

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ВОЛНООБРАЗНОГО РЕЛЬЕФА
НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОННЫМ ПУЧКОМ ГАЛЛИЯ**

**В.И. Бачурин, Л.А. Мазалецкий,
Д.Э. Пухов, М.А. Смирнова,
А.Б. Чурилов, А.С. Рудый**



ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ
НАУЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ
«Диагностика микро- и наноструктур»



**ЯФ ФТИАН
им. К. А. Валиева РАН**

www.yf-ftian.ru



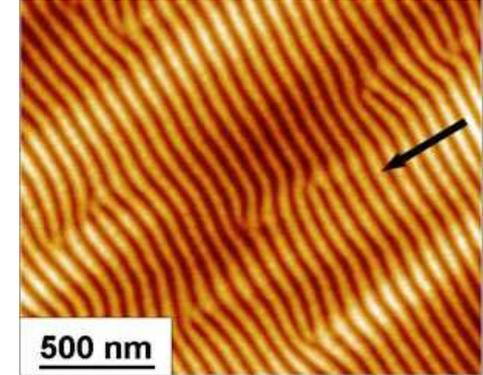
**50-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия
Заряженных Частиц с Кристаллами**

Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 25-27 мая 2021 г.



МОТИВАЦИЯ

Волнообразный рельеф (рипплы)



Обзор экспериментальных и теоретических работ

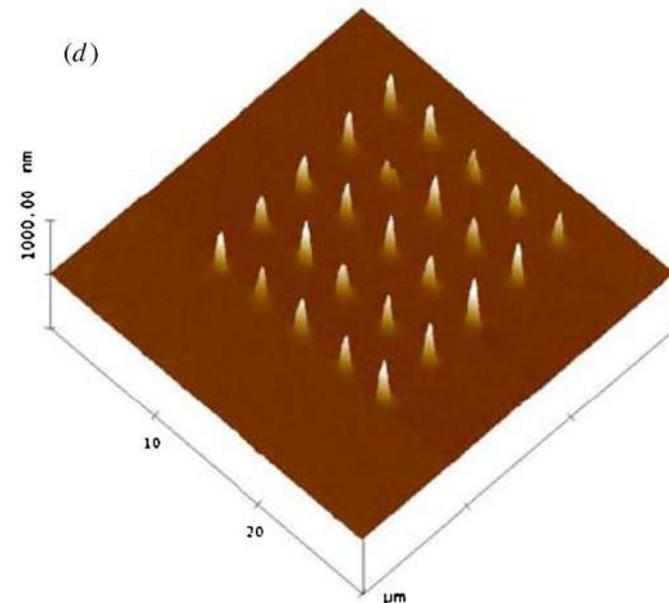
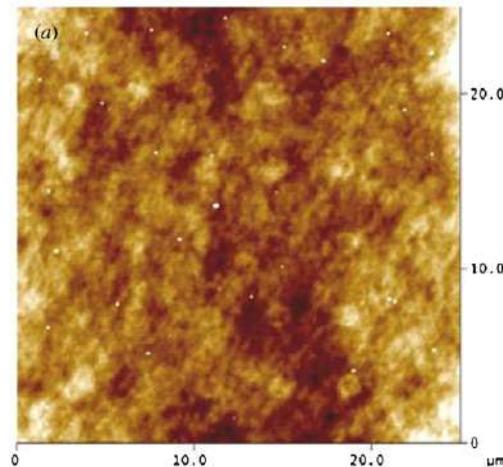
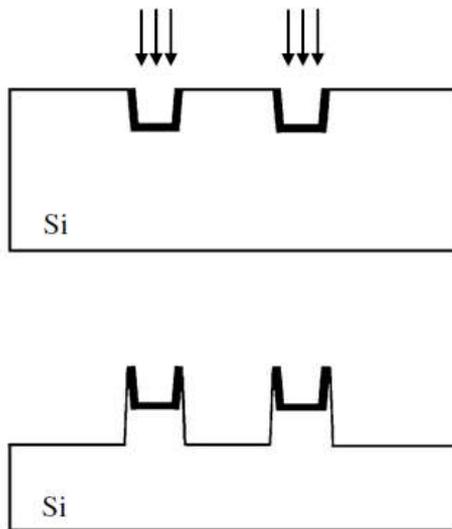
- Makeev M. A., Cuerno R. and Barabasi A. 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **197** 185
- Munoz-Garcia J., Vazquez L., Castro M., Gago R., Redono-Cubero A., Moreno-Barrado A. and Cuerno R. 2014 *Mater. Sci. & Eng. R* **86** 1

Глубина зарождения ВР

$\text{Ar}^+ - \text{Si}$ $\varphi \sim 10^{19}$ ион/см² $\text{O}_2^+ - \text{Si}$ $\varphi \sim 10^{18}$ ион/см² $\text{N}_2^+ - \text{Si}$ $\varphi \sim 10^{17}$ ион/см²



➔ Почему ионы Ga?



- Habenicht S., Lieb K. P., Koch J. and Wieck A. D. 2002 Phys. Rev B **65** 115327
- Qian H X and Znou W 2012 Mater. Letters **77** 1
- H. Gnaser, B. Reuscher, A. Zeuner 2012 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **285** 142
- D.P. Adams, M.J. Vasile, T.M. Mayer and V.C. Hodges 2003 JVST B **21** 2334



➔ ЭКСПЕРИМЕНТ

Quanta 3D 200i

30 кэВ Ga⁺—Si (100)

$\Phi = 2 \cdot 10^{17} - 4 \cdot 10^{18}$ ион/см²

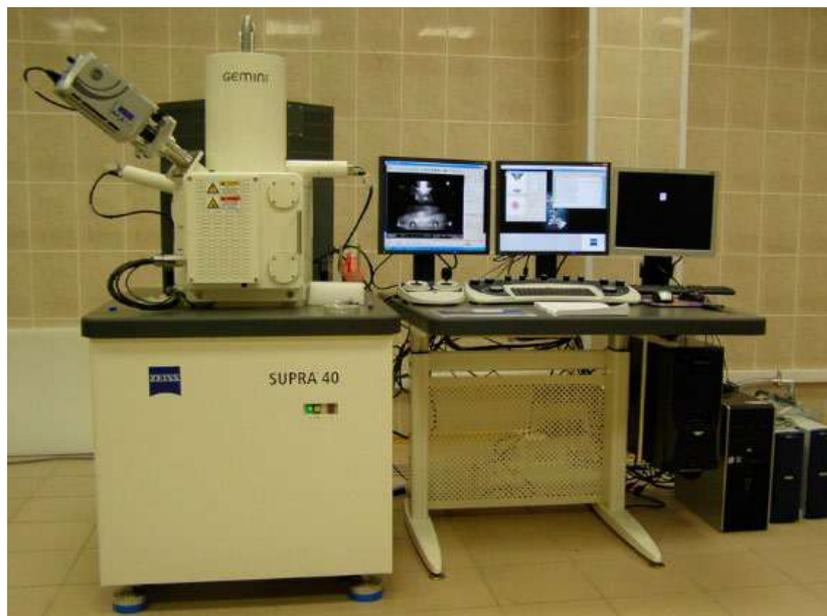
$\Theta = 0 - 50^\circ$



Supra 40

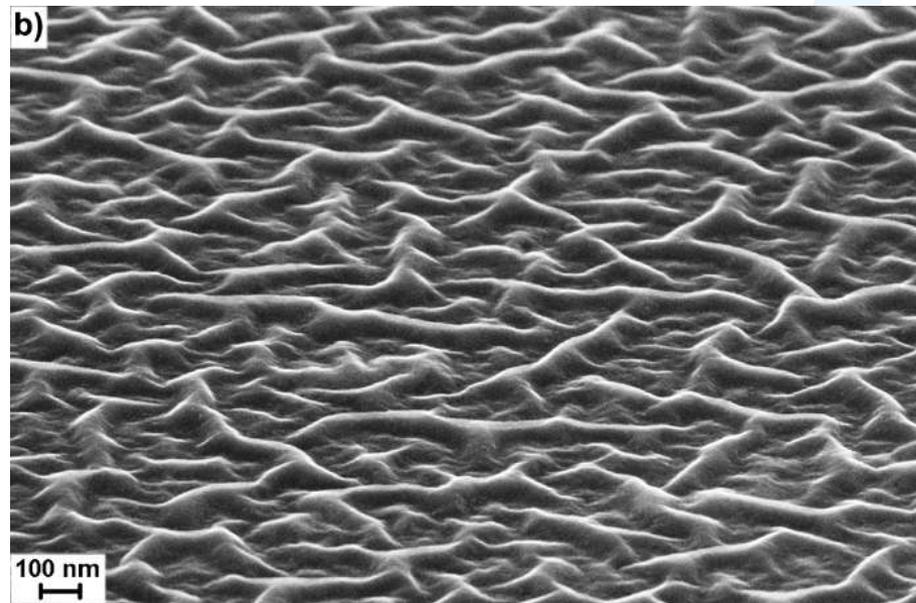
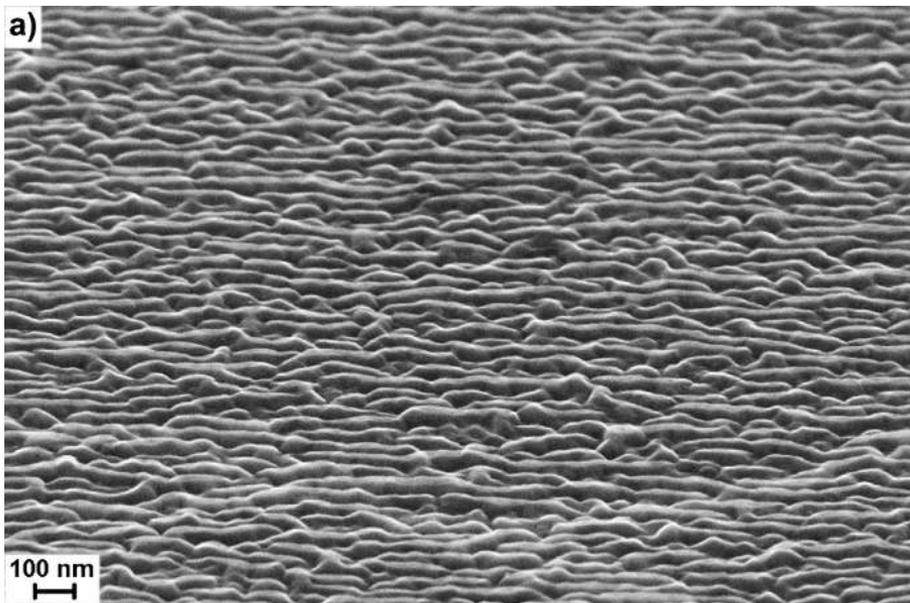
E=20 кэВ

$\Theta = 0 - 50^\circ$





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

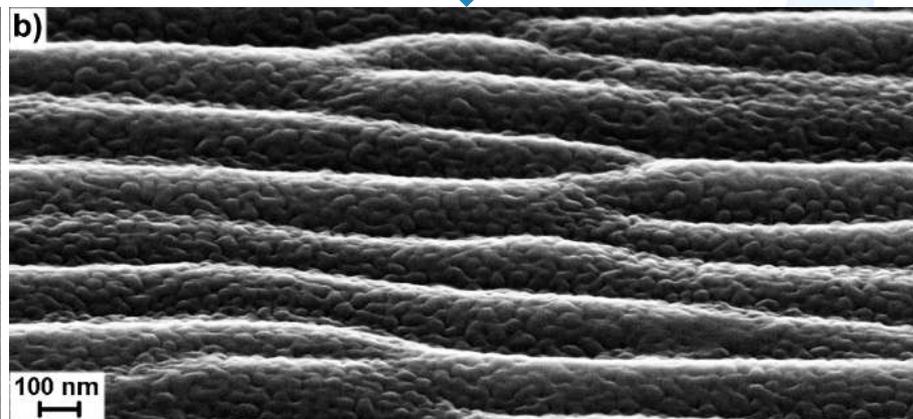
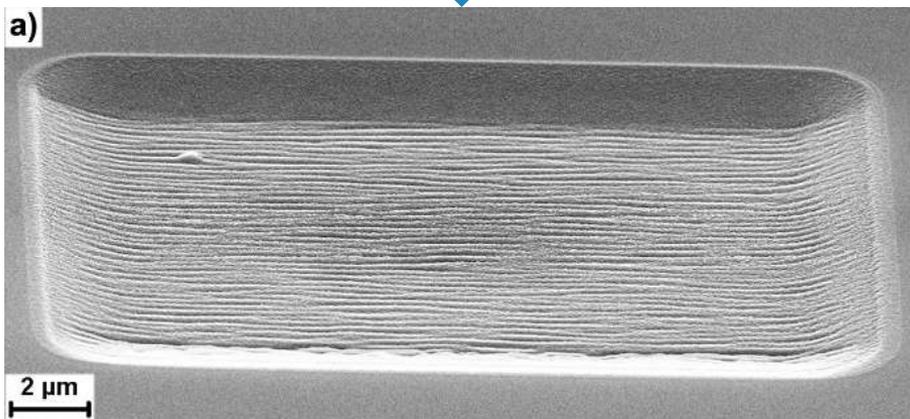


Изображения поверхности Si, облученного при угле падения ионного пучка 25° с дозами: а) $4 \cdot 10^{17}$ и б) $6 \cdot 10^{17}$ ион/см²





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

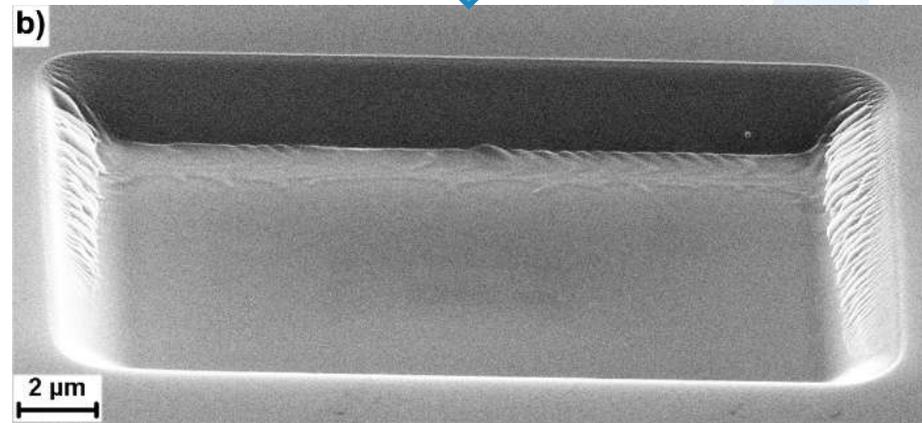
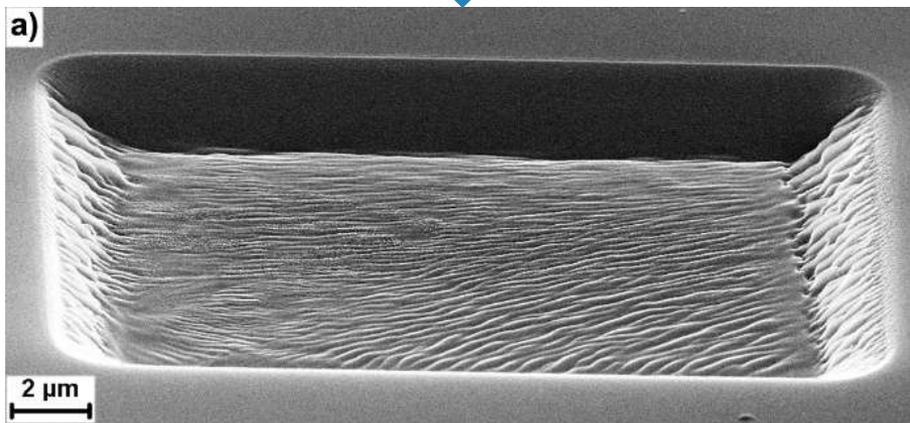


Изображение ВР на поверхности Si. Угол падения 30° , доза облучения 10^{18} ион/см². Стрелка указывает направление ионного пучка





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

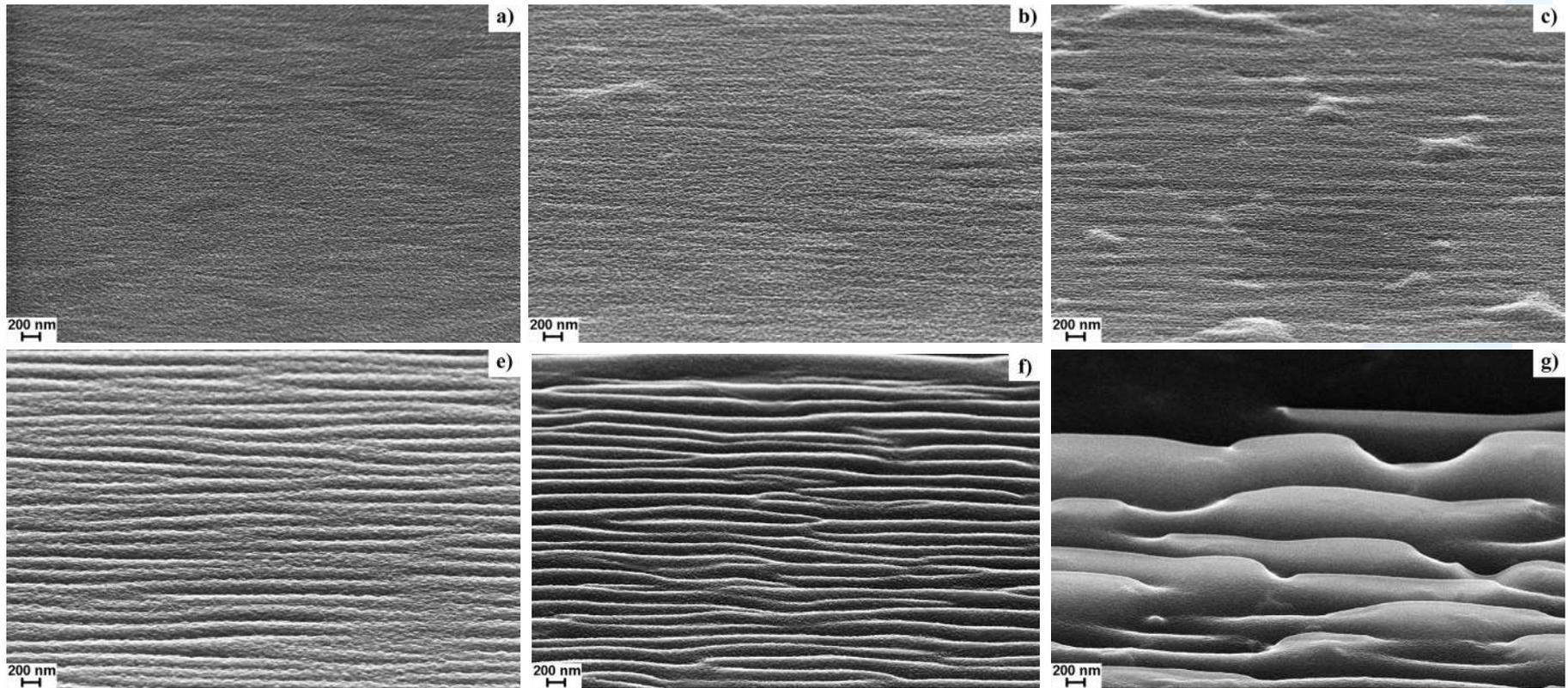


Электронно-микроскопические изображения поверхности Si, облученные под углами 35° (a) и 40° (b) с дозой $2 \cdot 10^{18}$ ион/см². Стрелка указывает направление ионного пучка.





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

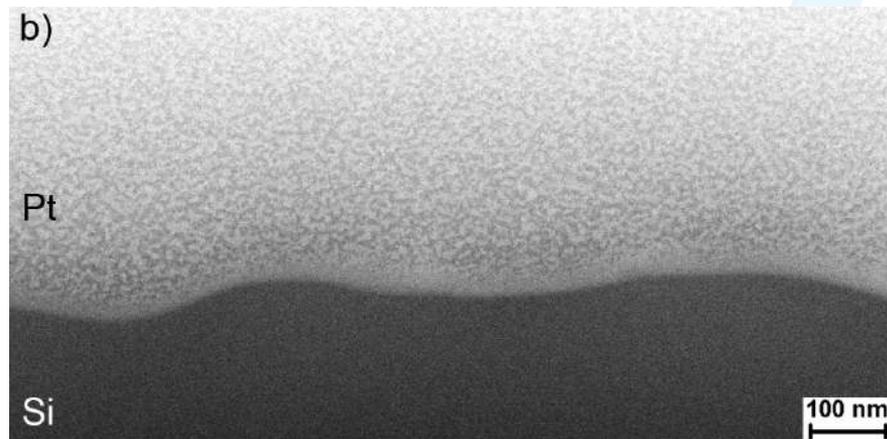
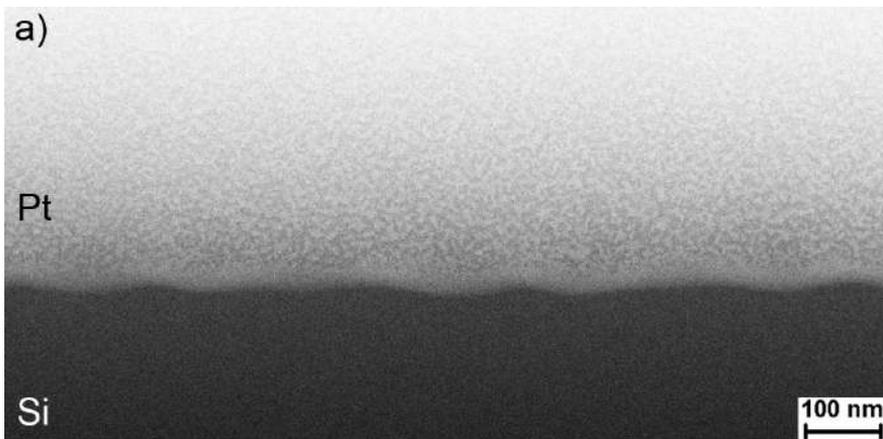


Электронно-микроскопические изображения поверхности Si, облученные под углами 30° а) $2 \cdot 10^{17}$, б) $4 \cdot 10^{17}$, в) $6 \cdot 10^{17}$, д) 10^{18} , е) $2 \cdot 10^{18}$, г) $4 \cdot 10^{18}$ ион/см²





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



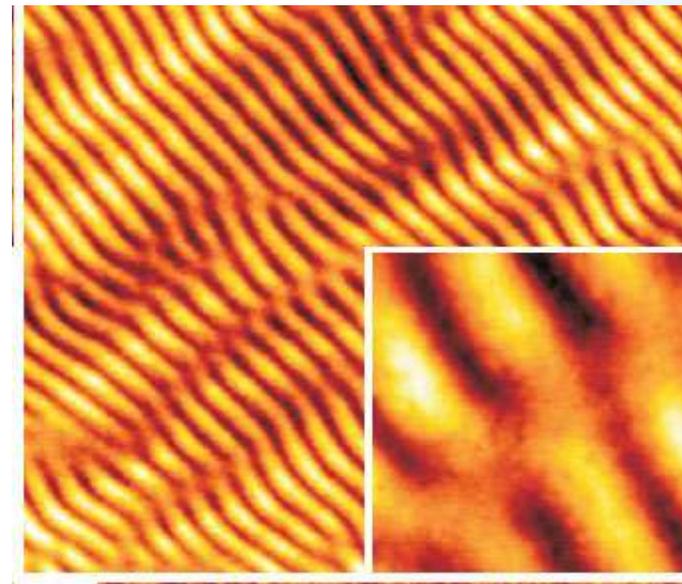
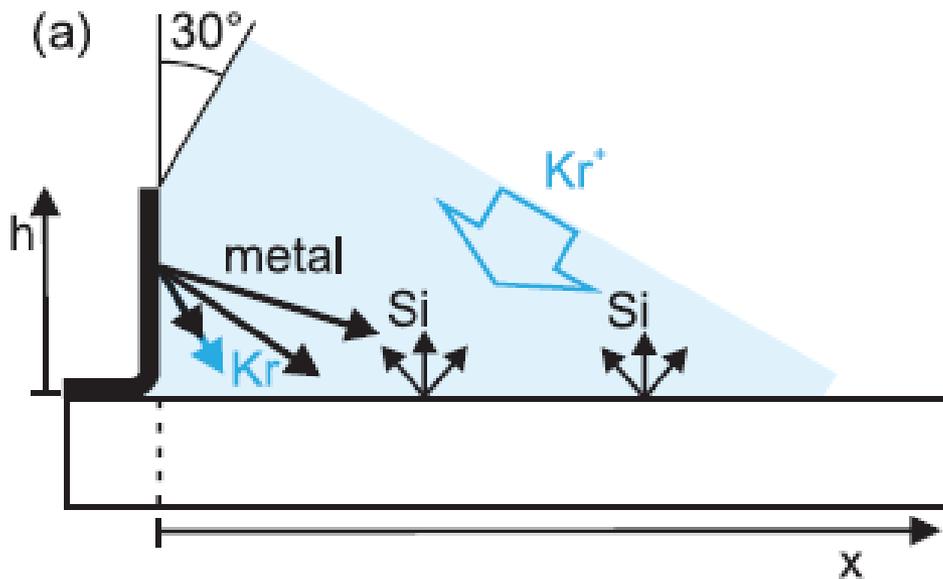
Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения рельефа полученного на поверхности Si облученного под углом 30° с дозами а) $4 \cdot 10^{17}$ и б) $2 \cdot 10^{18}$ ион/см²



➔ ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

$$\frac{\partial h(x, y, t)}{\partial t} = S_x(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + S_y(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} - B \nabla^4 h + \xi(x, t)$$

R. M. Bradley and J. M. E. Harper, J. Vac. Sci. Technol. A 6, 2390 (1988)

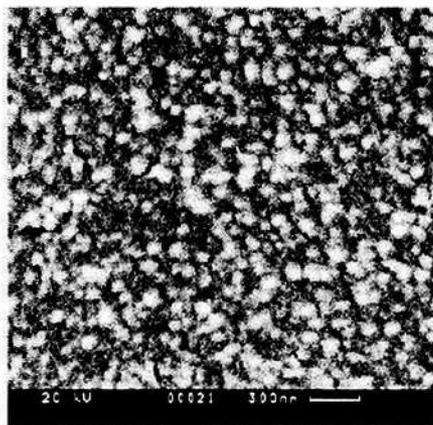


Martin Engler etc. Nanotechnology 25 (2014) 115303

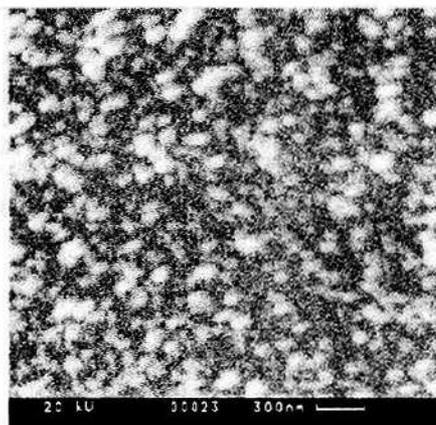




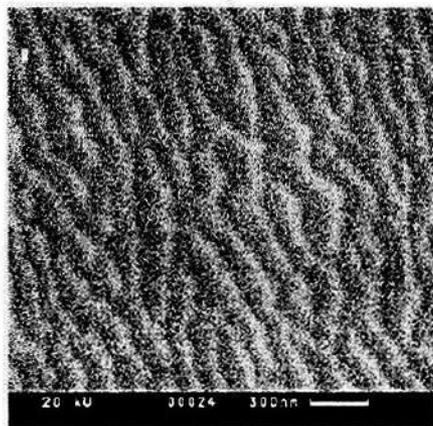
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ



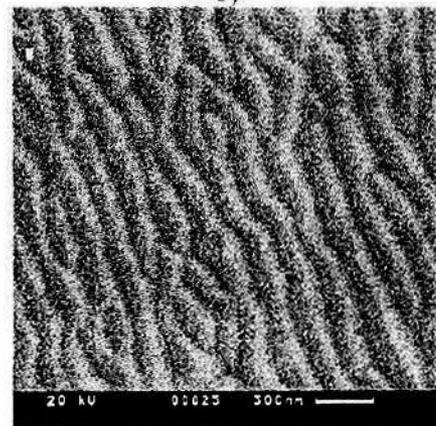
а)



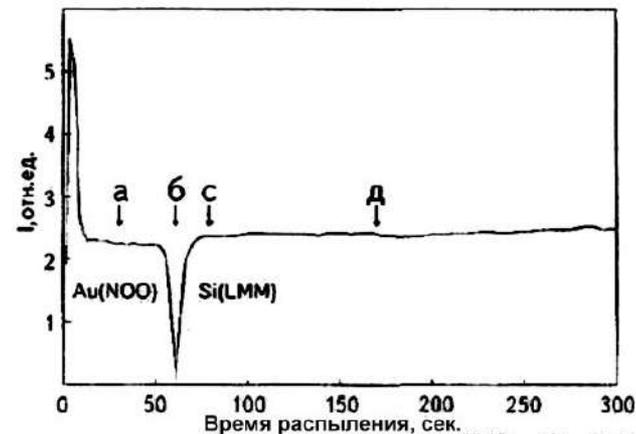
б)



с)



д)



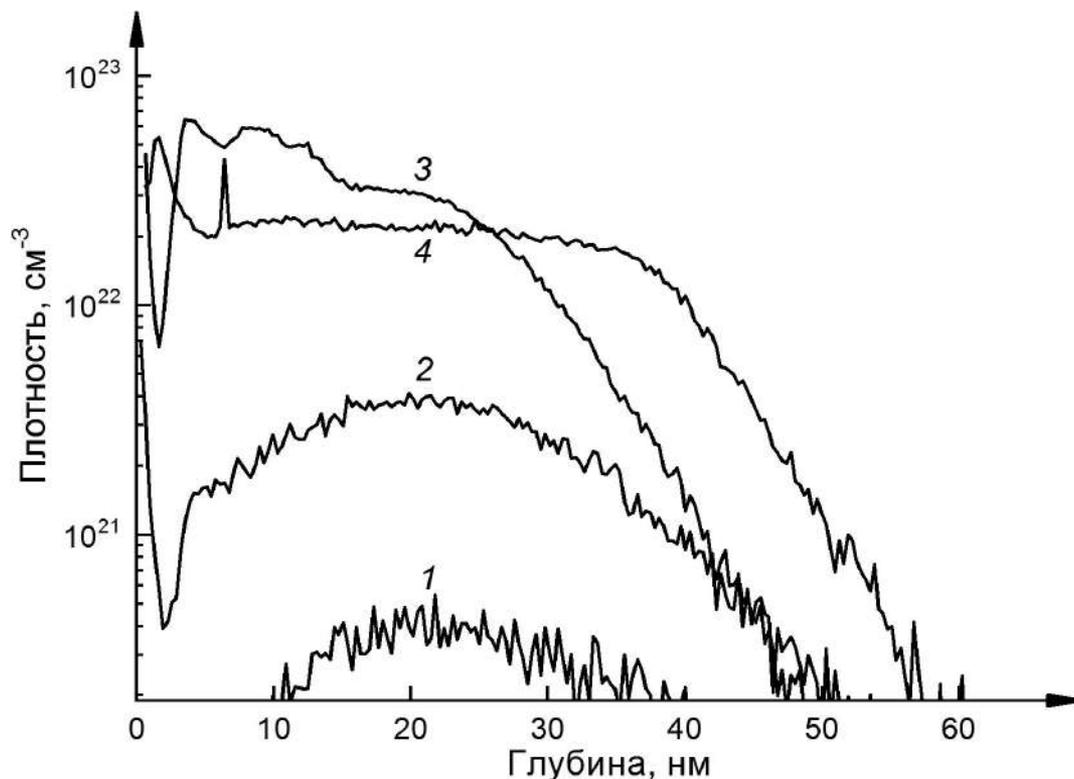
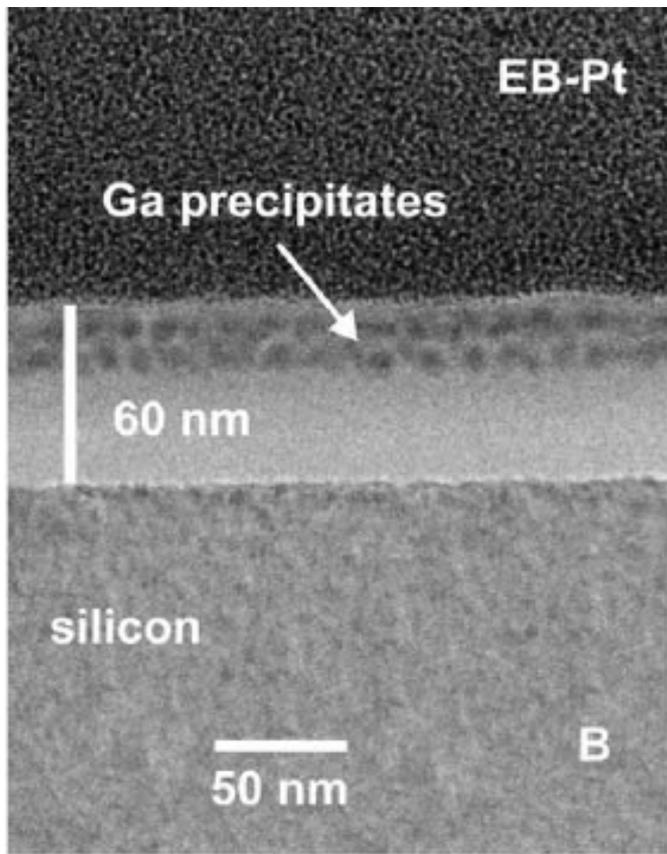
Электронно-микроскопическое изображение поверхности кремния на глубинах распыления, отмеченные стрелками на зависимости интенсивности Оже-сигналов от времени распыления

Smirnov V.K., Kibalov D.S., Lepshin P.A., Bachurin V.I. // Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz., 2000, vol. 64, no. 4, p. 626.





ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ



Послойные профили плотности галлия, полученные методом ВИМС. Дозы облучения Si пучком ионов Ga⁺ с энергией 30 кэВ: 1 – 10¹⁵ ион/см², 2 – 10¹⁶ ион/см², 3 – 10¹⁷ ион/см², 4 – 5·10¹⁷ ион/см²

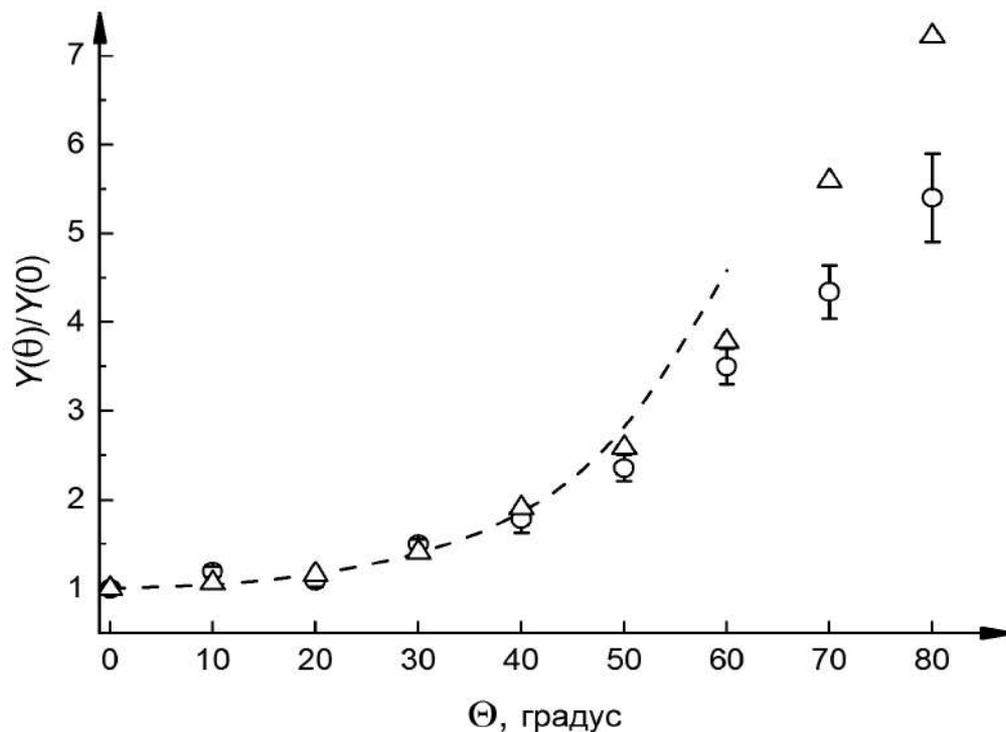
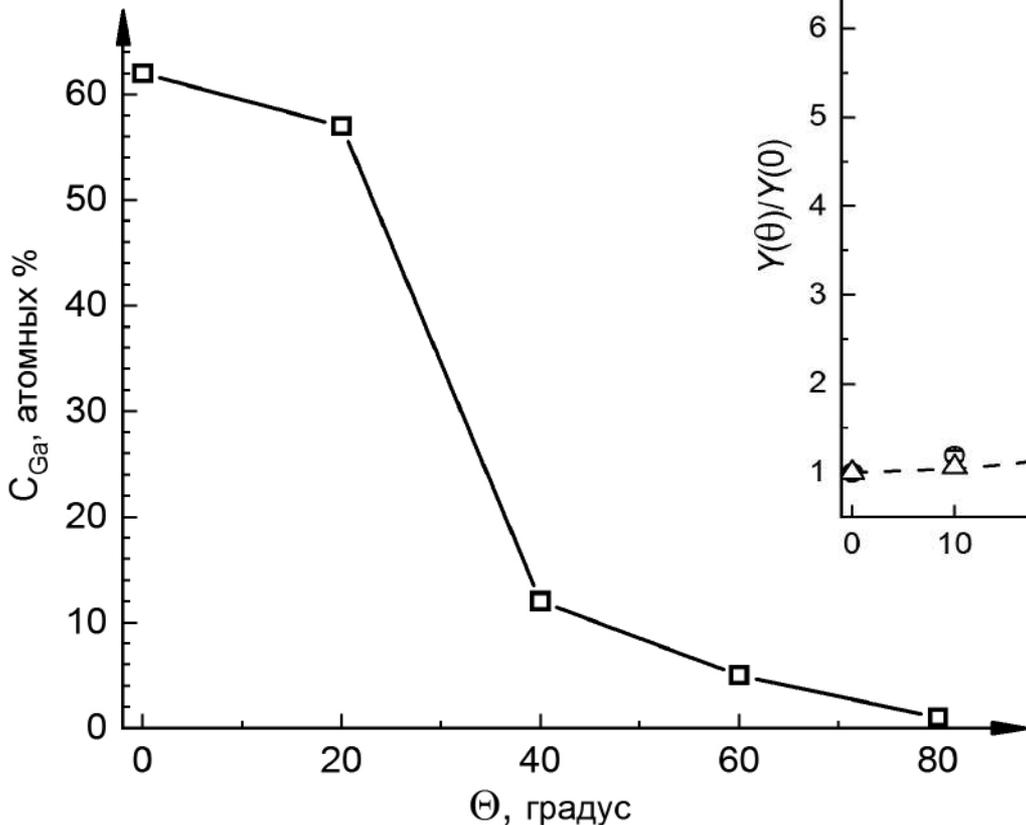
**M. Rommel etc. 2010 JVST
B 28 595**

Bachurin V. I. etc 2020 J. Surf. Invest. 14, 784





ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ



Угловая зависимость
коэффициента распыления Si
пучком ионов 30 кэВ Ga

Угловая зависимость концентрации Ga на
поверхности Si, полученная методом РЭОС





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Исследован процесс формирования топографии на поверхности кремния при облучении пучком ионов галлия с энергией 30 кэВ при углах падения от 0 до 50°
- Установлено что при углах падения пучка около 30° на поверхности формируется волнообразный рельеф, начиная с доз $2 \cdot 10^{17}$ ион/см²
- Длина волны и амплитуда рельефа увеличиваются с ростом дозы облучения от $4 \cdot 10^{17}$ до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см² с ~150 нм до ~500 нм и с ~30 нм до ~70 нм соответственно
- Возможной причиной раннего появления волнообразного рельефа может быть существование в приповерхностном слое имплантированного галлия в виде отдельных преципитатов. Разница в коэффициентах распыления приводит к возникновению топографических неоднородностей, инициирующих формирование волнообразного рельефа



Спасибо за внимание!



ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ
НАУЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ
«Диагностика микро- и наноструктур»

www.nano.yar.ru



ЯФ ФТИАН
им. К. А. Валиева РАН

www.yf-ftian.ru



50-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия
Заряженных Частиц с Кристаллами

Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 25-27 мая 2021 г.