость давлений в экспериментальных и реальных условиях. Значение этого коэффициента предстоит выяснить в дальнейшем. Принимая значение k_{sp} за единицу, получаем, что 1 с травления соответствовала примерно 30 мин пребывания в открытом космосе. В качестве метода исследования рельефа использовали атомно-силовую микроскопию, а в качестве параметра оценки поверхности брали R_a – среднюю шероховатость, представляющую собой среднее отклонение от линии профиля, усредняемое между точек контроля. Было установлено, что данный параметр возрастал для графеновой пленки в процессе плазменного травления по зависимости $R_a = 15t + 15,2$. Таким образом, задаваясь $R_a = 500$ нм, получаем время травления 32 с, что соответствует 1 часу пребывания в открытом космосе, таким образом, с точки зрения введенного нами критерия графеновая пленка в незащищенном виде его не проходит.

Для защиты графеновой пленки от истирающего воздействия остаточной атмосферы на низких орбитах в данной статье предложено покрывать ее слоем металлического вольфрама (W), выбор которого обусловлен сочетанием его самой высокой среди металлов термостойкости [15] с исключительно высокой твердостью: по Моосу 8,5, что уступает только хрому. W также проявляет неплохие отражающие характеристики в ближнем инфракрасном диапазоне, отдавая приоритет алюминию и молибдену [16].

Поскольку толщина графеновой пачки крайне мала (5–10 углеродных монослоев), что делает невозможным манипуляции с ней отдельно от подложки, в данной статье изучали пленки многослойного графена (МСГ) толщиной порядка 50 мкм, обладающие достаточно высокими механическими характеристиками. Изменения поверхности образцов МСГ, модифицированного W изучали методом сканирующей зондовой микроскопии.

Целью данной работы являлось изучение возможности применения металлического W с целью защиты графеновой пленки, применяемой для защиты радиоаппаратуры от солнечного воздействия в открытом космосе, к истирающему воздействию факторов открытого космоса.

Материалы и методы

Образцы МСГ были приготовлены термомеханическим способом, аналогичным в [17–19]. Нанесение W вакуумно-термоэмиссионным методом выполняли на установке МАГ-5М. Производителем данной установки, а также остального оборудования, ис-

пользованного в данном эксперименте, являлся зеленоградский завод «Протон». Испарение производилось с нагреваемой до температуры 1550 °С проволоки диаметром 0,3 мм из W чистотой 99,995 % при давлении вакуума 0,002 мбар. Образец МСГ при этом был установлен на расстоянии 6 мм от W проволоки: на этом расстоянии, по калибровочным данным установки, скорость напыления при вышеуказанных параметрах проволоки составляла около 10 нм в секунду.

Толщину полученных пленок уточняли методом профилометрии прибором «Профилометр модели 130» на пленках, полученных в аналогичных условиях на стекле.

Плазменное травление выполняли на оборудовании МАГ-5. Использовали аргоновую плазму при давлении аргона 0,012 мбар, напряжённости поля в плазме 120 В/мм, плотности потока ионов 110 мА/см². Схемы установок напыления и травления представлены на Рис. 1.

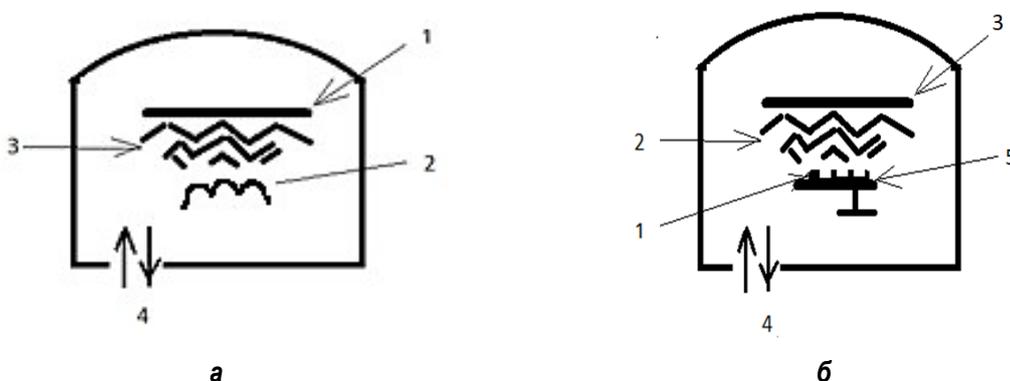


Рис. 1. Схемы установок:

а – МАГ-5М (1 – образец напыляемой поверхностью вниз; 2 – нагреваемая W проволока; 3 – облако атомов W; 4 – откачка и впуск газов)

б – МАГ-5 (1 – образец; 2 – аргоновая плазма; 3 – катод; 4 – откачка и впуск газов; 5 – анод)

Для исследований микрорельефа использовали сканирующий микроскоп СММ-2000. С целью изучения морфологии поверхности в обладающем максимальным разрешением режиме сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) применяли платиновые иглы, заострённые отрезанием ножницами с контролем одноострийности путём снятия кривой подвода: десятикратного увеличения тока на них достигали при изменении зазора на расстоянии не более 1 нм.

Эксперимент заключался в нанесении на пленку МСГ слоев W различной толщины, травлении в течение 20 с последующим измерением параметров шероховатости методом АСМ. Анализ морфологии производили программой микроскопа СММ-2000 в соответствии с международным стандартом ISO 1302. В качестве параметра, характеризующего шероховатость поверхности, выбран R_a – усредненное расстояние между поверхностью и линией профиля вдоль направления стана.

Результаты и обсуждение

АСМ сканы поверхности МСГ до и после воздействия плазмы в течение 20 с показаны на Рис. 2. АСМ поверхности W, нанесенного на стеклянную поверхность в аналогичных условиях, показаны на Рис. 4.

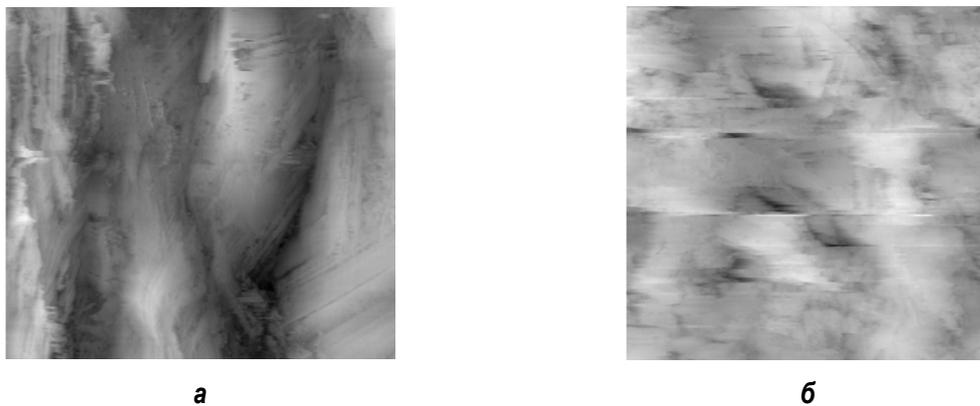


Рис. 2. Поверхность многослойного графена до воздействия (а) и после воздействия плазмой в течение 20 с (б)

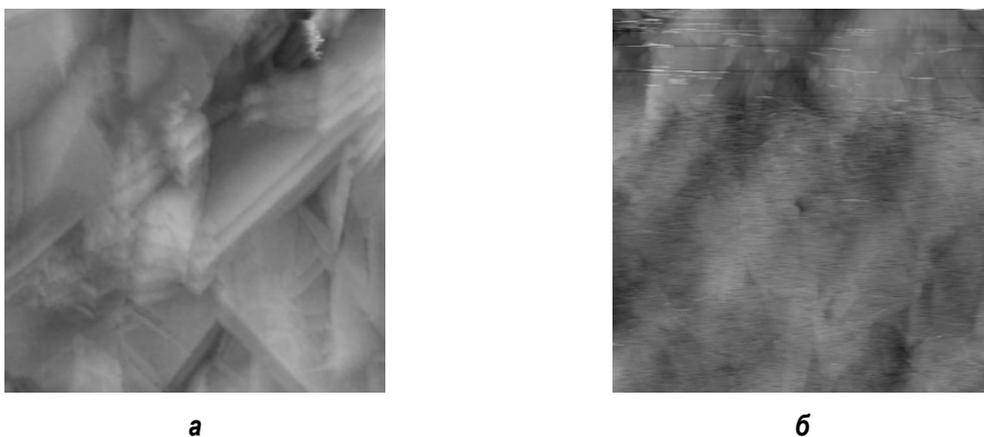


Рис. 3. Поверхность вольфрама до воздействия (а) и после воздействия плазмой в течение 20 с (б)

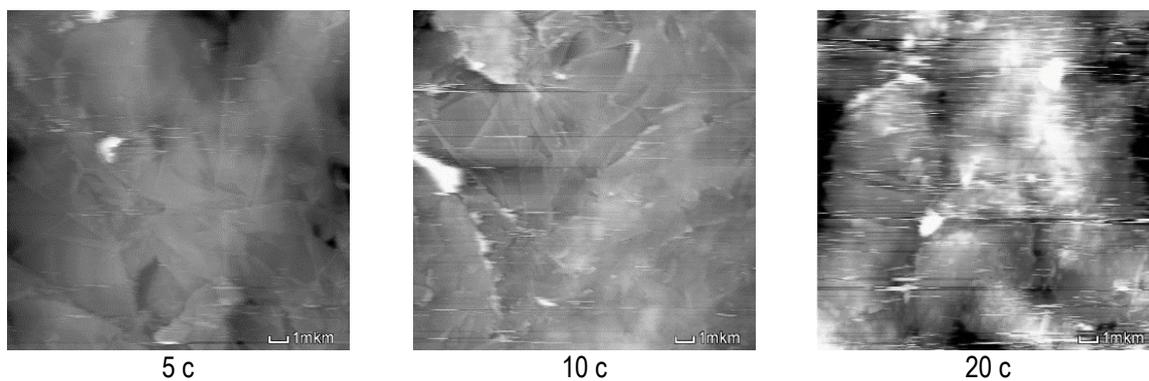


Рис. 4. Сканы поверхностей W-модифицированного МСГ при разном времени нанесения вольфрама и одинаковом времени воздействия плазмой 20 с

С целью установить защитное действие W на поверхность графена было произведено воздействие плазмы на поверхность МСГ пленок, покрытых слоем W различной толщины (рис. 4). Параметры установки нанесения W подобраны таким образом, что 1 с нанесения соответствовала росту пленки на 10 нм.

Данные по шероховатости (параметр R_a и среднеквадратическое отклонение $\Delta\overline{R}_a^2$) пленок МСГ/ W при различной толщине пленок W и одинаковом времени травления приведены в таблице. Данные усреднялись не менее чем по 5 образцам. В качестве контрольного образца использовали W пленку, не подвергнутую травлению, для которой $R_a \pm \Delta\overline{R}_a^2$ оказалось равным $62,1 \pm 30,4$ нм.

Как видно из таблицы, параметр шероховатости R_a в случае пленок МСГ/ W не претерпевал существенных изменений во время эксперимента, тогда как для незащищенного МСГ R_a в аналогичных условиях возрастал в 20 раз [11]. Так же данные таблицы свидетельствуют о существенном увеличении с ростом толщины слоя металла среднеквадратического отклонения $\Delta\overline{R}_a^2$: с 7,6 до 35,2 нм. Такое поведение $\Delta\overline{R}_a^2$ свидетельствует о возрастании с толщиной слоя W его неоднородности, не связанной, по видимому, с травлением.

Зависимость шероховатости R_a пленок МСГ/ W от толщины слоя W при времени травления 20 с

<i>Время напыления, с</i>	5	10	20
<i>Толщина W, нм</i>	50	100	200
<i>R_a, нм</i>	76,07	66,54	80,12
<i>Среднеквадратическое отклонение, нм</i>	7,6	14,6	35,3

Таким образом установлено, что в результате нанесения слоя металлического вольфрама, толщина которого составляла от 50 до 200 нм, достигнута защита графеновой пленки от истирания, способного в условиях космического пространства существенно ограничивать применение графеновых покрытий в качестве экранирующих.

Заключение

С целью повышения устойчивости графена, предназначенного для защиты радиоаппаратуры от факторов космического воздействия в условиях открытого космоса, поверхность пленок многослойного графена толщиной 50 мкм покрывали слоем металлического вольфрама толщиной 50–200 нм. В результате сравнительного анализа морфологии пленок в отсутствие и с вольфрамовым покрытием установлено защитное действие вольфрама: после плазменного травления, имитирующего истирающее воздействие открытого космоса, параметр шероховатости R_a поверхности образцов практически не менялся для пленок, защищенных вольфрамом, тогда как для незащищенных пленок он возрастал в 20 раз. Полученные результаты могут быть полезны при создании экранов защиты от солнечного воздействия для радиоаппаратуры в условиях открытого космоса.

Благодарности

Доктору Ирине Евгеньевне Скалецкой за помощь в эксперименте и плодотворном обсуждении результатов, доктору Роджерии Джеламо (Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, UFTM, Uberaba, Brazil) за любезно предоставленные образцы многослойных графеновых пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Heilbronn L.* Shielding Against Galactic and Solar Radiation in Space / editor(s): Ehud Greenspan : Encyclopedia of Nuclear Energy, Elsevier, 2021. P. 914–922. ISBN 9780128197325, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819725-7.00021-0>.
2. *Kaçal M. R., Dilsiz K., Akman F., Polat H.* Analysis of radiation attenuation properties for Polyester/Li₂WO₄ composites // Radiation Physics and Chemistry. 2021, Vol. 179, 109257, ISSN 0969-806X, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109257>.
3. *Gatte M. T., Soh P. J., Kadhim R. A., Haider J. A., R. Badlishah Ahmad.* Modeling and performance evaluation of antennas coated using monolayer graphene in the millimeter and sub-millimeter wave bands // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 34, Iss. 5, e2929.
4. *Kaufman R.* Could Space Mirrors Stop Global Warming? // Live Science. URL: <https://www.livescience.com/22202-space-mirrors-global-warming.html> (дата обращения: 08.11.2019).
5. *Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Strauber T., Oeres N. M. R., Geim A. K.* Fine structure constant defines visual transparency of graphene // Science. 2008. Vol. 320, iss. 5881, p. 1308.
6. *Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K.* Adsorption by Powders and Porous Solids // Principles, Methodology and Applications. Elsevier, 1999, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-598920-6.X5000-3>.
7. URL: <https://refractiveindex.info/?group> (дата обращения: 01.06.23).
8. *Dresselhaus M. S.* Solid State Physics. Part II: Optical Properties of Solids, MIT Solid State Physics Course, 2001.
9. *Nwankwo V. U. J., Denig W., Chakrabarti S. K., Ajakaiye M.P., Fatokun J., Akanni A. W., Raulin J.-P., Correia E., Enoh J. E., and P. I. Anekwe.* Atmospheric drag effects on modelled low Earth orbit (LEO) satellites during the July 2000 Bastille Day event in contrast to an interval of geomagnetically quiet conditions // Ann. Geophys., 39, 397–412, <https://doi.org/10.5194/angeo-39-397-2021>, 2021.
10. *Pudovkin M. I.* // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100, no. A5. P. 7917.
11. *Pudovkin M. I.* // Rept. Progr. in Phys. 1995. Vol. 58, no. 9. P. 929.
12. *King-Hele D.* Satellite Orbits in an Atmosphere: Theory and Applications. Kluwer Academic Publisher Group, the Netherlands, 1987.
13. *Левин К. Л., Беспалова Е. А., Ванькаев А. С., Клюкина Е. В., Лопатин А. В., Метальников Н. М., Сапрыкин М. Э., Логинов А. Б., Оразов И. В., Логинов Б. А.* Изучение изменения морфологии поверхности многослойных графеновых структур при воздействии плазмой в качестве модели солнечного ветра в открытом космосе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021, № 9. С. 51–55.
14. *Levine K. L., Khanin S. D., Bepalova E. A., Vankaev A. S., Klyukina E. V., Lopatin A. V., Metalnikov N. M., Saprykin M. E., Loginov A. B., Orazov I. V., Loginov B. A.* Studying wearing resistance of graphene-based materials for the project of the first in the world probe microscope – Earth satellite by solar wind plasma emulation // Journal of Physics : Conference Series. 2022, p. 012001.
15. Tungsten: physical properties (англ.). // WebElements. URL: <https://www.webelements.com/tungsten/physics.html> (дата обращения: 17.08.13).
16. *Sárosi Z., Knapp W., Kunz A., Wegener K.* Evaluation of reflectivity of metal parts by a thermo-camera. URL: <https://www.researchgate.net/publication/236582531> (дата обращения: 13.03.03).
17. *Nguyen V. T., Le H. D., Nguyen V. C., Thanh T., Ngo T., Le D. Q., Nguyen X. N., and Phan N. M.* // Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. 4, 035012 (2013).
18. *Park H. J., Ahn B. W., Kim T. Y., Lee J. W., Choi Y. S., Song Y., and Suh S. J.* // Thin Solid Films, 587, 8–13 (2015).
19. *Khare R. T., Gelamo R. V., More M. A.* Enhanced field emission of plasma treated multi-layer graphene // Appl. Phys. Lett. 2015, 123503.

Сведения об авторах

Левин Кирилл Львович, канд. хим. наук, доцент Института высокомолекулярных соединений РАН, e-mail: levinkl@hotmail.com.

Ханин Самуил Давидович, канд. физ.-мат. наук, профессор, Военная академия связи имени маршала Советского Союза С.М. Буденного, e-mail: sinklit@mail.ru.

Соловьев Владимир Гаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Военная академия связи имени маршала Советского Союза С.М. Буденного.

Логинов Артем Борисович, студент МГУ им. М.В. Ломоносова, Образовательный центр «Сириус», e-mail: loginov.ab15@physics.msu.ru.

Логинов Борис Альбертович, руководитель лаборатории Национального исследовательского университета «МИЭТ», Образовательный центр «Сириус», e-mail: b-loginov@mail.ru.

Поступила в редакцию: 16.04.2023

Одобрена рецензентом: 13.06.2023

Принята в печать: 24.08.2023