

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-48-54>

УДК 678.8:539.21:539.12:538.958

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ПОЛИИМИДА ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ВЫСОКОЙ ДОЗОЙ ИОНОВ МАРГАНЦА

А. С. СОРОКА<sup>1</sup>, Ю. А. БУМАЙ<sup>2</sup>, В. И. ГОЛОВЧУК<sup>1</sup>, М. Г. ЛУКАШЕВИЧ<sup>1+</sup>, В. Б. ОДЖАЕВ<sup>1</sup>,  
Р. И. ХАЙБУЛЛИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского, Сибирский тракт, 10/7, 420029, Казань, Россия

*Цель работы — изучение влияния карбонизации приповерхностного модифицированного слоя пленок полиимида и сформированных в нем марганецсодержащих включений на оптические свойства полученного нанокмпозиционного материала.*

*В диапазоне длин волн 200–3000 нм исследованы оптические характеристики (пропускание и отражение) тонких (40 мкм) пленок полиимида, имплантированных высокими дозами ионов марганца  $D_1 = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и  $D_2 = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  с энергией 40 кэВ при плотности тока в ионном пучке 4 мкА/см<sup>2</sup>. Уменьшение пропускания имплантированными пленками обусловлено карбонизацией приповерхностного слоя пленки с толщиной, равной длине пробега имплантированных ионов, и формированием в нем магнийсодержащих включений. Обнаружено усиление полос отражения полимером при  $\lambda_1 = 240 \text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 305 \text{ нм}$  при падении света на неимплантированную поверхность, обусловленное перестройкой надмолекулярной структуры полимера далеко за пределами пробега имплантированных ионов в приповерхностном слое с неимплантированной стороны пленки. Ширина оптической щели Тауца модифицированного слоя имеет отрицательный знак, а определенные методом моделирования показатели преломления модифицированного слоя равны  $n_1 = 2,6$  и  $n_2 = 1,27$  при дозах имплантации  $D_1$  и  $D_2$  соответственно.*

**Ключевые слова:** пленка, полиимид, имплантация, ион, марганец, пропускание, отражение.

## OPTICAL PROPERTIES OF POLYIMIDE FILMS IMPLANTED WITH HIGH DOSE OF MANGANESE IONS

A. S. SOROCA<sup>1</sup>, YU. A. BUMAI<sup>2</sup>, V. I. GOLOVCHUK<sup>1</sup>, M. G. LUKASHEVICH<sup>1+</sup>, V. B. ODZHAEV<sup>1</sup>,  
R. I. KHAIBULLIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti Ave, 4, 220030, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Nezavisimosti Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Sibirsky tract, 10/7, 420029, Kazan, Russia

*The aim of this work is to study the effect of carbonization of the near-surface modified layer of polyimide films and manganese-containing inclusions formed in it on the optical properties of the obtained nanocomposite material.*

*In the wavelength range of 200–3000 nm, the reflectivity and transmittance of thin (40 μm) polyimide films implanted with a high dose ( $D_1 = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  and  $D_2 = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ) of manganese ions with an energy of 40 keV at a current density in the ion beam of 4 μA cm<sup>-2</sup> have been investigated. It is shown that the implantation of polyimide films with a high dose of metal ions leads to a decrease in transmission more than 50% due to carbonization of the near-surface layer and the formation of manganese-containing inclusions.*

<sup>+</sup>Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: Lukashevich@bsu.by

The gane intensities of the reflection bands at  $\lambda_1 = 240$  nm and  $\lambda_2 = 305$  nm have been observed at the light incidence on the non-implanted side. Based on a two-layer model the refractive index of the modified layer was determined for these implantation doses  $n_1 = 2.6$  and  $n_2 = 1.27$  respectively.

**Keywords:** film, polyimide, implantation, ion, manganese, transmission, reflection.

Поступила в редакцию 02.07.2021

© А. С. Сорока, Ю. А. Бумай, В. И. Головчук, М. Г. Лукашевич, В. Б. Оджаев, Р. И. Хайбуллин, 2021

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)  
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь  
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus  
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: [polmattex@gmail.com](mailto:polmattex@gmail.com)  
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

#### Образец цитирования:

Сорока А. С., Бумай Ю. А., Головчук В. И., Лукашевич М. Г., Оджаев В. Б., Хайбуллин Р. И. Оптические характеристики пленок полиимида имплантированных высокой дозой ионов марганца // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, № 3. С. 48–54. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-48-54>

#### Citation sample:

Soroka A. S., Bumay Yu. A., Golovchuk V. I., Lukashevich M. G., Odzhaev V. B., Khaybullin R. I. Opticheskie kharakteristiki plenok poliimida implantirovannykh vysokoy dozoy ionov margantsa [Optical properties of polyimide films implanted with high dose of manganese ions]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2021, vol. 7, no. 3, pp. 48–54. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-48-54>

#### Литература

1. Kreibig U., Vollmer M. Optical properties of metal clusters. Berlin : Springer, 1995. 532 p.
2. Maier S. A. Plasmonics: fundamentals and applications. Berlin: Springer, 2007. 223 p. doi: 10.1007/0-387-37825-1
3. Gaponenko S. V. Introduction to nanophotonics. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2010. 484 p. doi: 10.1017/CBO9780511750502
4. Оджаев В. Б., Козлов И. П., Попок В. Н., Свиридов Д. В. Ионная имплантация полимеров. Минск : БГУ, 1998. 197 с.
5. Stepanov A. L., Khaibullin R. I. Optics of metal nanoparticles fabricated in organic matrix by ion implantation // Reviews on Advanced Materials Science, 2004, vol. 7, is. 2, pp. 108–125.
6. Masikova A., Malinsky P., Miksova R., Pupikova H., Khaibullin R. I., Slepicka P., Combitova A., Kovacic L., Svoricik V., Matousek J. Characterization of PEEK, PET and PI implanted with Mn ions and sub-sequently annealed // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014, vol. 325, pp. 89–96. doi: 10.1016/j.nimb.2014.01.012
7. Бумай Ю. А., Валеев В. Ф., Долгих Н. И., Лукашевич М. Г., Нажим Ф. А., Нуждин В. И., Оджаев В. Б. Оптические свойства плёнок полиимида, имплантированных ионами серебра // Материалы, технологии, инструменты. 2010. Т. 15, № 4, С. 54–58.
8. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium // Physica Status Solidi, 1966, vol. 15, is. 2, pp. 627–637. doi: 10.1002/pssb.19660150224
9. Robertson J., O'Reilly E. Electronic and atomic structure of amorphous carbon // Physical Review B, 1987, vol. 35, is. 6, pp. 2946–2957. doi: 10.1103/PhysRevB.35.2946
10. Файзрахманов И. А., Базаров В. В., Степанов А. Л., Хайбуллин И. Б. Модификация наноструктуры алмазоподобных пленок углерода бомбардировкой ионами ксенона // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37, вып. 6. С. 748–752.
11. Файзрахманов И. А., Базаров В. В., Степанов А. Л., Хайбуллин И. Б. Влияние имплантации ионов меди на оптические свойства и низкотемпературную проводимость углеродных пленок // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, вып. 5. С. 419–425.
12. Коншина Е. А. Аморфный гидrogenизированный углерод и применение его в оптических устройствах. СПб., 2010. С. 25–40.
13. Refractive Index Info [Электронный ресурс]. URL: <http://refractiveIndex.info/> (дата обращения: 15.06.2021).
14. Lucashevich M. G., Popok V. N., Volobuev V. S., Melnikov A. A., Khaibullin R. I., Bazarov V. V., Wieck A., Odzhaev V. B. Magnetoresistive Effect in PET Films with Iron Nanoparticles Synthesized by Ion Implantation // The Open Applied Physics Journal, 2010, vol. 3, pp. 1–5.
15. Бумай Ю. А., Долгих Н. И., Харченко А. А., Лукашевич М. Г., Оджаев В. Б. Оптические характеристики пленок полиимида, имплантированных ионами  $V^{+}$  и  $Ag^{+}$  // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. Физика. Математика. Информатика.

2011. № 2. С. 41–44.
16. Бумай Ю. А., Волобуев В. С., Валеев В. Ф., Долгих Н. И., Лукашевич М. Г., Хайбуллин Р. И., Нуждин В. И., Оджаев В. Б. Оптические характеристики композита, полученного имплантацией ионов серебра в полиэтилентерефталат // Журнал прикладной спектроскопии. 2012. Т. 79, № 5. С. 781–787.
  17. Бумай Ю. А., Долгих Н. И., Харченко А. А., Валеев В. Ф., Нуждин В. И., Хайбуллин Р. И., Nagim F. A., Лукашевич М. Г., Оджаев В. Б. Оптические характеристики пленок полиимида, имплантированных ионами никеля // Журнал прикладной спектроскопии. 2014. Т. 81, № 2. С. 192–196.
  18. Бумай Ю. А., Бринкевич Д. И., Долгих Н. И., Карпович И. А., Харченко А. А., Лукашевич М. Г., Оджаев В. Б. Модификация оптических характеристик пленок полиимида радиационно-термической обработкой // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя фізіка-матэматычных навук. 2013. № 1. С. 92–96.
  19. Speight J. G. *Lange's handbook of chemistry*. Maidenhead : McGraw-Hill Professional, 2005, pp. 1000.

## References

1. Kreibitz U., Vollmer M. *Optical properties of metal clusters*. Berlin : Springer, 1995. 532 p.
2. Maier S. A. *Plasmonics: fundamentals and applications*. Berlin: Springer, 2007. 223 p. doi: 10.1007/0-387-37825-1
3. Gaponenko S. V. *Introduction to nanophotonics*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2010. 484 p. doi: 10.1017/CBO978051175050.
4. Odzhaev V. B., Kozlov I. P., Popok V. N., Sviridov D. V. *Ionnaya implantatsiya polimerov* [Ion implantation of polymers]. Minsk : BGU Publ., 1998. 197 p.
5. Stepanov A. L., Khaibullin R. I. Optics of metal nanoparticles fabricated in organic matrix by ion implantation. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2004, vol. 7, is. 2, pp. 108–125.
6. Mackova A., Malinsky P., Miksova R., Pupikova H., Khaibullin R. I., Slepicka P., Combitova A., Kovacic L., Svorcik V., Matousek J. Characterization of PEEK, PET and PI implanted with Mn ions and sub-sequently annealed. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2014, vol. 325, pp. 89–96. doi: 10.1016/j.nimb.2014.01.012
7. Bumay Yu. A., Valeev V. F., Dolgikh N. I., Lukashevich M. G., Nazhim F. A., Nuzhdin V. I., Odzhaev V. B. Opticheskie svoystva plenok poliimida, implantirovannykh ionami srebra [Optical properties of polyimide films implanted with silver ions]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 2010, vol. 15, no. 4, pp. 54–58.
8. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Physica Status Solidi*, 1966, vol. 15, is. 2, pp. 627–637. doi: 10.1002/pssb.19660150224
9. Robertson J., O'Reilly E. Electronic and atomic structure of amorphous carbon. *Physical Review B*, 1987, vol. 35, is. 6, pp. 2946–2957. doi: 10.1103/PhysRevB.35.2946
10. Fayzrakhmanov I. A., Bazarov V. V., Stepanov A. L., Khaibullin I. B. Modifikatsiya nanostrukturnykh plenok ugleroda bombardirovkoj ionami ksenona [Modification of the nanostructure of diamond-like carbon films by bombardment with xenon ions]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2003, vol. 37, is. 6, pp. 748–752.
11. Fayzrakhmanov I. A., Bazarov V. V., Stepanov A. L., Khaibullin I. B. Vliyanie implantatsii ionov medi na opticheskie svoystva i nizkotemperaturnuyu provodimost' uglerodnykh plenok [Influence of implantation of copper ions on the optical properties and low-temperature conductivity of carbon films]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2006, vol. 40, is. 5, pp. 419–425.
12. Konshina E. A. *Amorfnyy gidrogenizirovannyy uglerod i primenenie ego v opticheskikh ustroystvakh* [Amorphous hydrogenated carbon and its use in optical devices]. Saint-Petersburg, 2010, pp. 25–40.
13. Refractive Index Info. Available at: <http://refractiveindex.info/> (accessed 15.06.2021).
14. Lucashevich M. G., Popok V. N., Volobuev V. S., Melnikov A. A., Khaibullin R. I., Bazarov V. V., Wieck A., Odzhaev V. B. Magnetoresistive Effect in PET Films with Iron Nanoparticles Synthesized by Ion Implantation. *The Open Applied Physics Journal*, 2010, vol. 3, pp. 1–5.
15. Bumay Yu. A., Dolgikh N. I., Kharchenko A. A., Lukashevich M. G., Odzhaev V. B. Opticheskie kharakteristiki plenok poliimida, implantirovannykh ionami B<sup>+</sup> i Ag<sup>+</sup> [Optical characteristics of polyimide films implanted with B<sup>+</sup> and Ag<sup>+</sup> ions]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika* [Bulletin of BSU. Series 1. Physics. Mathematics. Informatics], 2011, no. 2, pp. 41–44.
16. Bumay Yu. A., Volobuev V. S., Valeev V. F., Dolgikh N. I., Lukashevich M. G., Khaibullin R. I., Nuzhdin V. I., Odzhaev V. B. Opticheskie kharakteristiki kompozita, poluchennogo implantatsiej ionov srebra v polietilentereftalat [Optical characteristics of a composite obtained by implanting silver ions into polyethylene terephthalate]. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], 2012, vol. 79, no. 5, pp. 781–787.
17. Bumay Yu. A., Dolgikh N. I., Kharchenko A. A., Valeev V. F., Nuzhdin V. I., Khaibullin R. I., Nagim F. A., Lukashevich M. G., Odzhaev V. B. Opticheskie kharakteristiki plenok poliimida, implantirovannykh ionami nikelya [Optical characteristics of polyimide films implanted with nickel ions]. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], 2014, vol. 81, no. 2, pp. 192–196.
18. Bumay Yu. A., Brinkevich D. I., Dolgikh N. I., Karpovich I. A., Kharchenko A. A., Lukashevich M. G., Odzhaev V. B. Modifikatsiya opticheskikh kharakteristik plenok poliimida radiatsionno-termicheskoy obrabotkoj [Modification of the optical characteristics of polyimide films by radiation-heat treatment]. *Vesti Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical-Mathematical Sciences], 2013, no. 1, pp. 92–96.
19. Speight J. G. *Lange's handbook of chemistry*. Maidenhead : McGraw-Hill Professional, 2005, pp. 1000.