

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 535.312:535.016
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-21-27>

Поступило в редакцию 23.10.2019
Received 23.10.2019

**И. Д. Парфимович¹, член-корреспондент Ф. Ф. Комаров¹, О. В. Мильчанин¹,
А. Г. Ткачев², О. Р. Людчик³, М. Н. Кольчевская³, Р. Б. Миранович³**

¹*Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко*

Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

²*Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация*

³*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

**ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИТНОГО
МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

Аннотация. Впервые методом импульсной лазерной обработки композитных материалов на основе эпоксидно-го полимера ЭД-20 с многостенными углеродными нанотрубками сформированы образцы антиотражающих в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн покрытий. Проведены оптические исследования по измерению коэффициента отражения в диапазоне от 400 до 2500 нм. Установлено влияние поверхностной структуры материалов на коэффициент отражения. Продемонстрирована возможность создания «безотражательных» поверхностей образцов композитов в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, композитный материал, антиотражение, лазерная обработка

Для цитирования: Импульсная лазерная обработка поверхности композитного материала в процессах формирования широкополосных антиотражающих покрытий / И. Д. Парфимович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 21–27. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-21-27>

**Ivan D. Parfimovich¹, Corresponding Member Fadey F. Komarov¹, Oleg V. Milchanin¹,
Alexey G. Tkachev², Oleg R. Lyudchik³, Maria N. Kolchevskaya³, Roman B. Miranovich³**

¹*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

²*Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation*

³*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

**PULSE LASER TREATMENT OF A COMPOSITE MATERIAL SURFACE IN THE PROCESSES
OF BROADBAND ANTIREFLECTIVE COATING FORMATION**

Abstract. For the first time, a pulse laser treatment method was developed and demonstrated for the formation of antireflective coatings based on composite materials containing polymer with carbon nanotubes. The effect of the composite surface in the visual and near-IR regions modification by the pulse laser treatment on light reflectivity has been studied. The possibility of creating innovative non-reflective surfaces of composite samples in the visual and near-IR ranges is demonstrated.

Keywords: polymer, multiwalled carbon nanotubes, composite material, pulse laser treatment, antireflection

For citation: Parfimovich I. D., Komarov F. F., Milchanin O. V., Tkachev A. G., Lyudchik O. R., Kolchevskaya M. N., Miranovich R. B. Pulse laser treatment of a composite material surface in the processes of broadband antireflective coating formation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 21–27 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-21-27>

Введение. Широкополосные антиотражающие материалы и покрытия привлекают большое внимание благодаря их актуальности во многих прикладных областях: преобразователи солнечной энергии, приборы термического контроля, оптические поглотители для фото- и термодетекторов, а также при создании защитных, экранирующих и маскирующих покрытий.

Хорошо известно, что коэффициент отражения материала может быть уменьшен путем добавления в состав поглощающих частиц – красителей, частиц углеродной, золотой, платиновой и другой сажи [1]. Однако отражение на границе воздух(вакуум)/поверхность ограничивает долю падающего света, который впоследствии может быть поглощен. Для решения данной проблемы на поверхности объектов путем формирования субволновых неоднородностей создается специальный (антиотражающий) слой [2], который за счет согласования показателей преломления между воздухом (вакуумом в космосе) и поверхностью материала будет минимизировать отражение падающего излучения [3].

К настоящему моменту предложен ряд подходов, позволяющих создавать антиотражающие покрытия – методы ионного и плазменного травления [4–8], метод нанопечатной литографии [9], химические методы создания покрытий на основе синтеза аэрогелей [1; 10], а также различные методы нанесения массивов одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на подложки [11–13].

Однако каждый из этих методов обладает теми или иными недостатками, препятствующими использованию в крупных масштабах.

Для материалов, формируемых методом ионного либо плазменного травления, это сложность контролирования однородности и воспроизводимости структуры на больших площадях. Для аэрогелей проблемными являются вопросы, связанные с механической стойкостью и токсикологическим влиянием продуктов реакции их получения. Основным недостатком массивов ОУНТ является сложность технологического процесса выращивания нанотрубок с заданными параметрами на подложках и их механическая устойчивость к внешним воздействиям.

Метод нанопечатной литографии – это технологически простой и отработанный процесс, не требующий сложного специфического оборудования и материалов. К тому же изменением структуры пресс-формы обеспечивается возможность управления и структурой покрытий. Однако само изготовление набора пресс-форм довольно длительный и затратный процесс, таким образом, это является ограничением метода, так как отсутствует возможность быстрого задания параметров модифицируемой поверхности покрытия.

В настоящей работе впервые представлен метод поверхностного структурирования антиотражающих покрытий импульсным лазерным излучением. Суть метода заключается в формировании на поверхности исходного материала периодической структуры пирамидок за счет «прожигания» части материала лазерным излучением. Метод легко позволяет контролировать высоту и ширину пирамидок и в целом автоматизировать процесс структурирования поверхности материала. В качестве исходного материала выбран композит из эпоксидного полимера с наполнителем из 4 мас. % многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ). Использование МУНТ обуславливается собственными эффективными поглощающими свойствами графеноподобных структур, развитой технологией их промышленного производства и способностью формировать в самом композите объемные поглощающие образования [14].

Материалы и методы исследования. Процесс изготовления антиотражающего покрытия методом лазерного структурирования происходил в два этапа: (1) изготовление образца композитного материала на основе полимера с добавками МУНТ, (2) лазерная обработка поверхности сформированного композита.

Изготовление образца композитного материала. В составе покрытия (композитного материала) использовались многостенные углеродные нанотрубки «Таунит-М» (Нанотехцентр, Тамбов, РФ), характеризующиеся диаметром внешних стенок 8–12 нм, внутренних стенок 4–8 нм, длиной от 1 до 10 мкм и эпоксидный полимер ЭД-20. Композит изготавливался с использованием ультразвукового гомогенизатора UP-400St. МУНТ концентрацией 4 мас. % предварительно диспергировали в спиртовом растворе поверхностно активных веществ (100 мМ) в течение 20 мин при частоте ультразвука 24 кГц и мощностью 40 Вт с последующим постепенным и плавным изменением амплитуды ультразвуковой волны от 20 до 70 %. Затем смесь добавлялась к эпоксидному полимеру и в течение 20 мин при частоте 24 кГц и мощности 80 Вт повторно подвергалась ультразвуковой обработке. После завершения данной процедуры к полимеру добавлялся отвердитель, и готовая смесь выставлялась в сушильный шкаф для выпаривания раствора ПАВ и осуществления процесса полимеризации.

Лазерная обработка поверхности композитного материала. Формирование периодической структуры поверхности осуществлялось импульсным LOTIS ТП ND:YAG лазером с длиной волны 1064 нм и частотой 50 Гц. Сфокусированный лазерный пучок многократно проходил по образцу, формируя параллельные бороздки. Варьируя такими параметрами, как фокусировка пучка, энергия накачки, частота импульсов и пространственный шаг можно легко управлять формой и геометрическими размерами бороздок.

Специфика распределения МУНТ в структуре полимера исследовалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа HitachiH-800. Морфология поверхности структурированного композитного материала изучалась на сканирующем электронном микроскопе HitachiH-8010.

Измерение отражательной способности покрытия осуществлялось неполяризованным излучением в диапазоне от 400 до 2500 нм на сканирующем спектрофотометре PhotonRT.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены ПЭМ-микрофотографии структуры композитного материала с 4 мас. % добавки «Таунит-М». Морфология сформированного композитного материала представляет собой трехмерную сетку, образованную переплетениями углеродных нанотрубок, с многочисленными полимерными ячейками размерами порядка 10 нм.

Формирование трехмерной сетки в структуре композита приводит к появлению неоднородных локальных областей с различными проводящими характеристиками материала, на границах раздела между которыми происходит многократное преломление и отражение падающего излучения, т. е. подобная решетчатая структура способствует эффективному поглощению электромагнитного излучения композитом, что подтверждается результатами исследований в ряде работ [1; 14].

Как уже отмечалось, микроскопические неоднородности во внутренней среде материала способствуют увеличению поглощения излучения, а при наличии антиотражающего слоя будут повышать его эффективность. Формирование на поверхности композитного материала антиотражающего слоя достигалось путем импульсного лазерного воздействия, в результате которого создавались параллельные протяженные бороздки. При повторном воздействии в перпендикулярном направлении формировалась пирамидальная структура поверхности материала. Ширина и глубина бороздок регулировалась величиной энергии накачки лазера (E_n), фокусного расстояния (F) и количеством проходов пучка вдоль одной бороздки (N), период следования бороздок задавался пространственным шагом перемещения лазерного импульса (h) и составлял 100 мкм. В результате был сформирован ряд образцов с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 5$ мм, отличающихся различными топологическими параметрами и параметрами лазерного воздействия. На рис. 2 представлены образцы композитных материалов, подвергнутых лазерной обработке с различными параметрами.

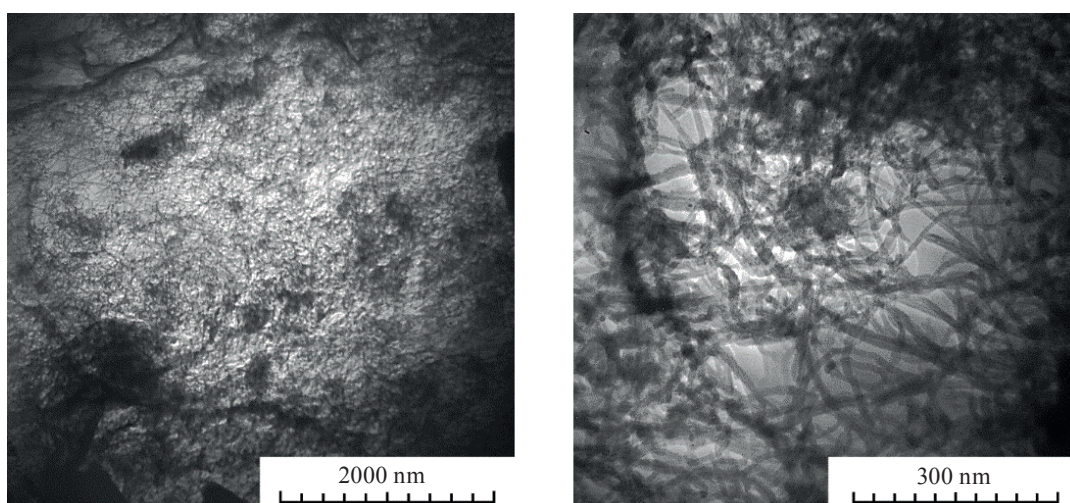


Рис. 1. ПЭМ-микрофотографии структуры композитного материала с добавлением 4 мас. % МУНТ «Таунит-М»

Fig. 1. Light-field TEM image of the nanocomposites based on epoxy polymer with 4 wt. % “Taunit-M” MWCNTs

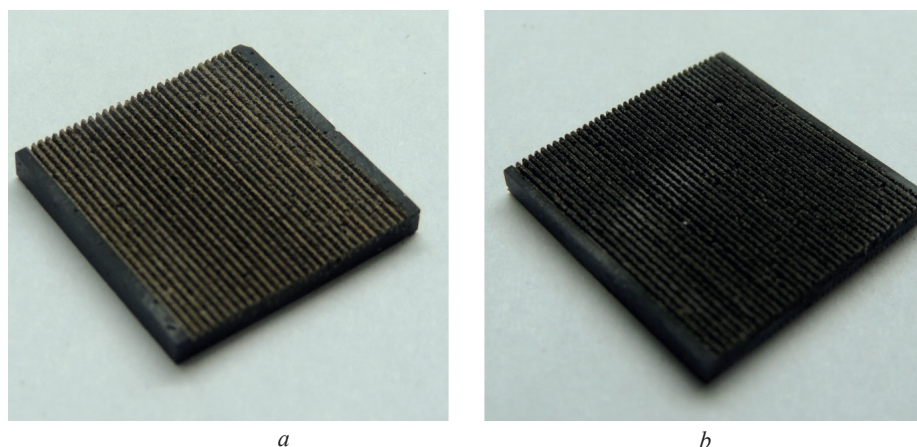


Рис. 2. Образцы антиотражающих покрытий с различными параметрами лазерной обработки: $a - E_n = 12,5$ Дж, $h = 100$ мкм; $b - E_n = 13$ Дж, $h = 100$ мкм

Fig. 2. Samples of antireflective composite materials with different pulsed laser treatment parameters: $a - E_p = 12.5$ J, $h = 100$ μm ; $b - E_p = 13$ J, $h = 100$ μm

Применение лазерного воздействия также приводит к образованию на боковой поверхности бороздок и конусов наноразмерных неоднородных ячеек. Данные ячейки представляют собой многочисленные воздушные полости размерами от 100 до 500 нм, окруженные расплавленным материалом композита (рис. 3).

Прежде чем приступить к демонстрации и обсуждению результатов по измерению отражающей способности сформированных покрытий стоит отметить, что использование метода импульсной лазерной обработки на чистом эпоксидном полимере не приводит к образованию бороздок. И поэтому не удалось отследить влияние рельефа поверхности, без учета углеродных добавок, на отражение.

На рис. 4 представлены результаты измерений абсолютного (зеркального) отражения композитных материалов на основе углеродных нанотрубок с профилированием поверхности методом импульсного лазерного воздействия. В качестве объектов сравнения также выступали образцы чистого (образец N1) и композитного материала с углеродными нанотрубками (образец N2) без профилирования (рис. 4, *a*).

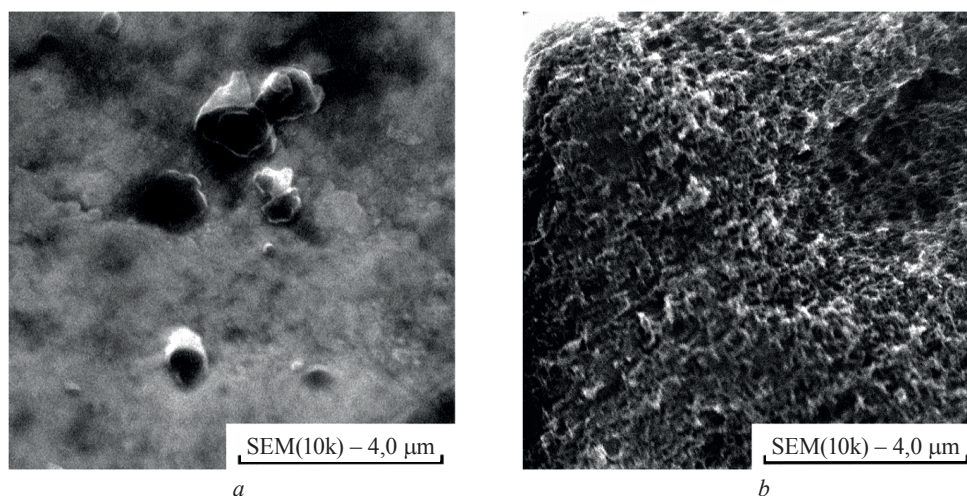


Рис. 3. СЭМ-микрофотографии образцов композитных материалов с добавлением 4 мас. % МУНТ «Таунит-М»: без лазерной обработки (*a*); с лазерной обработкой (*b*)

Fig. 3. SEM microphotographs of the nanocomposites based on epoxy polymer with 4 wt. % “Taunit-M” MWCNTs: *a* – without pulsed laser treatment, *b* – with pulsed laser treatment

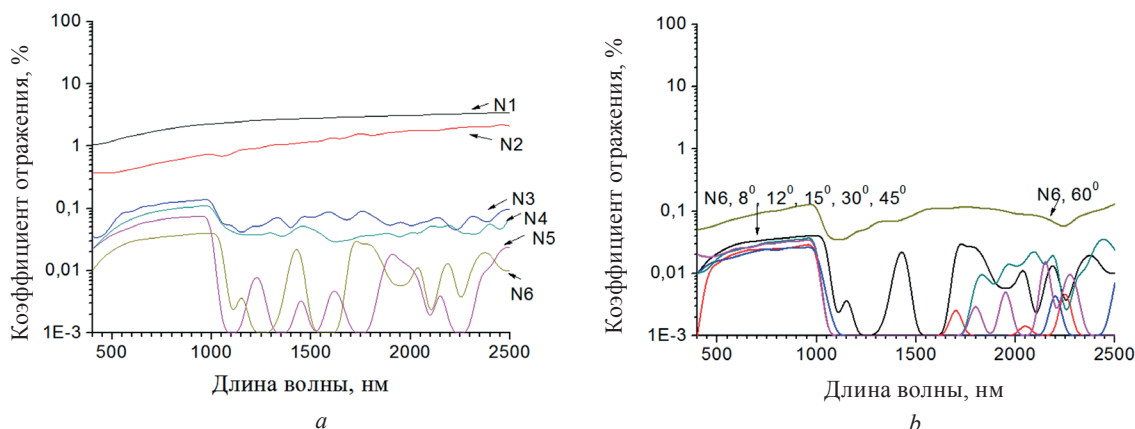


Рис. 4. Зеркальное отражение эпоксидных композитов с многостенными углеродными нанотрубками в диапазоне 400–2500 нм (а); угловая зависимость зеркального отражения для образца композитного материала N6 (b): N1 – эпоксидный полимер; N2 – композит без профилирования; N3 – композит с профилированием в виде бороздок ($E_p = 12,5$ Дж, $h = 100$ мкм); N4 – композит с профилированием в виде пирамидок ($E_p = 12,5$ Дж, $h = 100$ мкм); N5 – композит с профилированием в виде бороздок ($E_p = 13$ Дж, $h = 100$ мкм); N6 – композит с профилированием в виде пирамидок ($E_p = 13$ Дж, $h = 100$ мкм)

Fig. 4. Specular reflection of MWCNT composite in the range of 400–2500 nm (a), angular dependence of reflectance for composite material N6 (b): N1 – epoxy polymer; N2 – MWCNT composite without pulsed laser treatment; N3 – MWCNT composite with pulsed laser treatment ($E_p = 12.5$ J, $h = 100$ μm grooves surface); N4 – MWCNT composite with pulsed laser treatment ($E_p = 12.5$ J, $h = 100$ μm pyramidal surface); N5 – MWCNT composite with pulsed laser treatment ($E_p = 13$ J, $h = 100$ μm grooves surface); N6 – MWCNT composite with pulsed laser treatment ($E_p = 13$ J, $h = 100$ μm pyramidal surface)

Наличие профилированной поверхности позволяет уменьшить отражение от материала на 1–2 порядка величины, в зависимости от параметров лазерного воздействия. Так, для образца N3 значение коэффициента абсолютного отражения не превышает 0,1 % в видимом (400–800 нм) диапазоне и колеблется в пределах от 0,04 до 0,07 % в ближнем ИК (1000–2500 нм). Для образца N5 коэффициент отражения в видимом диапазоне не превышает 0,07 %, а ближнем ИК и вовсе не удалось корректно зарегистрировать сигнал из-за недостаточной чувствительности прибора.

Также стоит отметить, что топология поверхности в виде пирамидок позволяет дополнительно ослабить отражение в сравнении со сформированными бороздками. Например, при сравнении образцов N3 и N4, сформированных при одинаковых параметрах лазерного воздействия, однако отличающихся морфологией поверхности, наблюдается общее снижение значения коэффициента отражения на 0,02 %. Схожий эффект наблюдается и при сравнении образцов N5 и N6: регистрируемый коэффициент отражения для композитного материала с поверхностной морфологией в виде пирамидок имеет на 0,04 % меньшее значение в видимом диапазоне и составляет 0,03 %.

Немаловажной особенностью, наблюдаемой для всех профилированных образцов, является резкое увеличение коэффициента зеркального отражения, регистрируемого при угле 60°. Более подробное изучение угловых характеристик для образца N6 (рис. 4, b) демонстрирует, что проявление данного эффекта происходит довольно резко – при углах падения вплоть до 45° значения коэффициентов имеют достаточно близкие величины в пределах погрешности измерения прибора. Особенно явно это заметно в видимой области, где прибор обладает чуть большей чувствительностью.

Мы связываем резкое увеличение коэффициента отражения с тем, что при падении излучения под углом в 60° пирамидальная структура перестает работать. Вместо того чтобы за счет геометрии пирамидок падающее излучение испытало многократное отражение и распространилось в глубь сформированной структуры, при данном угле падения происходит переотражение излучения «наружу». Таким образом, для подобных структур существует некоторый критический угол, при превышении которого и проявляется увеличение отражения от поверхности.

Заключение. По результатам исследований продемонстрирована возможность создавать «безотражательные» поверхности образцов композитов в видимом и ближнем ИК диапазонах

спектра за счет ряда факторов. В первую очередь это использование импульсного лазерного воздействия при формировании антиотражающей структуры на поверхности композитного материала, обеспечивающей многократное переотражение и поглощение излучения. Данный метод отличается своей гибкостью по отношению к задаваемым структурным параметрам поверхности образца. Вместе с этим благодаря формированию микроскопических неоднородностей во внутренней среде материала за счет переплетений жгутов и кластеров многостенных углеродных нанотрубок, а также собственным поглощающим свойствам многостенных углеродных нанотрубок «Таунит-М», удается повысить эффективность использования таких материалов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т18Р-249).

Acknowledgements. The work is supported by the Russian Foundation for Fundamental Research and Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grants № Т18Р-249).

Список использованных источников

1. Facile fabrication of ultra-low density, high-surface-area, broadband antireflective carbon aerogels as ultra-black materials / J. Zhu [et al.] // *J. Porous Mater.* – 2016. – Vol. 23, N 5. – P. 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s10934-016-0180-5>
2. Moth-eye antireflection nanostructure on glass for CubeSat / Y. Liu [et al.] // *J. Vacuum Science & Technology B.* – 2018. – Vol. 36, N 6. – P. 06JG01. <https://doi.org/10.1116/1.5050986>
3. Lin, Y. Recent progress in antireflection and self-cleaning technology – From surface engineering to functional surfaces / Y. Lin, J. He // *Progress in Materials Science.* – 2014. – Vol. 61. – P. 94–143. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.12.003>
4. Fabrication of hard-coated optical absorbers with microstructured surfaces using etched ion tracks: Toward broadband ultra-low reflectance / K. Amemiya [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* – 2015. – Vol. 356–357. – P. 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.05.002>
5. Nanoscale of biomimetic moth-eye structures exhibiting inverse polarization phenomena at the Brewster angle / S. Chuang [et al.] // *Nanoscale.* – 2010. – Vol. 2, N 5. – P. 799–805. <https://doi.org/10.1039/c0nr00010h>
6. An ultra-black silicon absorber / M. Steglich [et al.] // *Laser Photonics Rev.* – 2014. – Vol. 8, N 2. – P. L13–L17. <https://doi.org/10.1002/lpor.201300142>
7. Bendable, ultra-black absorber based on a graphite nanocone nanowire composite structure / Y. Sun [et al.] // *Optics Express.* – 2015. – Vol. 23, N 15. – P. 20115–20123. <https://doi.org/10.1364/oe.23.020115>
8. Black Silicon Photovoltaics / M. Otto [et al.] // *Adv. Optical. Mater.* – 2015. – Vol. 3, N 2. – P. 147–164. <https://doi.org/10.1002/adom.201400395>
9. Transfer properties of moth-eye structure film by RTR UV-NIL / T. Uchida [et al.] // *International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)*, 14–17 April 2015. – Kyoto, Japan, 2015. <https://doi.org/10.1109/icep-iaac.2015.7111049>
10. Super Black Material from Low-Density Carbon Aerogels with Subwavelength Structures / W. Sun [et al.] // *ACS Nano.* – 2016. – Vol. 10, N 10. – P. 9123–9128. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b02039>
11. Infrared hemispherical reflectance of carbon nanotube mats and arrays in the 5–50 mkm wavelength region / C. J. Chunnillal [et al.] // *Carbon.* – 2012. – Vol. 50, N 14. – P. 5348–5350. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.014>
12. A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes / K. Mizuno [et al.] // *PNAS.* – 2009. – Vol. 106, N 15. – P. 6044–6047. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900155106>
13. Thin randomly aligned hierarchical carbon nanotube arrays as ultrablack metamaterials / F. De Nicola [et al.] // *Physical Review B.* – 2017. – Vol. 96, N 4. – 045409-1–6. <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.045409>
14. A composite based on epoxy polymer and carbon nanotubes: structure, optical properties and interaction with microwave radiation / F. F. Komarov [et al.] // *Advanced Materials & Technologies.* – 2017. – N 2. – P. 019–025. <https://doi.org/10.17277/amt.2017.02.pp.019-025>

References

1. Zhu J., Yang X., Fu Z., Wang C., Wu W., Zhang L. Facile fabrication of ultra-low density, high-surface-area, broadband antireflective carbon aerogels as ultra-black materials. *Journal of Porous Materials*, 2016, vol. 23, no. 5, pp. 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s10934-016-0180-5>
2. Liu Y., Soltani M., Dey R. K., Cui B., Lee R., Podmore H. Moth-eye antireflection nanostructure on glass for CubeSat. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2018, vol. 36, no. 6, pp. 06JG01. <https://doi.org/10.1116/1.5050986>
3. Yao L., He J. Recent progress in antireflection and self-cleaning technology – From surface engineering to functional surfaces. *Progress in Materials Science*, 2014, vol. 61, pp. 94–143. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.12.003>
4. Amemiya K., Koshikawa H., Yamaki T., Maekawa Y., Shitomi H., Numata T., Kinoshita K., Tanabe M., Fukuda D. Fabrication of hard-coated optical absorbers with microstructured surfaces using etched ion tracks: Toward broadband ultra-low reflectance. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2015, vol. 356–357, pp. 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.05.002>

5. Chuang S., Chen H., Shieh J., Lin C., Cheng C., Liu H., Yu C. Nanoscale of biomimetic moth-eye structures exhibiting inverse polarization phenomena at the Brewster angle. *Nanoscale*, 2010, vol. 2, no. 5, pp. 799–805. <https://doi.org/10.1039/c0nr00010h>
6. Steglich M., Lehr D., Ratzsch S., Kasebier T., Schrepel F., Kley E., Tunnermann A. An ultra-black silicon absorber. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. L13–L17. <https://doi.org/10.1002/lpor.201300142>
7. Sun Y., Evans J., Ding F., Liu N., Liu W., Zhang Y., He S. Bendable, ultra-black absorber based on a graphite nanocone nanowire composite structure. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 15, pp. 20115–20123. <https://doi.org/10.1364/oe.23.020115>
8. Otto M., Algasinger M., Branz H., Gesemann B., Gimpel T., Fuchsel K., Kasebier T., Kontermann S., Koynov S., Li X., Naumann V., Oh J., Sprafke A., Ziegler J., Zilk M., Wehrspohn R. Black Silicon Photovoltaics. *Advanced Optical Materials*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 147–164. <https://doi.org/10.1002/adom.201400395>
9. Uchida T., Moro M., Hiwasa S., Taniguchi J. Transfer properties of moth-eye structure film by RTR UV-NIL. *International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), 14–17 April 2015*. Kyoto, Japan, 2015. <https://doi.org/10.1109/icep-iaac.2015.7111049>
10. Sun W., Du A., Feng Y., Shen J., Huang S., Tang J., Zhou B. Super Black Material from Low-Density Carbon Aerogels with Subwavelength Structures. *ACS Nano*, 2016, vol. 10, no. 10, pp. 9123–9128. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b02039>
11. Chunnillal C. J., Lehman J. H., Theocharous E., Sanders A. Infrared hemispherical reflectance of carbon nanotube mats and arrays in the 5–50 mkm wavelength region. *Carbon*, 2012, vol. 50, no. 14, pp. 5348–5350. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.014>
12. Mizuno K., Ishii J., Kishida H., Hayamizu Y., Yasuda S., Futaba D. N., Yumura M., Hata K. A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, vol. 106, no. 15, pp. 6044–6047. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900155106>
13. De Nicola F., Hines P., De Crescenzi M., Motta N. Thin randomly aligned hierarchical carbon nanotube arrays as ultrablack metamaterials. *Physical Review B*, 2017, vol. 96, no. 4, art. 045409-1–6. <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.045409>
14. Komarov F. F., Tkachev A. G., Milchanin O. V., Parfimovich I. D., Grinchenko M. V., Parkhomenko I. N., Bychenok D. S. A composite based on epoxy polymer and carbon nanotubes: structure, optical properties and interaction with microwave radiation. *Advanced Materials & Technologies*, 2017, no. 2, pp. 019–025. <https://doi.org/10.17277/amt.2017.02.pp.019-025>

Информация об авторах

Парфимович Иван Дмитриевич – мл. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: parfimovich@bsu.by.

Комаров Фадей Фадеевич – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovF@bsu.by.

Мильчанин Олег Владимирович – ст. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: milchanin@bsu.by.

Ткачев Алексей Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой. Тамбовский государственный технический университет (ул. Советская, 106, 392000, Тамбов, Российская Федерация). E-mail: postmaster@kma.tstu.ru.

Людчик Олег Ростиславович – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Ljudchik@tut.by.

Кольчевская Мария Николаевна – студент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolchevskaya.mary@gmail.com.

Миранович Роман Борисович – магистрант. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: roman.miranovich@gmail.com.

Information about the authors

Parfimovich Ivan D. – Junior researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: parfimovich@bsu.by.

Komarov Fadey F. – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovF@bsu.by.

Milchanin Oleg V. – Senior researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: milchanin@bsu.by.

Tkachev Alexey G. – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: postmaster@kma.tstu.ru.

Ljudchik Oleg R. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ljudchik@tut.by.

Kolchevskaya Maria N. – Student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolchevskaya.mary@gmail.com.

Miranovich Roman B. – Master student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: roman.miranovich@gmail.com.