



Sputtering yield angular dependence in gallium focused ion beam milling of silicon dioxide

A.V. Rummyantsev, N.I. Borgardt, R.L. Volkov

National Research University of Electronic Technology «MIET», Moscow, Zelenograd

Распыление SiO_2 фокусированным ионным пучком

Фокусированный ионный пучок (ФИП) является хорошо зарекомендовавшим себя методом наноструктурирования поверхности различных материалов. Его дальнейшее развитие требует усовершенствования подходов для моделирования эволюции рельефа образца при воздействии ионов и расширения круга веществ, для которых возможно такое моделирование.

Особенный интерес представляет моделирование распыления диоксида кремния SiO_2 в связи с приложениями ФИП для модификации интегральных микросхем, изготовлении наноструктур и создании устройств фотоники.

Постановка задачи

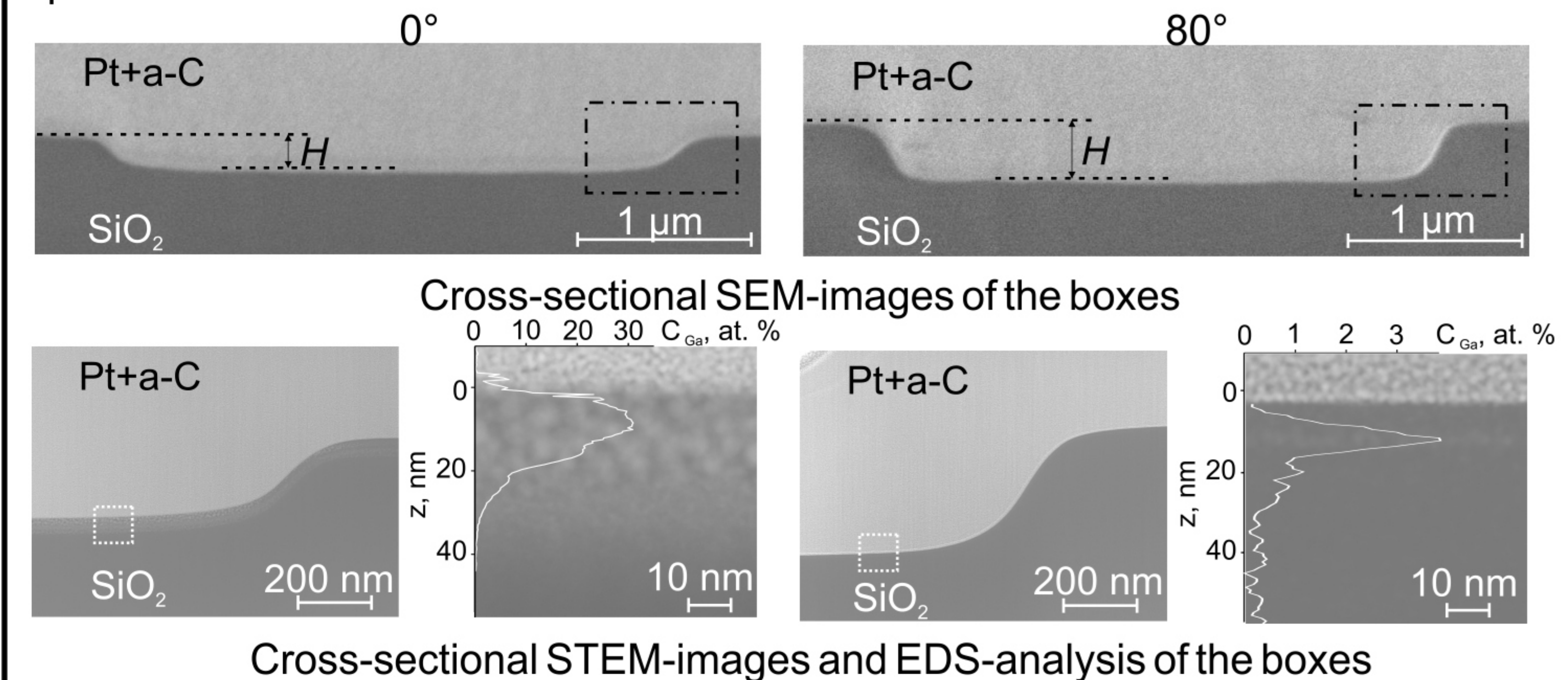
Цель работы: количественное описание эволюции поверхности при воздействии фокусированного пучка ионов галлия на термический диоксид кремния на основе найденной угловой зависимости коэффициента распыления

Поставленные задачи:

- экспериментально определить угловую зависимость коэффициента распыления диоксида кремния, исследовать тестовые структуры методом просвечивающей электронной микроскопии
- провести расчеты коэффициента распыления методом Монте-Карло
- с использованием найденной зависимости провести моделирование эволюции поверхности образца методом функций уровня
- сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными

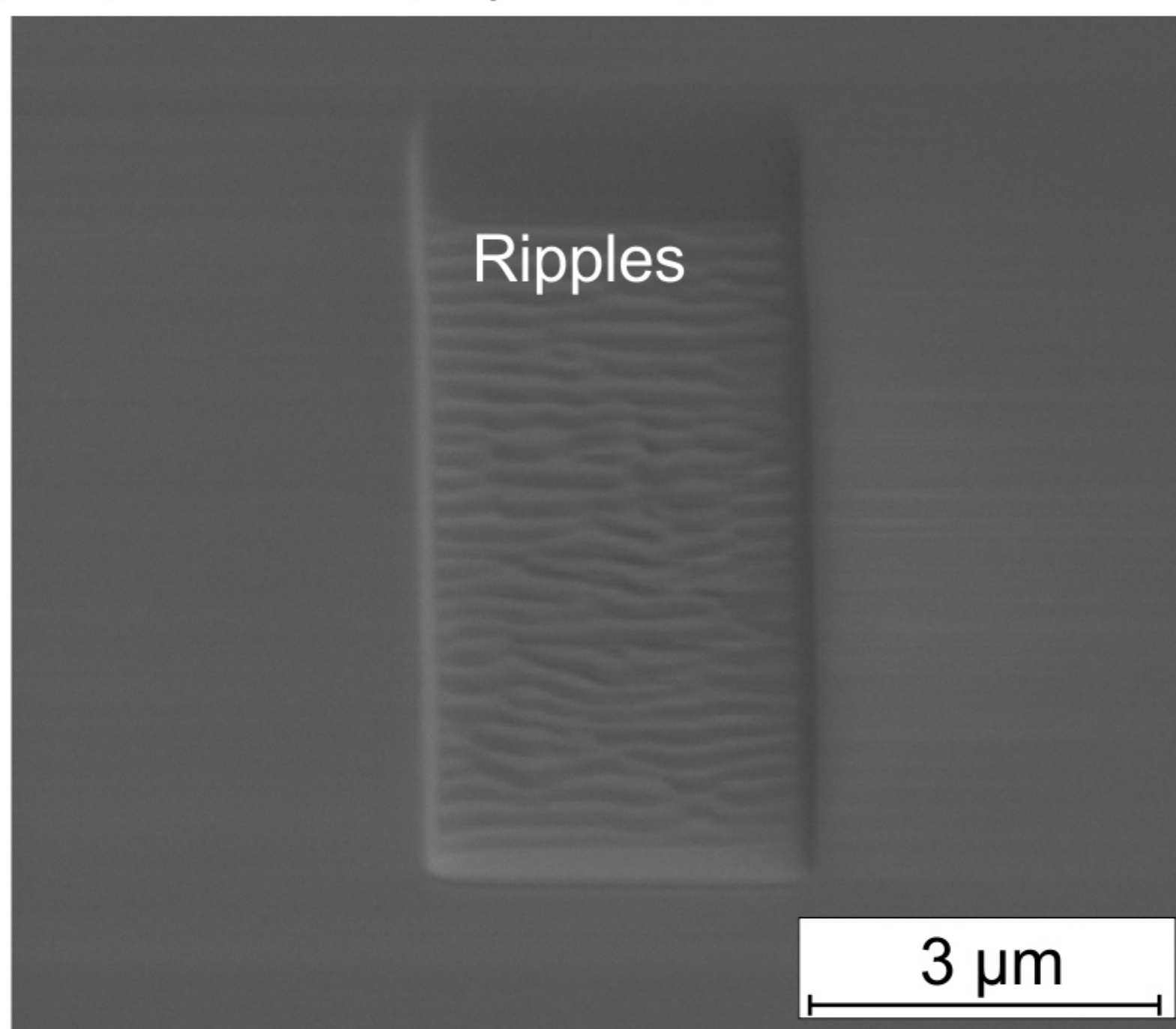
Подготовка и исследование образцов

Эксперименты проводились на электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 650 при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка 900 пА. В качестве подложки использовался термический диоксид кремния. Сканирование пучка выполнялось по прямоугольному шаблону размером $3 \times 3 \text{ мкм}^2$ и варьировался угол падения пучка. Доза ионов при нормальном падении составляла приблизительно $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

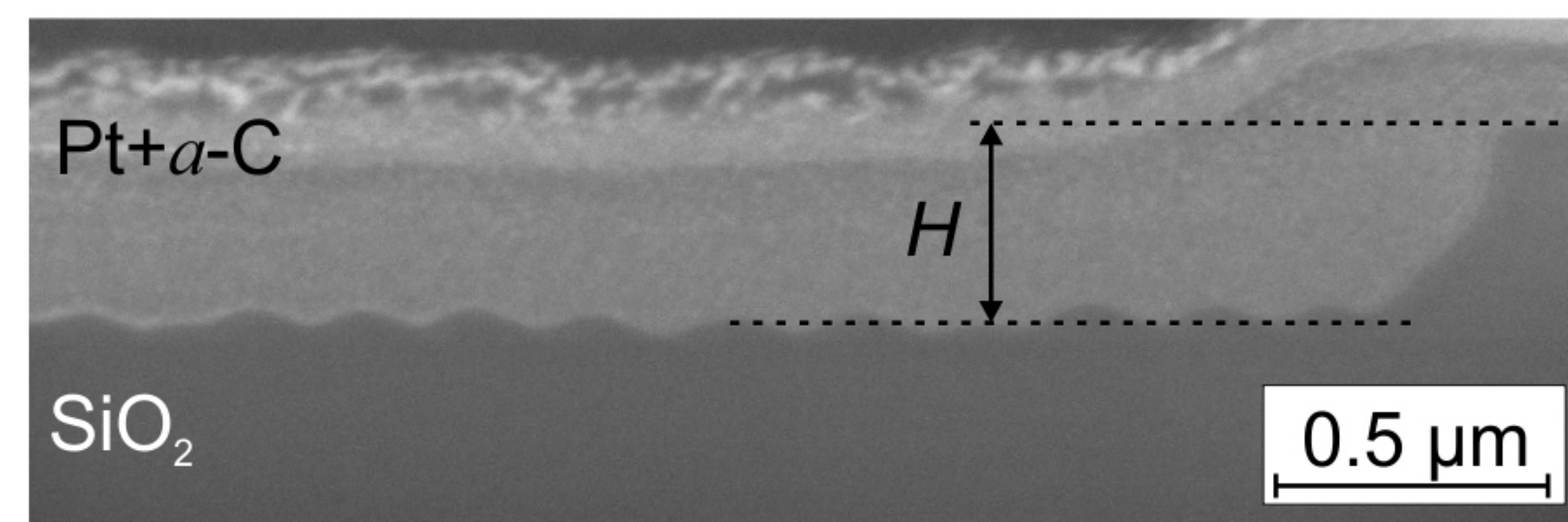


Самоорганизация рельефа при ионной бомбардировке

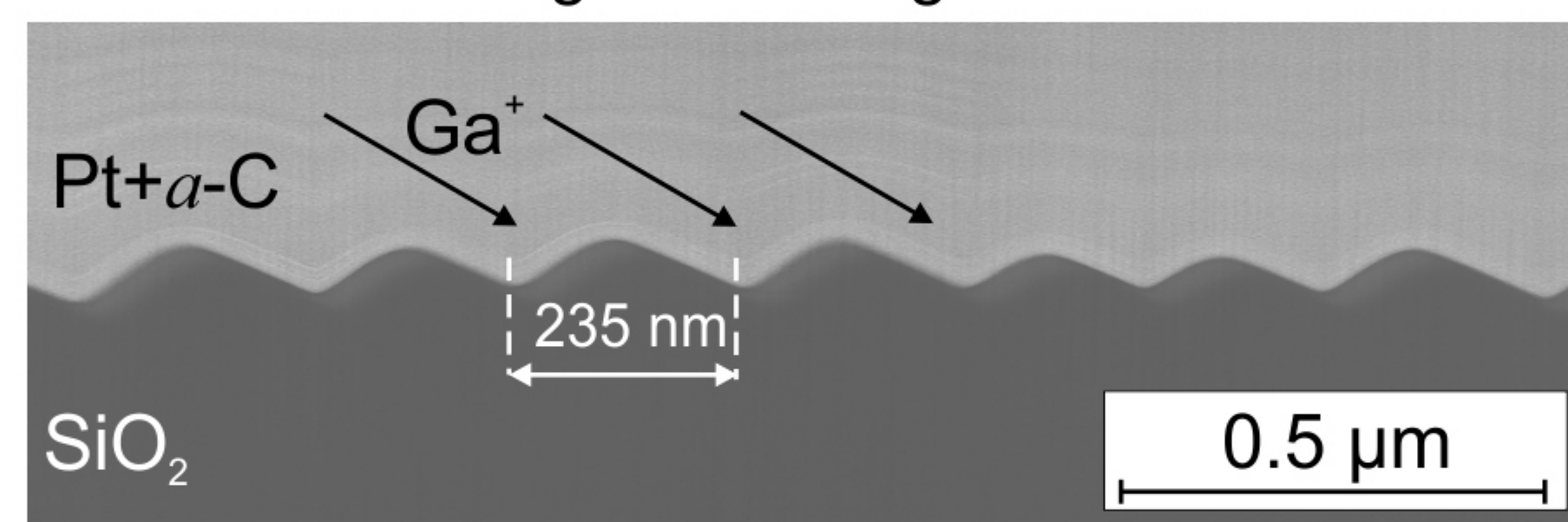
При углах падения примерно от 40° до 70° на облучаемой поверхности формируется ярко выраженный рельеф в виде ряби. На рисунках показано углубление, сформированное при угле падения ионов 60° . Период структур составляет примерно 235 нм, концентрация галлия имеет максимальное значение 15 ат. %.



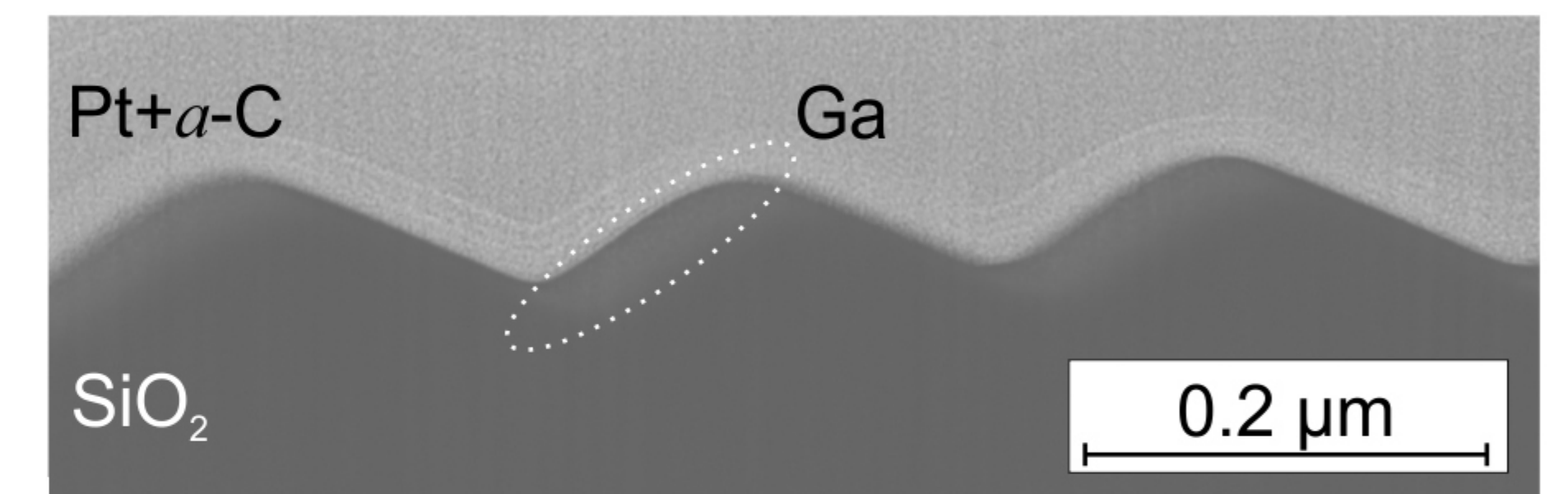
Planar SEM-image of the fabricated box



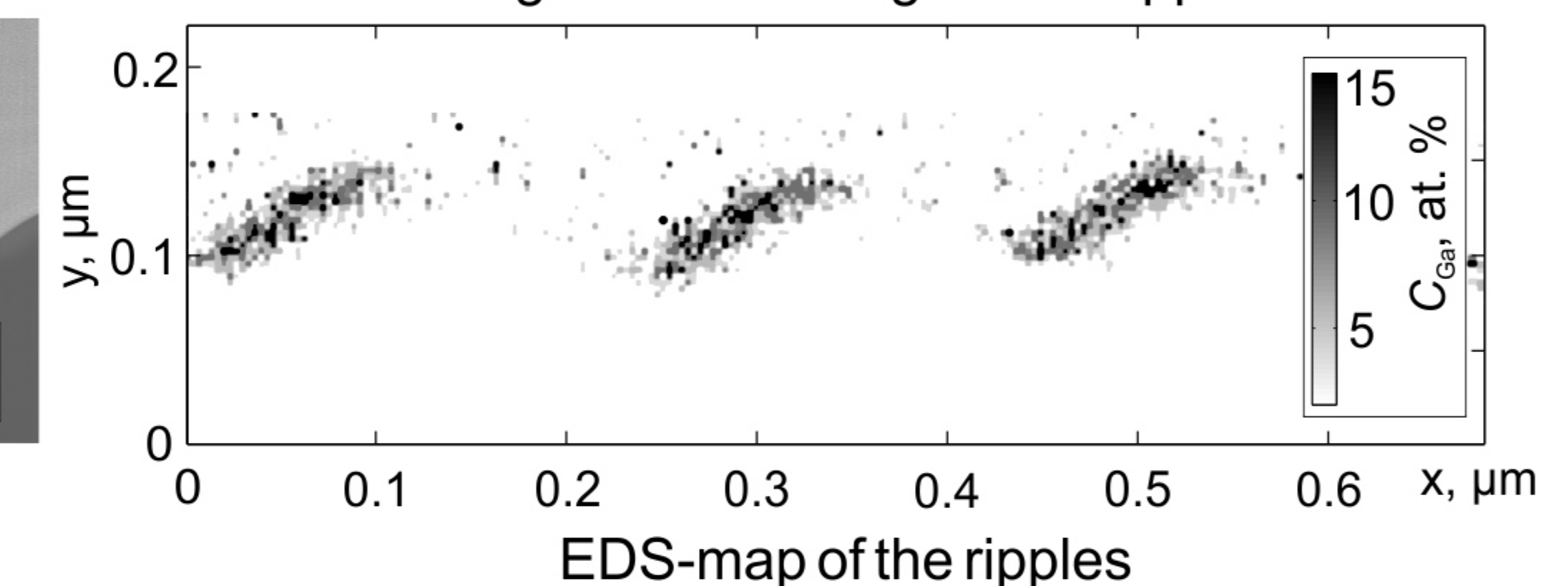
SEM-image of the longitudinal section



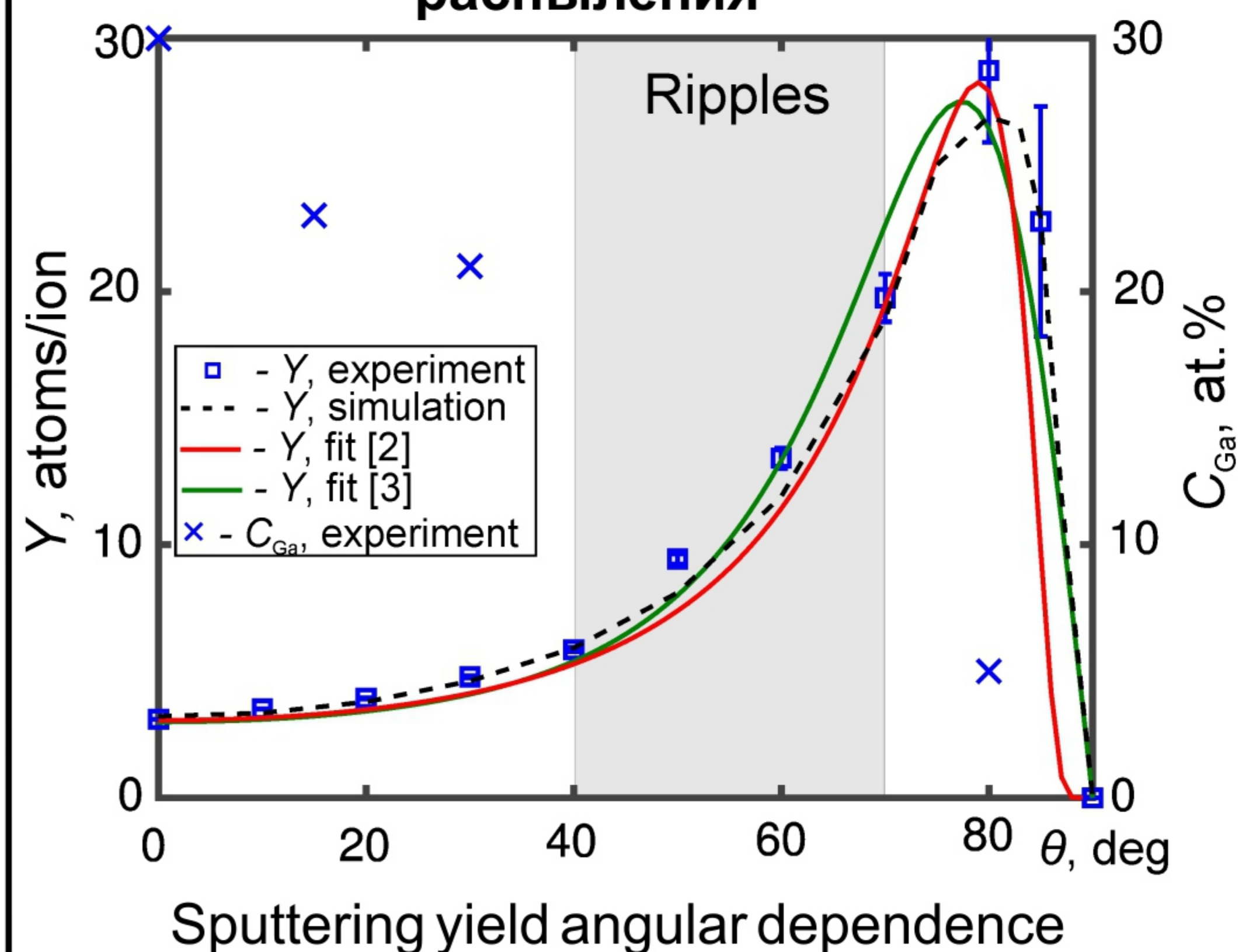
STEM-image of the longitudinal section



Enlarged STEM-image of the ripples

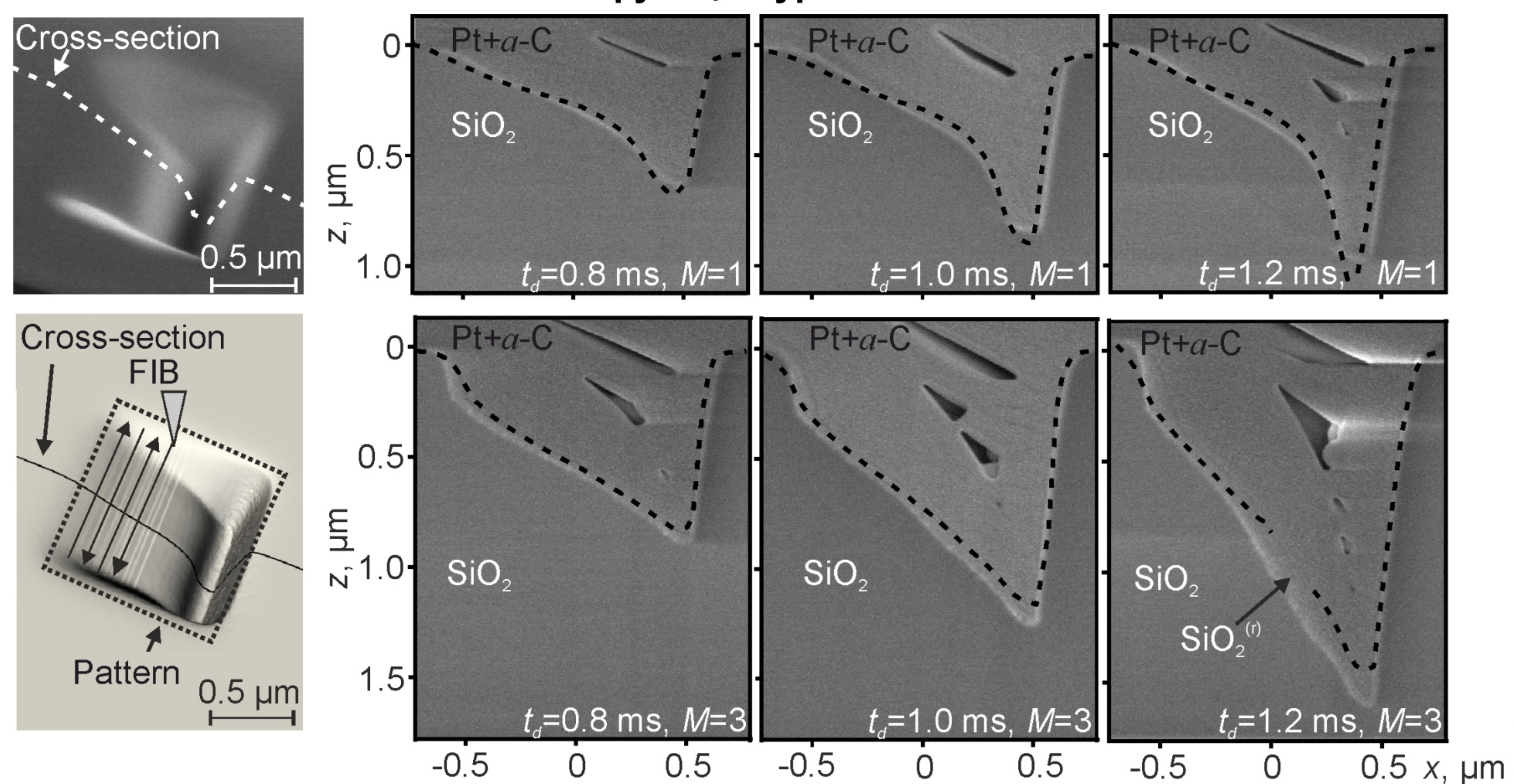


Угловая зависимость коэффициента распыления



Совокупность полученных экспериментальных данных по зависимости коэффициента распыления от угла падения ионов представлена на рисунке. Также приведены результаты расчетов методом Монте-Карло в пакете SDTrimSP [1] и экспериментально найденные значения пиковой концентрации галлия. Видно, что моделирование с высокой точностью повторяет экспериментальные результаты. Полученные зависимости аппроксимировались с помощью известных из литературы формул [2] и [3]. Пиковая концентрация галлия падает с увеличением угла падения ионов и при скользящих углах составляет менее 5 ат. %.

Моделирование эволюции поверхности методом функций уровня



Comparison of level-set method simulations and cross-sectional SEM-images

Для тестирования угловой зависимости коэффициента распыления диоксида кремния для всех значений θ выполнялись численные расчеты формирования структур методом функций уровня [4]. Для сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными моделировались и изготавливались структуры с наиболее сложной для вычислений формой [5, 6], получаемой за 1 цикл сканирования пучка по шаблону. Размер углублений и одинаковый шаг пучка в двух ортогональных направлениях составлял $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ и 38.5 нм соответственно. Значения времени остановки равнялись 0.8 мс, 1.0 мс и 1.2 мс. Поперечные сечения структур изучались методом РЭМ при ускоряющем напряжении 1 кВ.

Список литературы

- 1.) H. Hofsäss, K. Zhang, A. Mutzke, Appl. Surf. Sci. 310 (2014) 134.
- 2.) Y. Yamamura, S. Shindo, Radiation effects 80 (1984) 57.
- 3.) Wei, Q., et. al. Journal of Physics D: Applied Physics 41(2008) 172002.
- 4.) F. Gibou, R. Fedkiw, S. Osher, J. Comput. Phys. 353 (2018) 82.
- 5.) H.B. Kim, et. al. Nanotechnology 18 (2007) 245303.
- 6.) Н.И. Боргардт и др. Письма в ЖТФ 41 (2015) 97.

Выводы

В работе была экспериментально определена угловая зависимость коэффициента распыления при бомбардировке поверхности диоксида кремния ионами галлия. Установлено, что полученные результаты находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов методом Монте-Карло. Моделирование эволюции поверхности при распылении методом функций уровня показало количественное согласие профилей расчетных структур с соответствующими экспериментальными микрофотографиями.