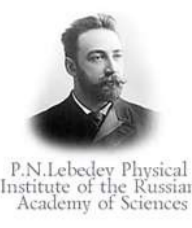


# Формы нанопор, синтезируемых при травлении треков быстрых тяжёлых ионов, в зависимости от кристаллической ориентировки образцов

53-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами, 2024

С.А. Горбунов<sup>1,\*</sup>, П.А. Бабаев<sup>1</sup>, А.Е. Волков<sup>1,2</sup>, Р.А. Воронков<sup>1</sup>, М.В. Горшенков<sup>3</sup>, Р. А. Рымжанов<sup>4</sup>, Г.В. Калинина<sup>1</sup>



1) Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва



2) НИЦ «Курчатовский институт», Москва



3) ОИЯИ, Дубна



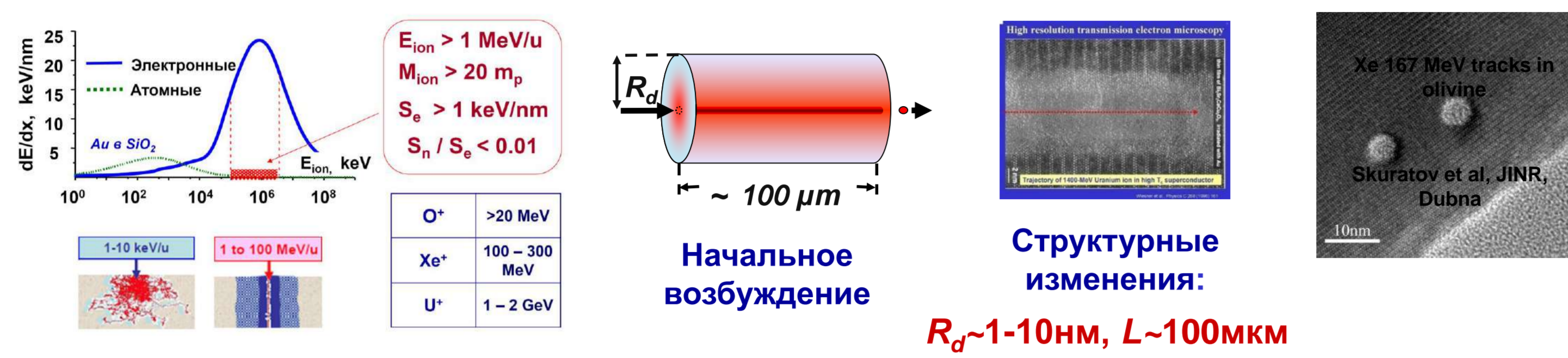
4) НИТУ МИСиС, Москва

\*gorbunovsa@lebedev.ru

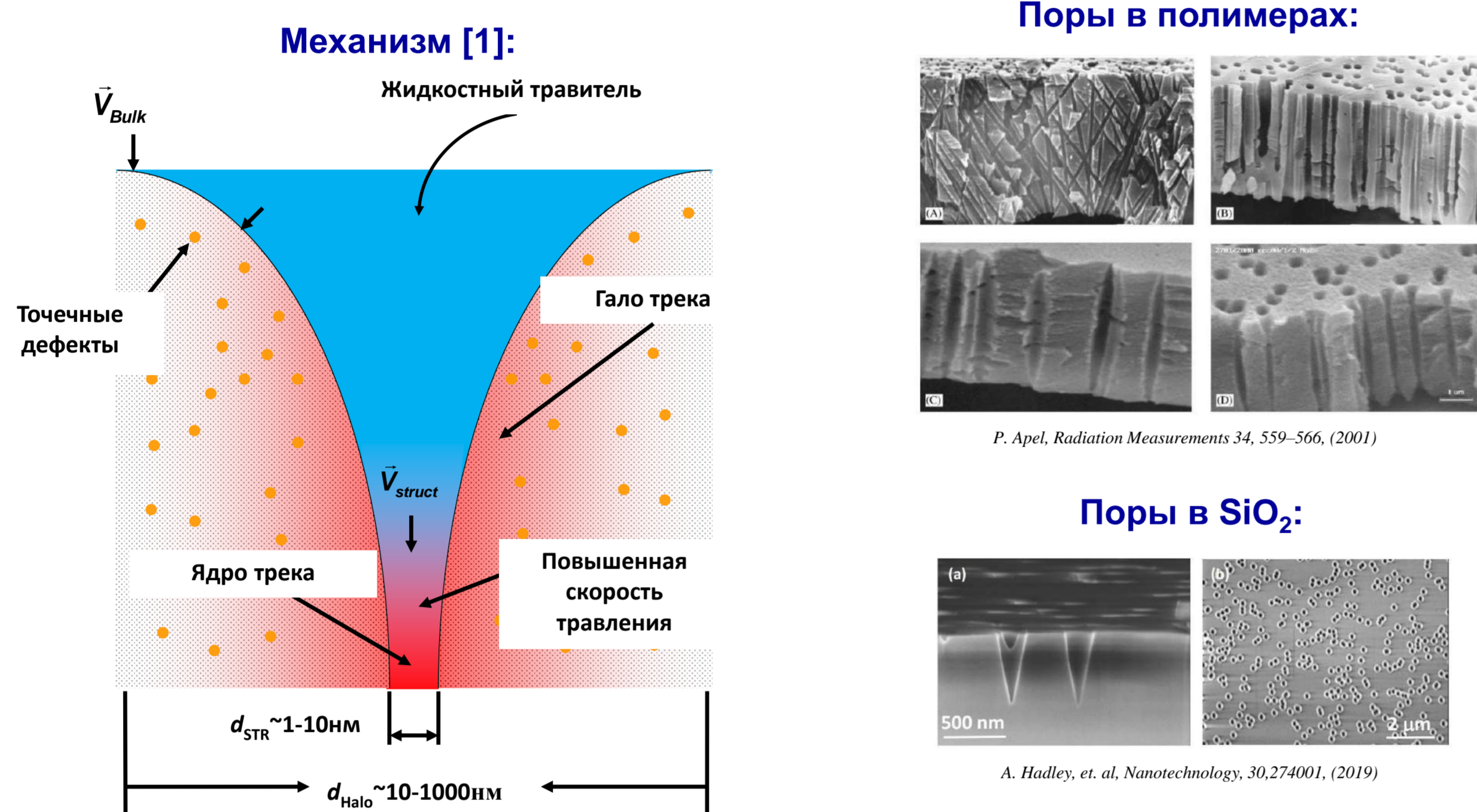
## 1. Синтез нанопор при помощи БТИ

Быстрые тяжёлые ионы (БТИ):  $E > 1 \text{ МэВ/нукл}$ ,  $M > 20 \text{ а.е.м.}$

### 1) Облучение



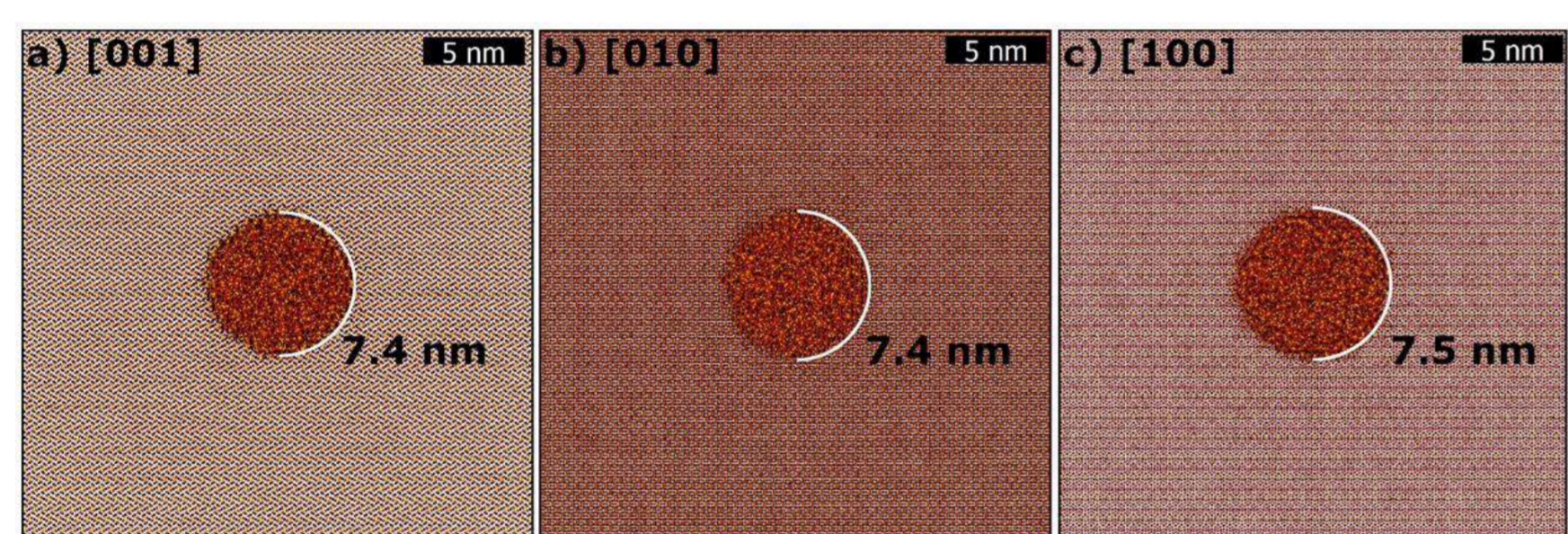
### 2) Травление



Как правило, используются изотропные материалы => поры круглые

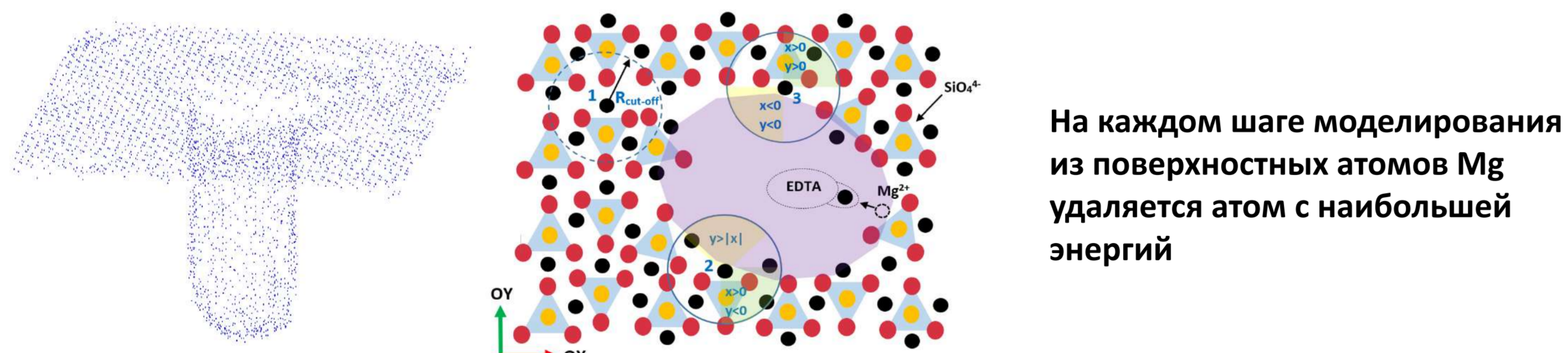
## 3. Модель травления [2]

Монте-Карло модель TREKIS [3] возбуждения электронной подсистемы материала в треке+Молекулярно-динамическое моделирование структурных изменений [3]

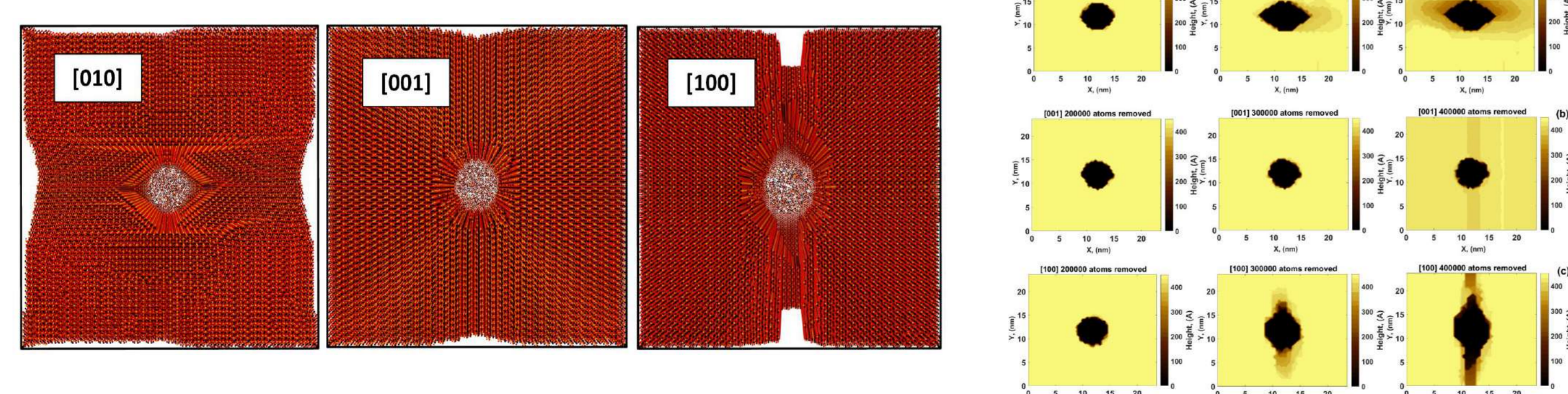


Структурные изменения решётки Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> после пролёта иона Xe с энергией 156 МэВ

Автоматический поиск и последовательное удаление поверхностных атомов



Результаты моделирования

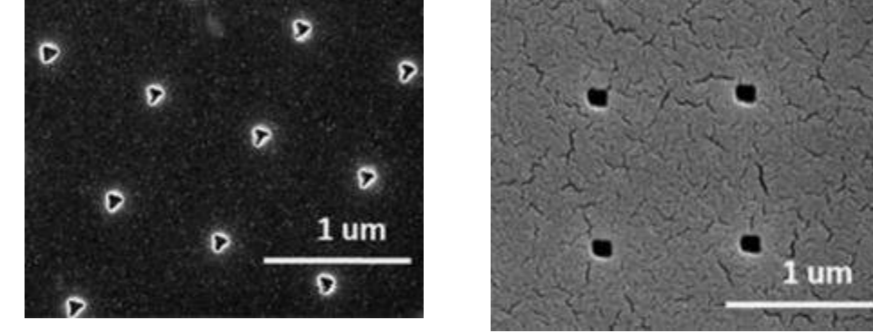


Форма пор зависит от ориентировки кристалла

## 2. Поры с некруговым поперечным сечением

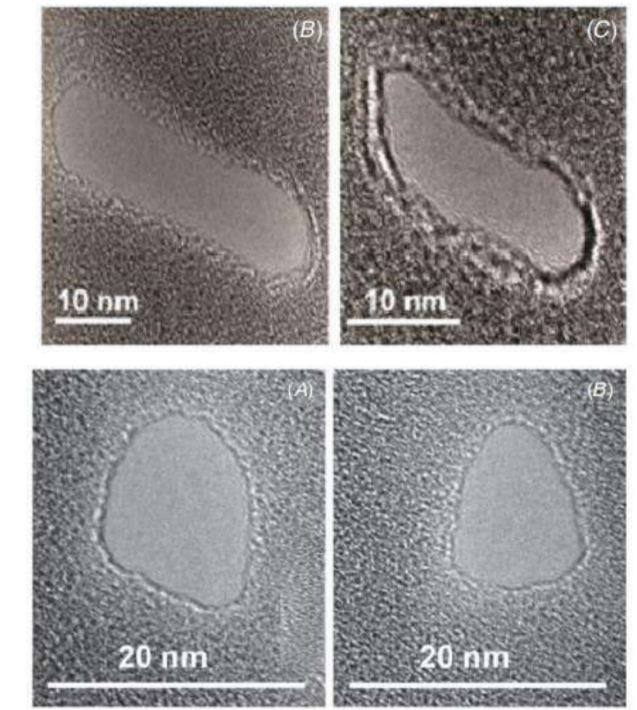
Синтез нанопор с некруговым поперечным сечением

Электронная нанолитография:



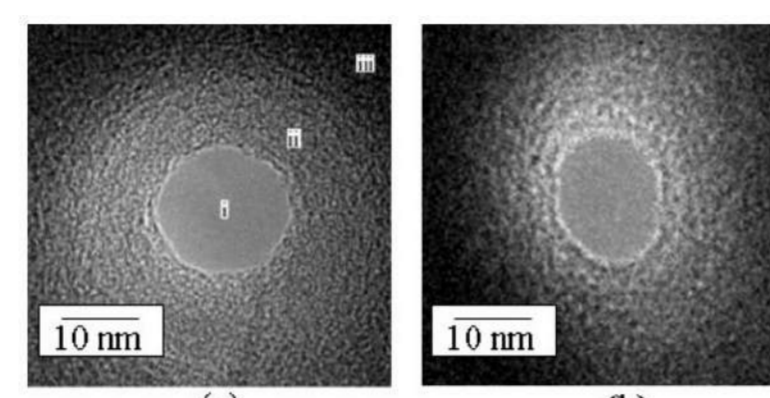
Lorenzo Bruschi et al., Langmuir, 34, 1, 106-114, (2018)

Просвечивающий электронный микроскоп:



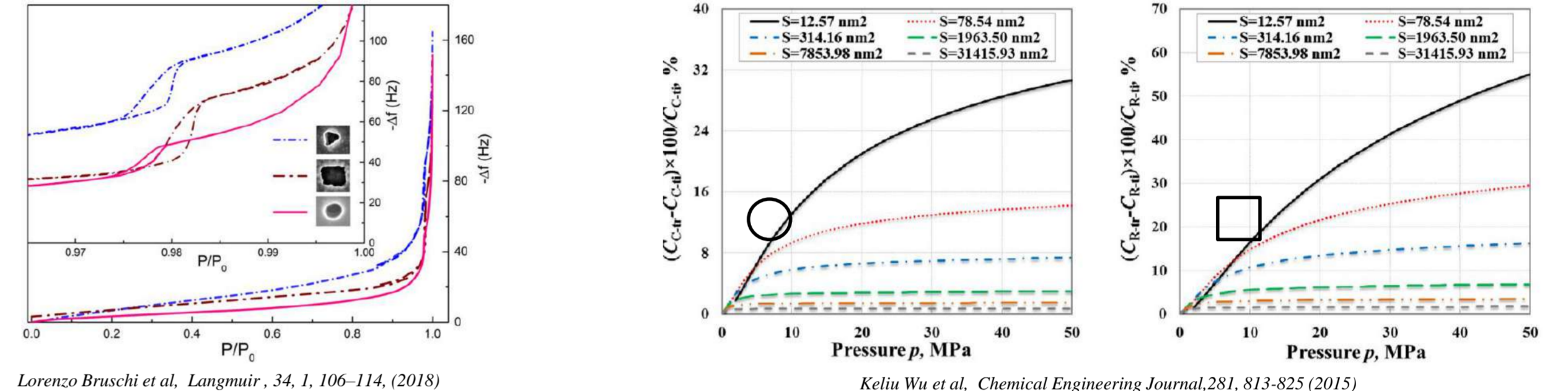
Shaurya Prakash et al., J. Micromech. Microeng. 22 067002 (2012)

Фокусированный ионный пучок



N. Patterson et al., Nanotechnology 19 235304 (2018)

Адсорбционные и транспортные свойства пор с различным сечением:



Lorenzo Bruschi et al., Langmuir, 34, 1, 106-114, (2018)

Keliu Wu et al., Chemical Engineering Journal, 281, 813-825 (2015)

Форма сечения пор играет существенную роль

## 4. Эксперимент

а) Образцы оливина были смонтированы в эпоксидную таблетку



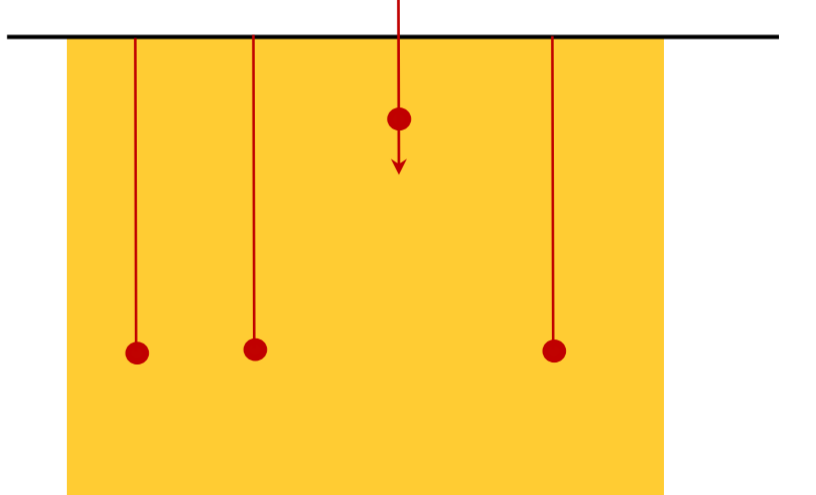
б) Полировка

- Алмазная паста (зерно ~1 мкм)
- Коллоидный кремний (зерно ~10 нм)



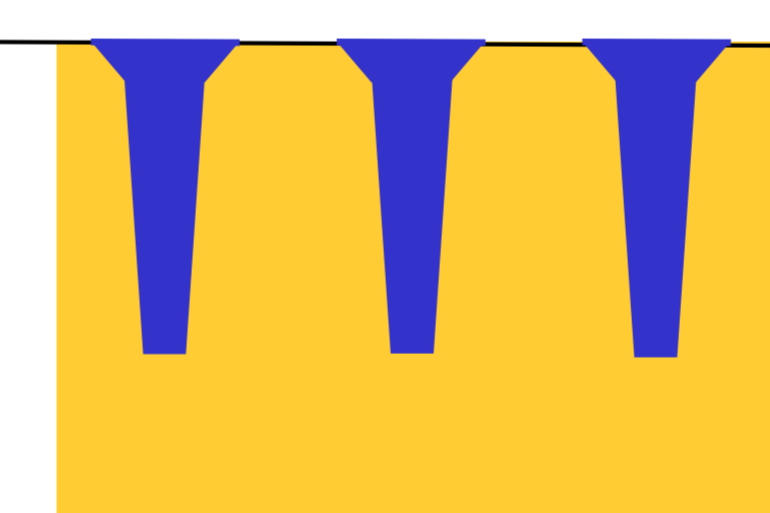
в) Облучение

- Ионы Au 11.4 МэВ/нукл

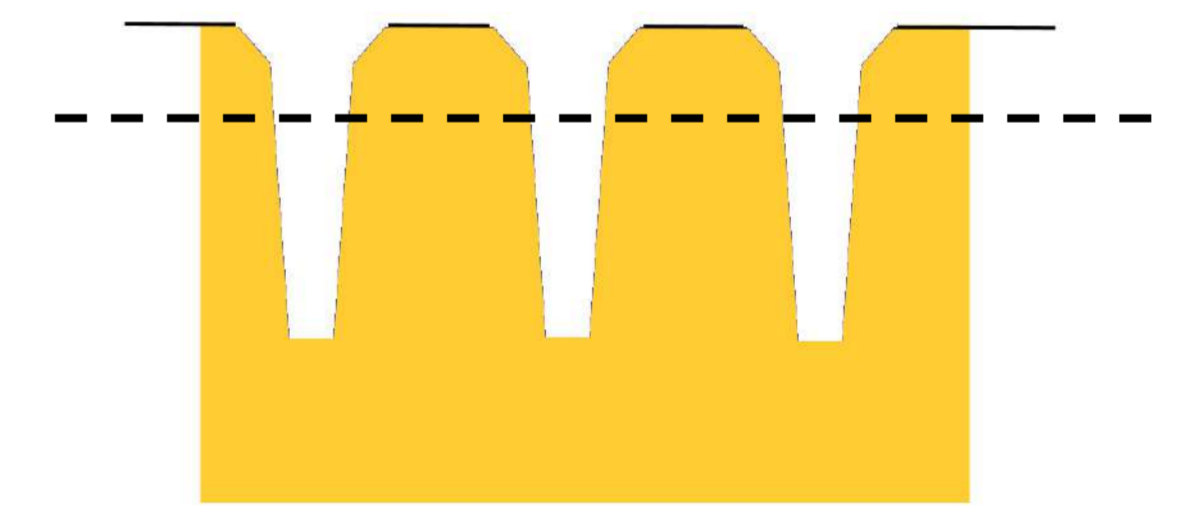


г) Травление

- WN-раствор: 40г ЭДТА, 1г щавелевая кислота, 1мл ортофосфорная кислота, 100мл вода



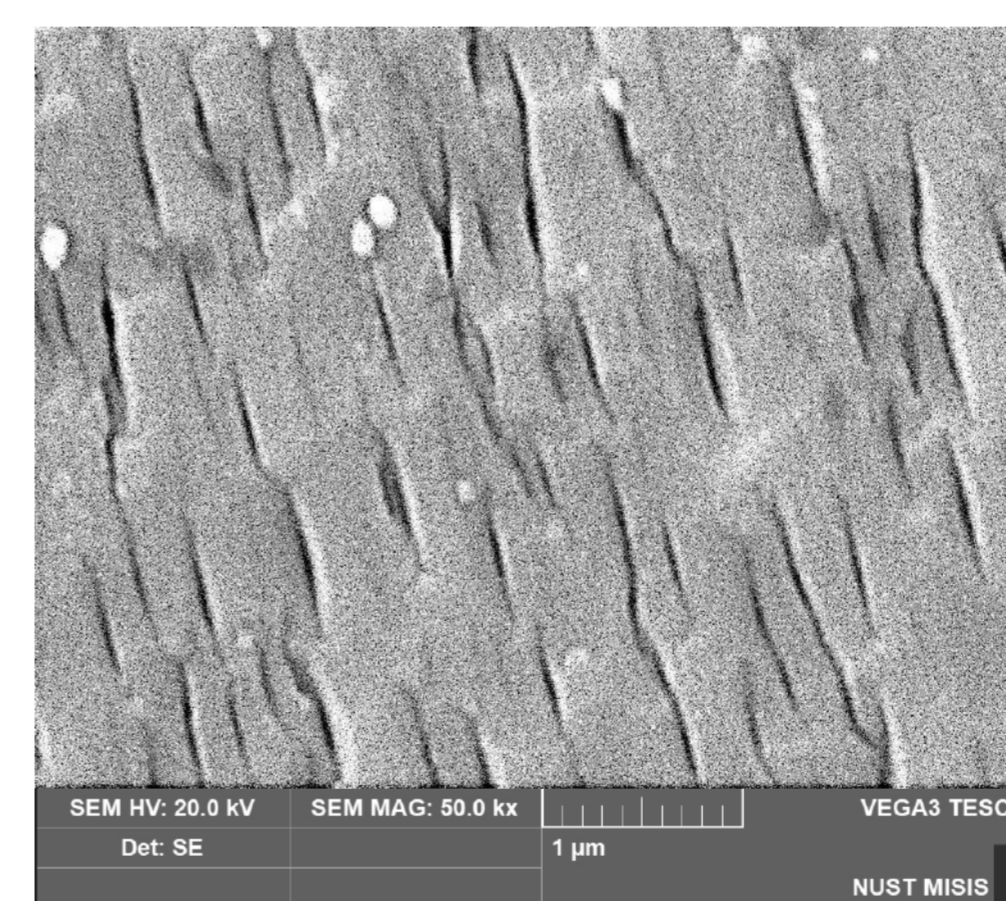
д) Повторная шлифовка. Срезаем слой 2 мкм, содержащий лунку травления



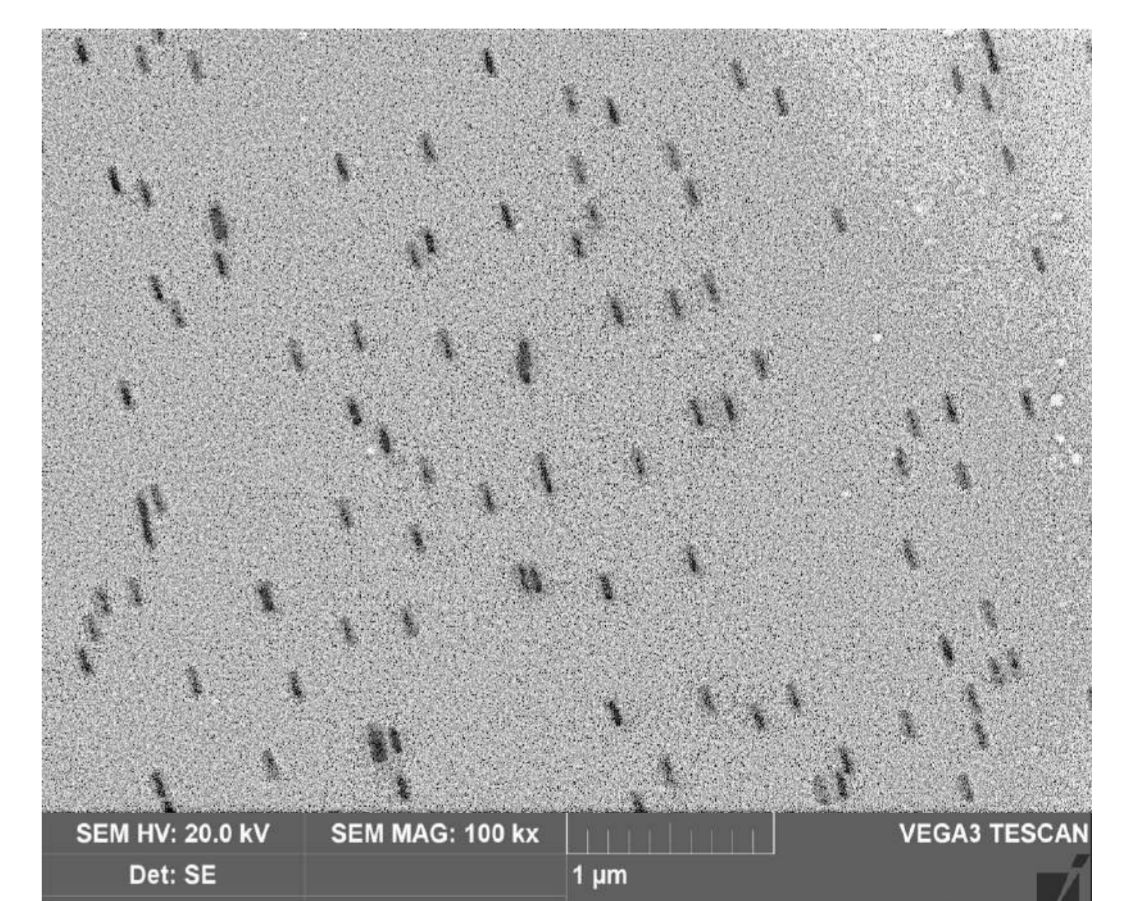
Результаты

Сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3

До повторной шлифовки

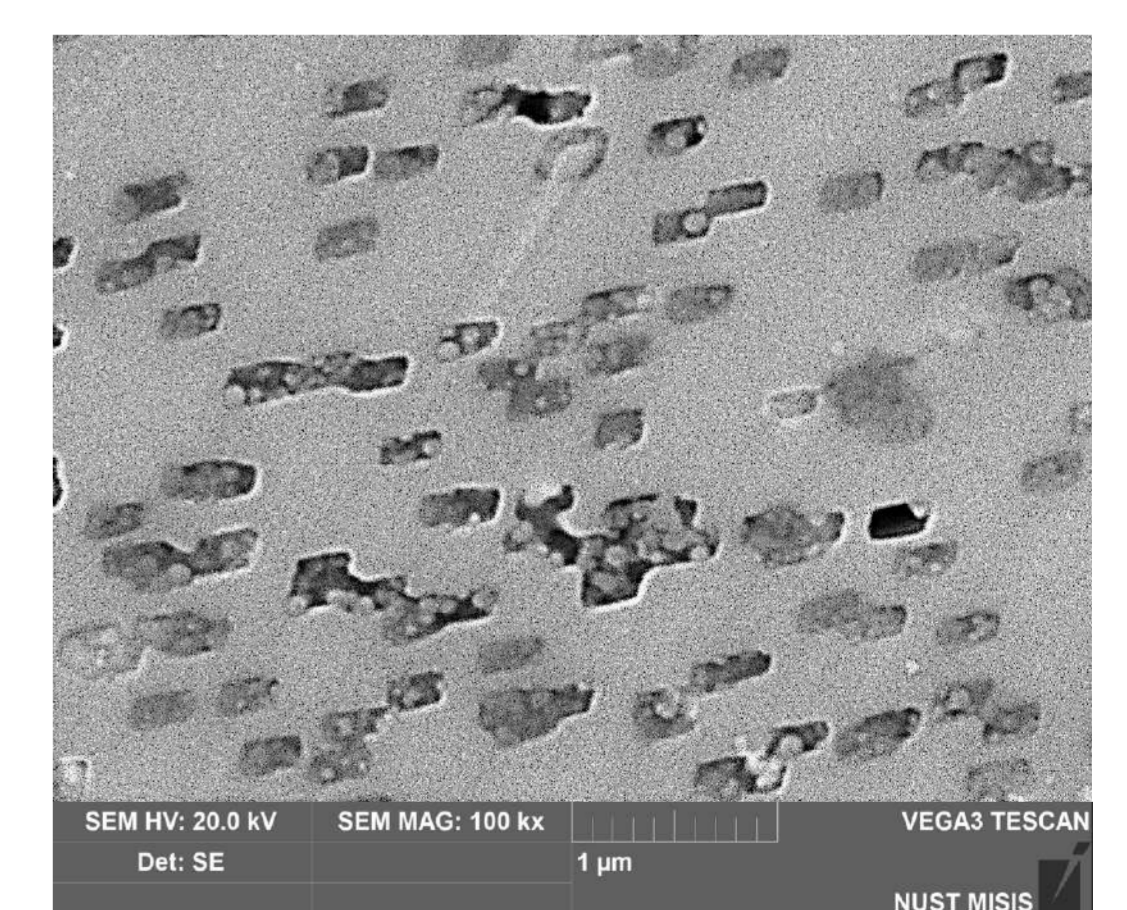
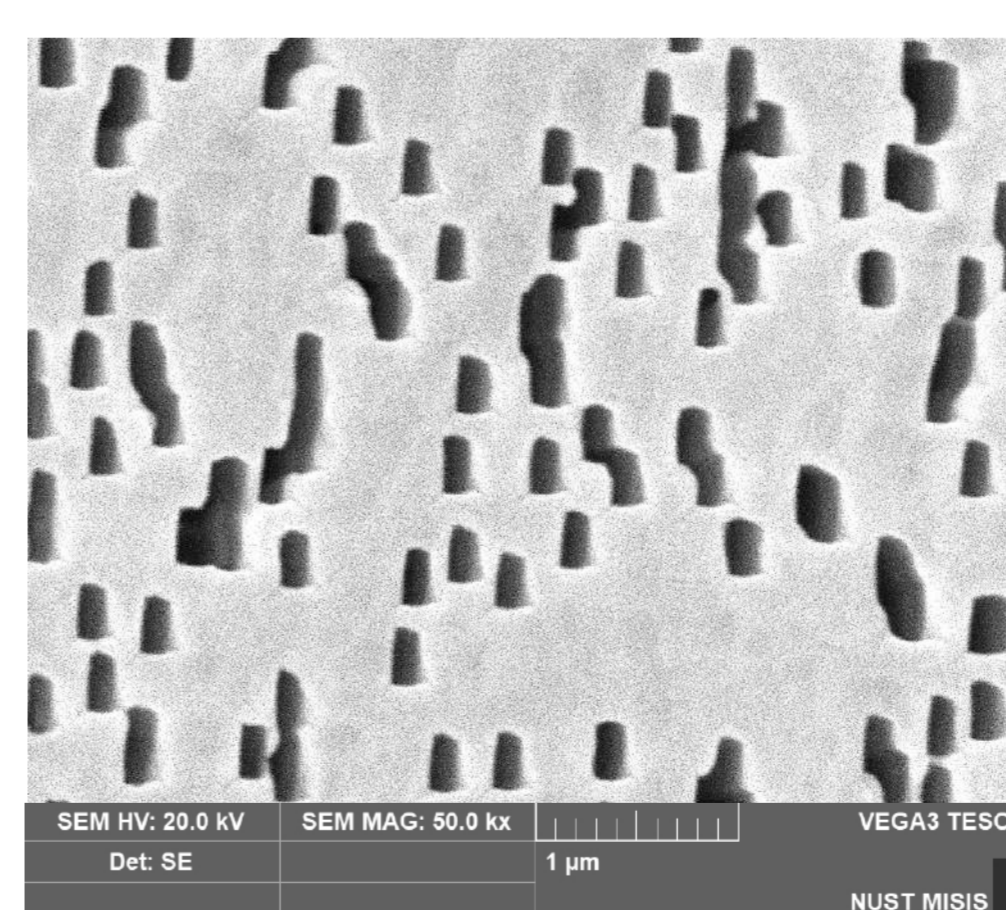


После повторной шлифовки



[100]

[010]



Форма, размер нанопоры и наличие лунки травления зависят от ориентировки кристалла

## Заключение

- Травление оливина, облученного быстрыми тяжёлыми ионами, может использоваться для синтеза нанопор с некруговым поперечным сечением
- Формой пор можно управлять, изменяя направление кристаллических осей оливина относительно налетающих ионов.
- В зависимости от ориентировки кристалла лунки травления может и не быть. После срезания слоя, содержащего лунку травления, поры становятся более однородными.

## Литература

- [1] S A Gorbunov et. al, 2017, J. Phys. D: Appl. Phys. 50 395306
- [2] S.A. Gorbunov, et. al, J. Phys. Chem. C 2023, 127, 10, 5090–5097
- [3] N. A. Medvedev, et. al, Journal of Applied Physics 133, 100701 (2023)