УДК 621.793 + 535.544

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-53-64

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЁННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Николаева Д. В.¹, Генералов Д. В.¹, Паршин Б. А.², Макеев М. О.^{1,2}

¹ Российский университет дружбы народов

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Российская Федерация

Аннотация.

Цель исследования – определение толщин и оптических констант углеродных алмазоподобных покрытий, нанесённых методом импульсного лазерного осаждения, для выработки рекомендаций по технологическим режимам нанесения данных покрытий на медные и алюминиевые зеркала.

Процедура и методы. Для определения толщин и оптических констант углеродных алмазоподобных покрытий применяется метод ИК-спектроскопической эллипсометрии.

Результаты. Определены толщины и оптические константы углеродных алмазоподобных покрытий, нанесённых на образцы медных и алюминиевых зеркал методом импульсного лазерного осаждения.

Теоретическая и практическая значимость. Определены оптимальные с точки зрения оптических характеристик технологические режимы нанесения алмазоподобных покрытий методом импульсного лазерного осаждения на медные и алюминиевые подложки.

Ключевые слова: углеродное алмазоподобное покрытие, эллипсометрия, упрочнение, оптические элементы, факторы космического пространства, технологические режимы, импульсное лазерное осаждение

INVESTIGATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF CARBON DIAMOND-LIKE COATINGS APPLIED BY PULSED LASER DEPOSITION

D. Nikolaeva¹, D. Generalov¹, B. Parshin², M. Makeev^{1,2}

¹ Peoples' Friendship University of Russia

6 ulitsa Miklukho-Maklaya, Moscow 117198, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University

5 build. 1 ulitsa 2-ya Baumanskaya, Moscow 105005, Russian Federation

Abstract.

Aim: determination of the thickness and optical constants of carbon diamond-like coatings applied by pulsed laser deposition to develop recommendations for technological modes of applying these coatings to copper and aluminum mirrors.

Methodology. The infrared spectroscopic ellipsometry method is used to determine the thickness and optical constants of carbon diamond-like coatings.

Results. The thicknesses and optical constants of carbon diamond-like coatings applied to samples of copper and aluminum mirrors by pulsed laser deposition were determined.

Research implications. The optimal technological modes for applying diamond-like coatings by pulsed laser deposition to copper and aluminum substrates are determined from the point of view of optical characteristics.

Keywords: carbon diamond-like coating, ellipsometry, reinforcing, optical elements, space factors, technological modes, pulsed laser deposition

Введение

Воздействие различных внешних факторов на оптические элементы может приводить к деградации поверхностных слоёв и, соответственно, ухудшению оптических свойств элементов. Такими факторами могут быть факторы космического пространства (электроны, протоны, солнечная радиация и пр.) при размещении оптических элементов в условиях космоса, так и просто сложные погодные условия (песок, дождь и пр.).

Для защиты оптических элементов от данных вредных факторов применяются различные защитные покрытия. При этом крайне желательно, чтобы защитные покрытия не ухудшали оптические характеристики функциональных элементов, на которые они наносятся (линзы, зеркала и пр.). В качестве таких покрытий перспективным является применение углеродных алмазоподобных покрытий, обладающих рядом уникальных свойств. К этим свойствам относятся высокая износостойчивость и твёрдость, низкий коэффициент трения, прозрачность в инфракрасном диапазоне спектра, а также биосовместимость и др. [1–7].

В данной работе методом ИК-спектроскопической эллипсометрии проведено исследование углеродных алмазоподобных покрытий, нанесённых методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО) для улучшения прочностных характеристик оптических зеркал. Метод ИК-спектроскопической эллипсометрии широко используется для определения толщин и оптических свойств тонких плёнок [8–14].

Методика эксперимента

Объектами исследований являлись две серии образцов зеркал диаметром 20 мм. В качестве подложки использовались плоскопараллельные пластины из К8 толщиной 5 мм. Методом магнетронного напыления на образцы первой серии был нанесён слой Cu толщиной 500 нм, а методом ионного распыления на образцы второй серии – слой Al толщиной 300 нм. Далее наносилось алмазоподобное покрытие методом импульсного лазерного осаждения.

Метод импульсного лазерного осаждения является уникальным технологическим процессом, который позволяет нанести на поверхность материалы, обладающие специальными свойствами, в данном случае – углеродное алмазоподобное покрытие. Использование данного метода помогает добиться повышения поверхностной прочности, снижения трения, коррозионной устойчивости и др. Метод импульсного лазерного осаждения обладает рядом особенностей [15]:

- мощный лазерный импульс воздействует на вещество, и при данном воздействии тонкий слой вещества мишени почти мгновенно испаряется, а стехиометрия испаренного вещества будет соответствовать стехиометрии исходной мишени, что особенно важно для получения плёнок из многокомпонентных материалов;

- процесс осаждения плёнок может быть произведён в большом диапазоне давлений фонового газа, что позволяет получать плёнки из материалов, имеющих высокое давление насыщенных паров некоторых элементов из их состава;

- данный метод позволяет получать плёнки из материалов с разными свойствами и не требует конструкционных изменений в напылительном оборудовании.

На рис. 1 представлена схема импульсного лазерного осаждения.

Рис. 1. / Fig. 1. Схема импульсного лазерного осаждения. /
Schematic of pulsed laser deposition.

Источник: [7] / Source: [7].

Согласно схеме на рис. 1 на образцы наносилось алмазоподобное покрытие. В табл. 1 приведены технологические режимы изготовления образцов.

Таблица 1 / Table 1

Технологические режимы изготовления образцов / Technological modes of manufacturing samples

Материал подложки	Образец	Описание покрытия	Кол-во импульсов	Энергия импульса, мДж	Расстояние между подложкой и мишенью, мм	Температура подложки, °C
Cu	Cu-1	DLC	3000	71	70	300
Cu	Cu-2	DLC	3000	138	70	175
Cu	Cu-3	DLC	3000	139	70	300
Al	Al-1	Титан	30000	130	70	25
		DLC	6000			
Al	Al-2	DLC	10000	120	110	25
Al	Al-3	DLC	3500	121	110	25

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Толщина наносимого защитного покрытия определялась методом ИК-спектроскопической эллипсометрии. Данный метод основан на определении изменения поляризации световой волны при взаимодействии с образцом, что описывает основное уравнение эллипсометрии [16]:

$$\frac{R_p}{R_s} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}, \quad (1)$$

где Ψ и Δ – эллипсометрические параметры, i – мнимое число.

Три основные категории задач, которые могут быть решены благодаря использованию эллипсометрического метода, показаны на рис. 2.

Таким образом, из рис. 2 видно, что применение метода ИК-спектроскопической эллипсометрии предоставляет возможность определить оптические свойства и толщину тонких плёнок [17]. Измерения были проведены на ИК-спектральном эллипсометре IR-VASE.

Рис. 2. / Fig. 2. Основные задачи, решаемые методом эллипсометрии. / The main tasks solved by the ellipsometry method.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Основные технические характеристики данного прибора представлены на рис. 3.

Рис. 3. / Fig. 3. Технические характеристики эллипсометра IR-VASE. /
Technical characteristics of the IR-VASE ellipsometer.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Для построения эллипсометрических моделей была использована программная среда WVASE32 [18]. При помощи данной программы проводится обработка измерений эллипсометра IR-VASE.

Для исследования слоёв Cu и DLC была использована оптическая модель Друде, а для слоя Al – модель Друде и модель Лоренца.

При помощи модели Друде могут быть описаны эффект Холла, удельная проводимость, теплопроводность металлов и др. Следующая формула определяет величину электропроводности в соответствии с моделью Друде [18]:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{e^2 n_v \tau}{m_e}, \quad (2)$$

где m_e – масса свободного электрона ($m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ кг), τ – время релаксации, n_v – концентрация электронов в единице объёма.

Для того, чтобы описать электронные, молекулярные и другие колебания в материале применяется осциллятор Лоренца, определяемый по следующей формуле [19]:

$$\varepsilon(h\nu) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 = \varepsilon_{1\infty} + \sum_k \frac{A_k B_k E_k}{E_k^2 - (h\nu)^2 - iB_k \times h\nu}, \quad (3)$$

где A_k – амплитуда k -го осциллятора, является безразмерной величиной, B_k – ширина k -го осциллятора (см^{-1}), E_k – центральная энергия (см^{-1}).

Методика исследования методом эллипсометрии включала в себя 5 этапов. На первом этапе были определены экспериментальные данные. Произвели измерения исходных образцов. При помощи эллипсометра IR-VASE были получены эллипсометрические параметры Ψ и Δ . Второй этап включал в себя построение эллипсометрической модели исходных образцов, определение оптических констант слоёв и структуру модели. На следующем этапе было произведено измерение образцов с нанесённым алмазоподобным покрытием. Определены Ψ и Δ на базе эллипсометрических моделей. Четвёртый этап – корректировка, где было произведено сравнение данных на базе модели с экспериментальными данными, а также последовательно уточнялись параметры модели. Заключительный пятый этап подразумевал анализ полученных результатов. Определены толщины слоёв и их оптические константы.

Результаты измерений

Для всех образцов методом ИК-спектральной эллипсометрии были получены экспериментальные спектры эллипсометрических параметров Ψ и Δ . Также на основе проведённых измерений и анализе литературных данных разработаны оптические модели слоёв алюминия, меди и защитного DLC покрытия, с использованием которых затем были построены эллипсометрические модели всех образцов. На рис. 4 и рис. 5 представлены примеры разработанных моделей для образцов Al-1 и Cu-2.

Рис. 4. / Fig. 4. Спектры эллипсометрических параметров Ψ (a) и Δ (b), оптические константы n и k (c) образца Al-1. / Spectra of ellipsometric parameters Ψ (a) and Δ (b), optical constants n and k (c) of sample Al-1.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

На основе моделей были определены толщины наносимых алмазоподобных покрытий, а также усреднённые значения (в диапазоне длин волн от 2 до 33 мкм) показателей преломления n и поглощения k . Полученные результаты приведены в табл. 2.

Рис. 5. / Fig. 5. Спектры эллипсометрических параметров $\Psi(a)$ и $\Delta(b)$, оптические константы n и $k(c)$ образца Cu-2. / Spectra of ellipsometric parameters $\Psi(a)$ and $\Delta(b)$, optical constants n and $k(c)$ of the Cu-2 sample.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Таблица 2 / Table 2

Полученные результаты / Results

Образец	Толщина DLC покрытия, нм	Усреднённое значение показателя преломления (n)	Усреднённое значение показателя поглощения (k)
Cu-1	$6,2 \pm 0,2$	3,17	0,84
Cu-2	$10,4 \pm 0,4$	3,29	1,21
Cu-3	$11,4 \pm 0,4$	6,76	1,71
Al-1	$56,5 \pm 0,5$	2,18	1,72
Al-2	$29,4 \pm 0,4$	2,74	12,12
Al-3	$46,0 \pm 0,1$	1,14	8,72

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Покрyтия для зеркал с точки зрения оптических характеристик должны обладать минимальными значениями показателя поглощения и невысокими значениями показателя преломления. Этим критериям удовлетворяют алмазоподобные покрyтия, нанесённые на образцы Cu-1, Cu-2 и Al-1. Для их изготовления были использованы следующие технологические режимы:

- для Cu-1 – 3000 импульсов, энергия импульса 71 мДж, температура подложки 300 °C;

- для Cu-2 – 3000 импульсов, энергия импульса 138 мДж, температура подложки 175 °С;
- для Al-1 – 6000 импульсов, энергия импульса 130 мДж, температура подложки 25 °С.

Заключение

В ходе данной работы методом ИК-спектроскопической эллипсометрии было проведено исследование углеродных алмазоподобных покрытий, нанесённых методом ИЛО для улучшения прочностных характеристик Cu и Al зеркал. В результате были определены толщины и оптические константы DLC-покрытий. С точки зрения оптических характеристик более предпочтительными являются покрытия, нанесённые на образцы Cu-1, Cu-2 и Al-1. Данные DLC-покрытия обладают наименьшими значениями показателя поглощения, что объясняется, по-видимому, меньшим количеством sp^2 связей и, соответственно, меньшей концентрацией свободных электронов. Поэтому в дальнейшем планируется проведение исследований химического состава и структуры DLC-покрытий. В частности, степень алмазоподобия (соотношение sp^3 и sp^2 фаз) может быть определена методом спектроскопии комбинационного рассеяния.

Также следует учитывать, что в зависимости от условий эксплуатации оптических элементов будут важны их прочностные и стойкостные характеристики, такие, как твёрдость, модуль Юнга, износостойкость, стойкость к воздействию ионизирующих излучений и др. Поэтому окончательный выбор оптимальных технологических режимов нанесения алмазоподобных покрытий методом импульсного лазерного осаждения будет проводиться с учётом большего числа характеристик.

Статья поступила в редакцию 07.07.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // Materials science and engineering: R: Reports. 2002. Vol. 37. Iss. 4–6. P. 129–281. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
2. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – from first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 242. P. 214–225. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031.
3. Grill A. Diamond-like carbon coatings as biocompatible materials – an overview // Diamond and related materials. 2003. Vol. 12. Iss. 2. P. 166–170. DOI: 10.1016/S0925-9635(03)00018-9.
4. Hauert R. DLC films in biomedical applications // Tribology of Diamond-Like Carbon Films. Boston, MA: Springer, 2008. P. 494–509. DOI: 10.1007/978-0-387-49891-1_20.
5. Protective diamond-like carbon coatings for future optical storage disks / Piazza F., Grambole D., Schneider D., Casiraghi C., Ferrari A. C., Robertson J. // Diamond and Related Materials. 2005. Vol. 14. Iss. 3–7. P. 994–999. DOI: 10.1016/j.diamond.2004.12.028.
6. Diamond-like carbon protective anti-reflection coating for Si solar cell / Choi W. S., Kim K., Yi J., Hong B. // Materials Letters. 2008. Vol. 62. Iss. 4–5. P. 577–580. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.06.019.
7. Упрочнение зеркальной поверхности за счет нанесения углеродной наноструктуры / Батшев В. И., Козлов А. Б., Мачихин А. С., Макеев М. О., Осипков А. С.,

- Булатов М. Ф., Кинжагулов И. Ю., Степанова К. А. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 10. С. 581–585. DOI: 10.21883/OS.2019.10.48361.174-19.
8. Progress in Spectroscopic Ellipsometry: Applications from Vacuum Ultraviolet to Infrared / Hilfiker J. N., Bungay C. L., Synowicki R. A., Tiwald T. E., Herzinger C. M., Johs B., Pribil G. K., Woollam J. A. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2003. Vol. 21. Iss. 4. P. 1103–1108. DOI: 10.1116/1.1569928.
9. Survey of methods to characterize thin absorbing films with Spectroscopic Ellipsometry / Hilfiker J. N., Singh N., Tiwald T., Convey D., Smith S. M., Baker J. H., Tompkins H. G. // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. Iss. 22. P. 7979–7989. DOI: 10.1016/j.tsf.2008.04.060.
10. Use of Molecular Vibrations to Analyze Very Thin Films with Infrared Ellipsometry / Tompkins H. G., Tiwald T., Bungay C., Hooper A. E. // The Journal of Physical Chemistry B. 2004. Vol. 108. Iss. 12. P. 3777–3780. DOI: 10.1021/jp035731a.
11. Liu P., Zhang Y., Martin S. T. Complex Refractive Indices of Thin Films of Secondary Organic Materials by Spectroscopic Ellipsometry from 220 to 1200 nm // Environmental Science & Technology. 2013. Vol. 47. Iss. 23. P. 13594–13601. DOI: 10.1021/es403411e.
12. Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta₂O₅ thin films / Bright T. J., Watjen J. I., Zhang Z. M., Muratore C., Voevodin A. A., Koukis D. I., Tanner D. B., Arenas D. J. // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 114. Iss. 8. P. 083515. DOI: 10.1063/1.4819325.
13. Макеев М. О., Жукова Е. А. Исследование алмазоподобных покрытий методами ИК-спектральной эллипсометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. № 07. С. 229–240. DOI: 10.7463/0713.0597996.
14. Макеев М. О., Зверев А. В., Родионов И. А. Исследование характеристик и методов нанесения резиста с применением ИК-спектральной эллипсометрии // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 6 (105). С. 125–134. DOI: 10.18698/0236-3933-2015-6-125-134.
15. Ремез Л. М., Шупенев А. Е., Куликов И. В. Анализ влияния технологических параметров процесса импульсного лазерного осаждения на физико-морфологические свойства тонких пленок // Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии: материалы Всероссийской научно-технической конференции (7–10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана) [Электронный ресурс]. URL: studvesna.ru?go=articles&id=1196 (дата обращения: 22.06.2020).
16. Handbook of ellipsometry / ed. by H. G. Tompkins, E. A. Irene. Norwich, NY: William Andrew Publishing, Springer, 2005. 870 p.
17. Рывкина Н. Г. Эллипсометрия в нанотехнологиях // Мир измерений. 2009. № 10. С. 19–25.
18. IR-VASE User's Manual. USA: J. A. Woollam Co. Inc., 2006. 670 p.
19. Wooten F. Optical Properties of Solids. New York: Academic Press, 1972. 270 p.

REFERENCES

1. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. In: *Materials science and engineering: R: Reports*, 2002, vol. 37, iss. 4–6, pp. 129–281. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
2. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – from first experiments to worldwide applications. In: *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 242, pp. 214–225. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031.
3. Grill A. Diamond-like carbon coatings as biocompatible materials – an overview. In:

- Diamond and related materials*, 2003, vol. 12, iss. 2, pp. 166–170. DOI: 10.1016/S0925-9635(03)00018-9.
4. Hauert R. DLC films in biomedical applications. In: *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*. Boston, MA, Springer Publ., 2008, pp. 494–509. DOI: 10.1007/978-0-387-49891-1_20.
 5. Piazza F., Grambole D., Schneider D., Casiraghi C., Ferrari A. C., Robertson J. Protective diamond-like carbon coatings for future optical storage disks. In: *Diamond and Related Materials*, 2005, vol. 14, iss. 3–7, pp. 994–999. DOI: 10.1016/j.diamond.2004.12.028.
 6. Choi W. S., Kim K., Yi J., Hong B. Diamond-like carbon protective anti-reflection coating for Si solar cell. In: *Materials Letters*, 2008, vol. 62, iss. 4–5, pp. 577–580. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.06.019.
 7. Batshev V. I., Kozlov A. B., Machikhin A. S., Makeev M. O., Osipkov A. S., Bulatov M. F., Kinzhagulov I. Yu., Stepanova K. A. [Reinforcing of a mirror surface via the deposition of a carbon nanostructure]. In: *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 2019, vol. 127, no. 10, pp. 581–585. DOI: 10.21883/OS.2019.10.48361.174-19.
 8. Hilfiker J. N., Bungay C. L., Synowicki R. A., Tiwald T. E., Herzinger C. M., Johs B., Pribil G. K., Woollam J. A. Progress in Spectroscopic Ellipsometry: Applications from Vacuum Ultraviolet to Infrared. In: *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2003, vol. 21, iss. 4, pp. 1103–1108. DOI: 10.1116/1.1569928.
 9. Hilfiker J. N., Singh N., Tiwald T., Convey D., Smith S. M., Baker J. H., Tompkins H. G. Survey of methods to characterize thin absorbing films with Spectroscopic Ellipsometry. In: *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 22, pp. 7979–7989. DOI: 10.1016/j.tsf.2008.04.060.
 10. Tompkins H. G., Tiwald T., Bungay C., Hooper A. E. Use of Molecular Vibrations to Analyze Very Thin Films with Infrared Ellipsometry. In: *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, vol. 108, iss. 12, pp. 3777–3780. DOI: 10.1021/jp035731a.
 11. Liu P., Zhang Y., Martin S. T. Complex Refractive Indices of Thin Films of Secondary Organic Materials by Spectroscopic Ellipsometry from 220 to 1200 nm. In: *Environmental Science & Technology*, 2013, vol. 47, iss. 23, pp. 13594–13601. DOI: 10.1021/es403411e.
 12. Bright T. J., Watjen J. I., Zhang Z. M., Muratore C., Voevodin A. A., Koukis D. I., Tanner D. B., Arenas D. J. Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta₂O₅ thin films. In: *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114, iss. 8, pp. 083515. DOI: 10.1063/1.4819325.
 13. Makeev M. O., Zhukova E. A. [Study of diamond-like coatings by IR-spectral ellipsometry and Raman spectroscopy]. In: *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Baumana* [Science and Education of Bauman MSTU], 2013, no. 07, pp. 229–240. DOI: 10.7463/0713.0597996.
 14. Makeev M. O., Zverev A. V., Rodionov I. A. [Research into characteristics and methods of resist coating by infrared spectral ellipsometry]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2015, no. 6 (105), pp. 125–134. DOI: 10.18698/0236-3933-2015-6-125-134
 15. Remez L. M., Shupenev A. E., Kulikov I. V. [Analysis of the influence of technological parameters of the pulsed laser deposition process on the physico-morphological properties of thin films]. In: *Studencheskaya nauchnaya vesna: Mashinostroitel'nye tekhnologii: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (7–10 aprelya, 2015, Moskva, MGTU im. N. E. Baumana)* [Student Scientific Spring: Engineering Technologies: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference (April 7–10, 2015, Moscow, Bauman Moscow State Technical University)]. Available at: studvesna.ru?go=articles&id=1196 (accessed: 22.06.2020).

16. Tompkins H. G., Irene E. A., eds. Handbook of ellipsometry. Norwich, NY, William Andrew Publishing, Springer Publ., 2005. 870 p.
17. Ryvkina N. G. [Ellipsometry in nanotechnology]. In: *Mir izmerenii* [Measurements World], 2009, no. 10, pp. 19–25.
18. IR-VASE User's Manual. USA, J. A. Woollam Co. Inc. Publ., 2006. 670 p.
19. Wooten F. Optical Properties of Solids. New York, Academic Press Publ., 1972. 270 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николаева Дарья Владимировна – студент департамента механики и мехатроники Российского университета дружбы народов;
e-mail: darnik.dn2@gmail.com;

Генералов Дмитрий Владимирович – студент департамента механики и мехатроники Российского университета дружбы народов;
e-mail: 1032181886@pfur.ru;

Паршин Богдан Александрович – студент факультета «Радиоэлектроника и лазерная техника» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета);
e-mail: bodya67rus97@bk.ru;

Макеев Мстислав Олегович – кандидат технических наук, начальник сектора испытаний, измерений и аналитики лаборатории «Технологии маскирующих материалов» РУНЦ «Безопасность» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета); доцент департамента механики и мехатроники Российского университета дружбы народов;
e-mail: mc.stiv@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Daria V. Nikolaeva – student, Department of Mechanics and Mechatronics, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: darnik.dn2@gmail.com;

Dmitrii V. Generalov – student, Department of Mechanics and Mechatronics, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: 1032181886@pfur.ru;

Bogdan A. Parshin – student, the faculty "Radio electronics and laser technology", Bauman Moscow State Technical University;
e-mail: bodya67rus97@bk.ru;

Mstislav O. Makeev – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Sector for Testing, Measurements and Analytics, the Laboratory "Technologies of Masking Materials" of the Regional educational and scientific center "Security", Bauman Moscow State Technical University; Assoc. Prof., Department of Mechanics and Mechatronics, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: mc.stiv@gmail.com.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Николаева Д. В., Генералов Д. В., Паршин Б. А., Макеев М. О. Исследование физических свойств углеродных алмазоподобных покрытий, нанесённых методом импульсного лазерного осаждения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2020. № 3. С. 53–64.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-53-64

FOR CITATION

Nikolaeva D. V., Generalov D. V., Parshin B. A., Makeev M. O. Investigation of physical properties of carbon diamond-like coatings applied by pulsed laser deposition // Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Physics and Mathematics. 2020. no. 3. pp. 53–64.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-53-64