

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОПОР, СИНТЕЗИРУЕМЫХ ПРИ ТРАВЛЕНИИ
ОЛИВИНА, ОБЛУЧЕННОГО БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВДОЛЬ
РАЗЛИЧНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ, ПРИ ПОМОЩИ
СКАНИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА
STUDY OF THE SHAPES OF CROSS SECTIONS OF NANOPORES SYNTHESIZED
BY ETCHING OF OLIVINE, IRRADIATED WITH SWIFT HEAVY IONS ALONG
DIFFERENT CRYSTALLINE DIRECTIONS, USING SCANNING ELECTRON
MICROSCOPY**

С.А. Горбунов¹, А.Е. Волков¹, М.В. Горшенков², Г.В. Калинина¹, Р.А. Рымжанов³
S. A. Gorbunov¹, A.E. Volkov¹, M.V. Gorshenkov², G.V. Kalinina¹, R.A. Rymzhanov³

¹*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук,
Ленинский проспект 53, Москва, Россия, s.a.gorbunov@mail.ru*

²*Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
Ленинский проспект 4с1, Москва, Россия*

³*Объединённый институт ядерных исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна, Россия*

Быстрые тяжёлые ионы (БТИ, $E > 1 \text{ МэВ/нуклон}$, $M > 20 \text{ а.е.м.}$) при торможении в мишени тратят подавляющую часть энергии ($> 95 \%$) на возбуждение электронной подсистемы материала. В результате облучения в материалах вдоль траекторий БТИ могут образовываться структурно-изменённые области с экстремальными пространственными масштабами: диаметром $\sim 1\text{-}10 \text{ нм}$ и длиной до 100 мкм [1].

Химическое травление такой структурно-изменённой области может приводить к формированию нано- и микропор.

Технологии травления треков БТИ широко используются, например, для поиска и идентификации сверхтяжёлых ядер космического излучения [2, 3], производства фильтров высокой очистки (трековых мембран) [4], сенсоров, [5-7], анопроволок [8], в производстве подложек для усиленного рамановского рассеяния [9].

Однако, как правило, эти технологии используют изотропные материалы (полимеры или стёкла), что ограничивает геометрическую форму полученных пор круговым поперечным сечением.

При этом, нанопоры с полигональным поперечным сечением также представляют интерес для ряда приложений [10-13].

В работы мы исследовали экспериментально наноразмерные поры с некруговым поперечным сечением путём жидкостного химического травления треков быстрых тяжёлых ионов в образцах кристаллического оливина WN-раствором [14].

В предыдущей работы мы исследовали эти поры методом атомно-силовой микроскопии. В представленной работе мы использовали сканирующий электронный микроскоп.

Образцы оливина были подготовлены при помощи последовательной шлифовки алмазной пастой и коллоидным кремнием. Затем образцы были облучены ионами ксенона с энергией 156МэВ и протравлены в WN-растворе в течение 90 минут.

Кристаллографические направления образца оливина были определены с помощью дифракции отражённых электронов (EBSD) путем индексации линий Кикучи. Электронограммы получали с помощью EBSD-детектора Oxford Instruments (NORDLYS), присоединенного к сканирующему электронному микроскопу.

Оливин имеет свойство накапливать электрический заряд в сканирующем электронном микроскопе. Поэтому, для того, чтобы получить изображения, на поверхности образцов напыляли проводящий слой платины толщиной 5 нм.

Результаты представлены на рисунке.

Дополнительно, для того, чтобы изучить не только лунки травления, но и геометрическую форму нанопор [15] вдоль трека, при помощи алмазной пасты мы сошлифовали с поверхности образцов слой толщиной 2 мкм. Затем отполировали образцы при помощи коллоидного кремния, напылили слой платины.

Результаты также представлены на рисунке ниже.

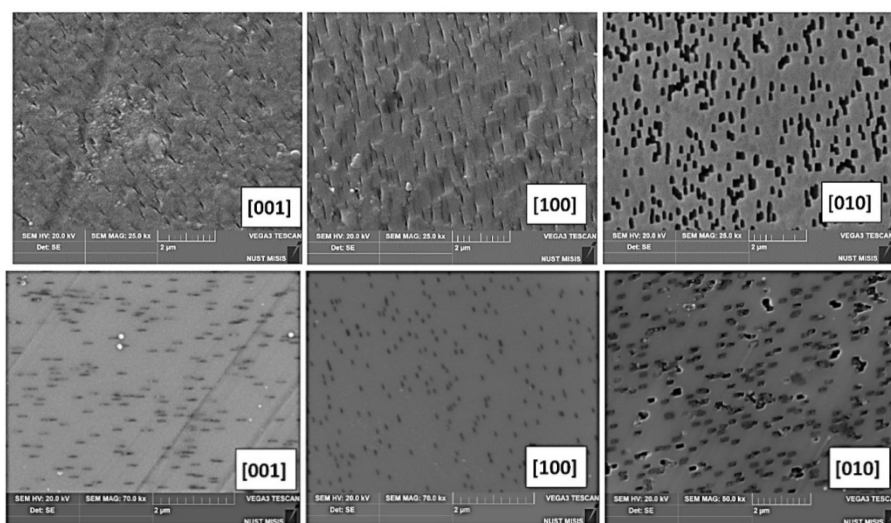


Рис. 1. Поверхности образцов оливина, облученного ионами Хе 156МэВ и протравленного в WN-растворе в течение 90 минут. Сверху – поверхность после травления. Снизу – поверхность, полученная после дополнительной сошлифовки слоя 2 мкм с поверхности образца

- [1] F.F. Komarov, *Nano- and Microstructuring of Solids by Swift Heavy Ions*, Physics-Uspekhi 60, 435 (2017).
- [2] J. Donnelly, A. Thompson, D. O’Sullivan, J. Daly, L. Drury, V. Domingo, and K. P. Wenzel, *Actinide and Ultra-Heavy Abundances in the Local Galactic Cosmic Rays: An Analysis of the Results from the LDEF Ultra-Heavy Cosmic-Ray Experiment*, Astrophys. J. 747, 40 (2012).
- [3] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, A. Gippius, L. Goncharova, S. Gorbunov, M. Gorshenkov, G. Kalinina, N. Konovalova, J. Liu, P. Zhai, N. Okatyeva, T. Pavlova, N. Polukhina, N. Starkov, T. N. Soe, C. Trautmann, E. Savchenko, T. Shchedrina, A. Vasiliev, and A. Volkov, *Charge spectrum of heavy and superheavy components of galactic cosmic rays: results of the olimpiya experiment*, Astrophys. J. 829, 120 (2016).
- [4] P.Y. Apel, I. V Blonskaya, V. R. Oganessian, O. L. Orelovitch, and C. Trautmann, *Morphology of Latent and Etched Heavy Ion Tracks in Radiation Resistant Polymers Polyimide and Poly(Ethylene Naphthalate)*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 185, 216 (2001).
- [5] T. Ma, J. M. Janot, and S. Balme, *Track-Etched Nanopore/Membrane: From Fundamental to Applications*, Small Methods 4, 2000366 (2020).
- [6] P. Yu Apel, I. V. Blonskaya, O. L. Orelovitch, B. A. Sartowska, and R. Spohr, *Asymmetric Ion Track Nanopores for Sensor Technology. Reconstruction of Pore Profile from Conductometric Measurements*, Nanotechnology 23, 225503 (2012).
- [7] D. Kaya and K. Keçeci, *Review—Track-Etched Nanoporous Polymer Membranes as Sensors: A Review*, J. Electrochem. Soc. 167, 037543 (2020).
- [8] R. Spohr, C. Zet, B. Eberhard Fischer, H. Kieseewetter, P. Apel, I. Gunko, T. Ohgai, and L. Westerberg, *Controlled Fabrication of Ion Track Nanowires and Channels*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 268, 676 (2010).
- [9] E.P. Kozhina, S. A. Bedin, N. L. Nechaeva, S. N. Podoynitsyn, V. P. Tarakanov, S. N. Andreev, Y. V. Grigoriev, and A. V. Naumov, *Ag-Nanowire Bundles with Gap Hot Spots Synthesized in Track-Etched Membranes as Effective SERS-Substrates*, Appl. Sci. 2021, Vol. 11, Page 1375 11, 1375 (2021).
- [10] L. Bruschi, G. Mistura, L. Prasetyo, D. D. Do, M. Dipalo, and F. De Angelis, *Adsorption on Nanopores of Different Cross Sections Made by Electron Beam Nanolithography*, Langmuir 34, 106 (2018).
- [11] K. Wu, Z. Chen, and X. Li, *Real Gas Transport through Nanopores of Varying Cross-Section Type and Shape in Shale Gas Reservoirs*, Chem. Eng. J. 281, 813 (2015).
- [12] Q. Chen and Z. Liu, *Fabrication and Applications of Solid-State Nanopores*, Sensors (Switzerland).
- [13] S. Prakash, M. Pinti, and K. Bellman, *Variable Cross-Section Nanopores Fabricated in Silicon Nitride Membranes Using a Transmission Electron Microscope*, J. Micromechanics Microengineering 22, 067002 (2012).
- [14] I. W. Davie and S. A. Durrani, *Anisotropic Track Etching in Olivine Crystals Using WN Solution*, Nucl. Track Detect. 2, 199 (1978).