



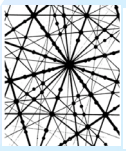
УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ ГЕРМАНИЯ ПУЧКОМ ИОНОВ ГАЛЛИЯ

М.А. Смирнова, В.И. Бачурин,
К.Н. Лобзов, Л.А. Мазалецкий,
Д.Э. Пухов, С.Г. Симакин,
А.Б. Чурилов

ЯФ ФТИАН
им. К. А. Валиева РАН



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



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

Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 30 мая – 1 июня 2023 г.

➔ МОТИВАЦИЯ

Использование ФИП для формирования наноструктур на поверхности материалов с высоким аспектным отношением

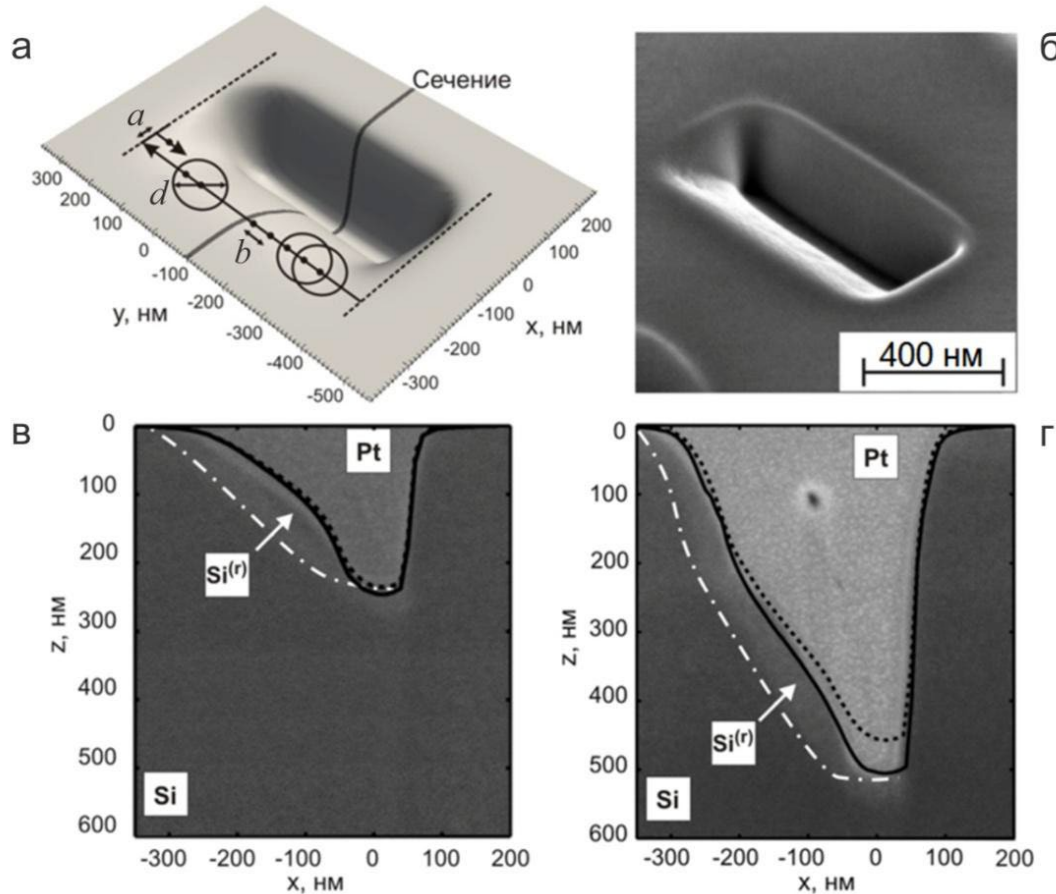


Рис. 1. Расчетное (а) и экспериментально полученное (б) изображения углубления в Si и изображения поперечных сечений углублений с наложенными на них расчетными профилями (сплошные кривые). а) — иллюстрируются схема и параметры сканирования ионного пучка по серпантину, с, d — белая штрихпунктирной линия отделяет слой вторично осажденного материала $Si^{(r)}$ от материала подложки, пунктирной линией показаны результаты моделирования.

Н.И. Боргардт, Р.Л. Волков,
А.В. Румянцев, Ю.А. Чаплыгин
Моделирование распыления материалов
фокусированным ионным пучком,
Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 12



Угловая зависимость коэффициента распыления Si ФИП Ga

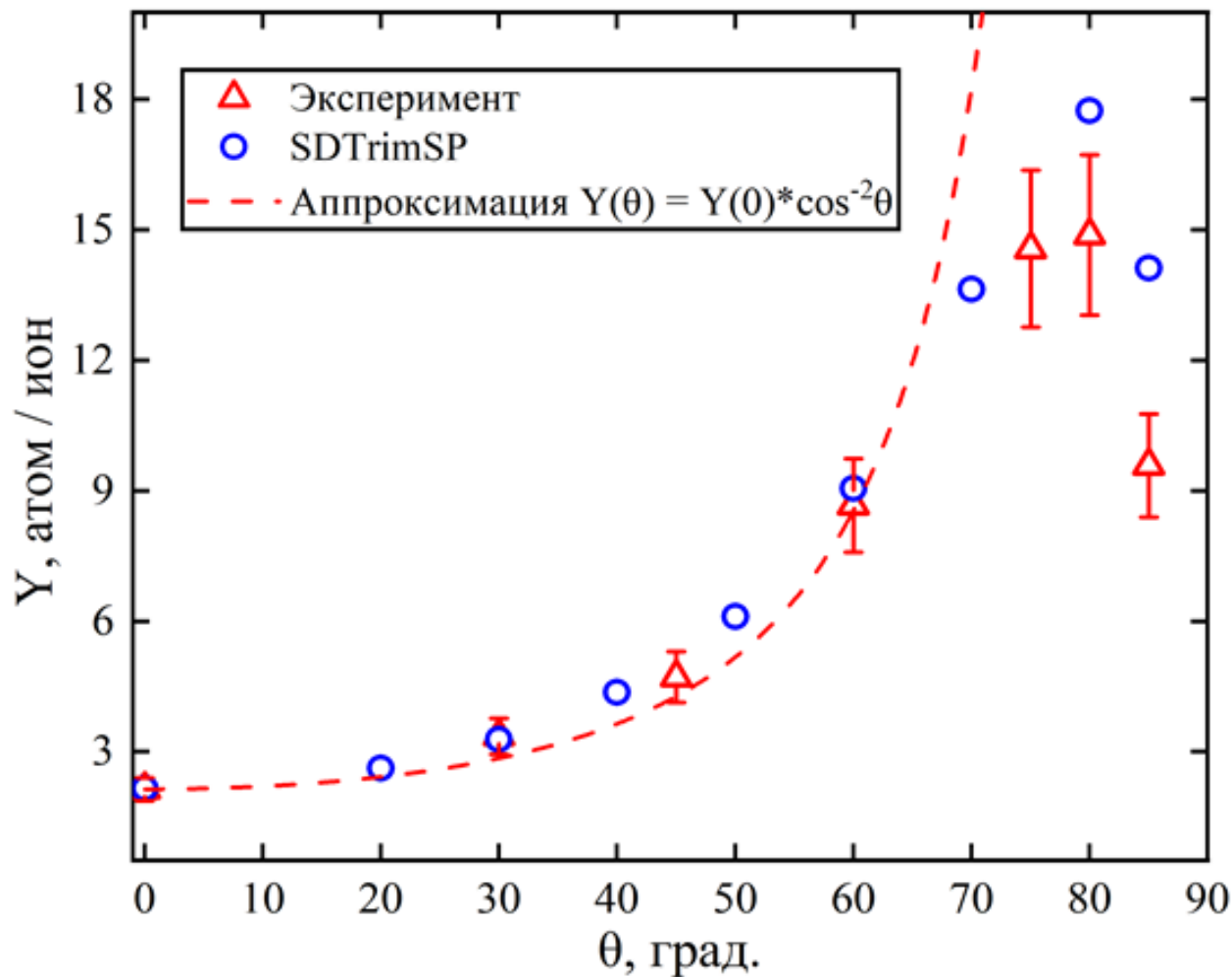
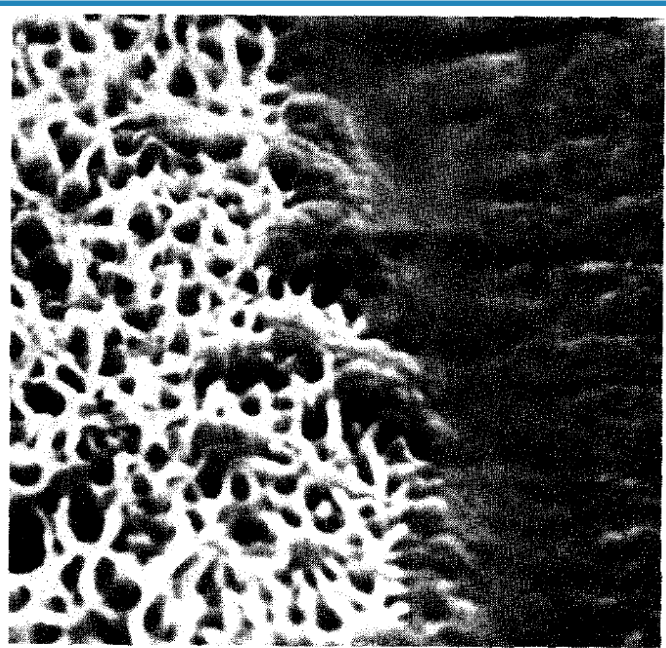


Рис. 2.
Угловые зависимости
коэффициента распыления
Si ФИП Ga⁺.
Теория и эксперимент.



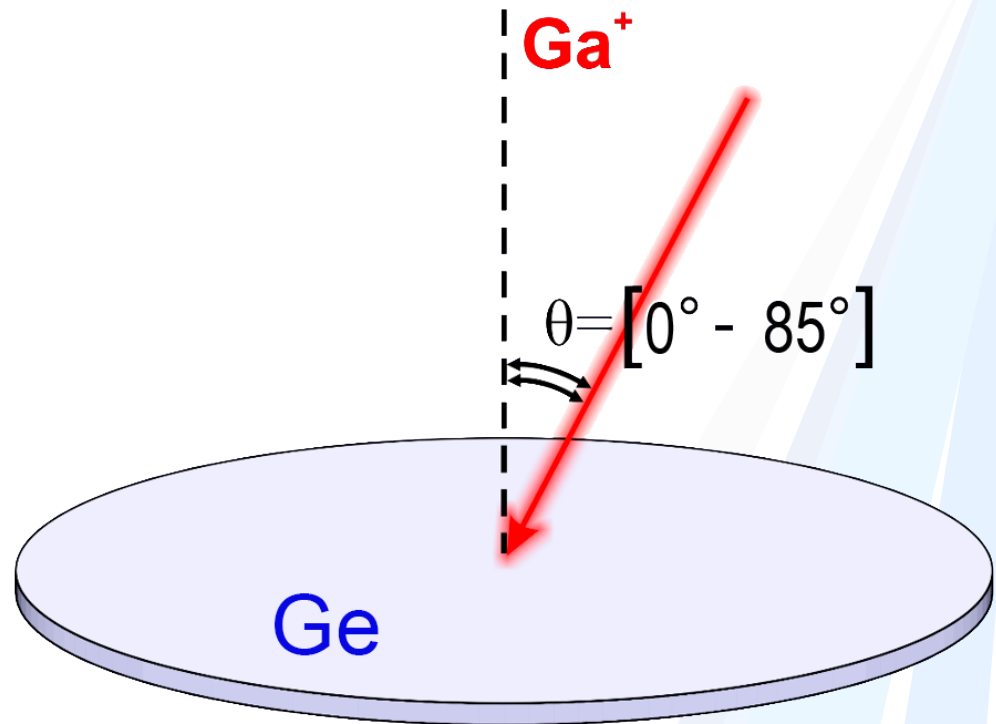
➔ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

I.H.Wilson, The effects of self-ion bombardment (30-500 keV) on the surface topography of single-crystal germanium, *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No.3, March 1982



0.5 μm

Рис. 3. Граница между облученной и необлученной областями на поверхности Ge.

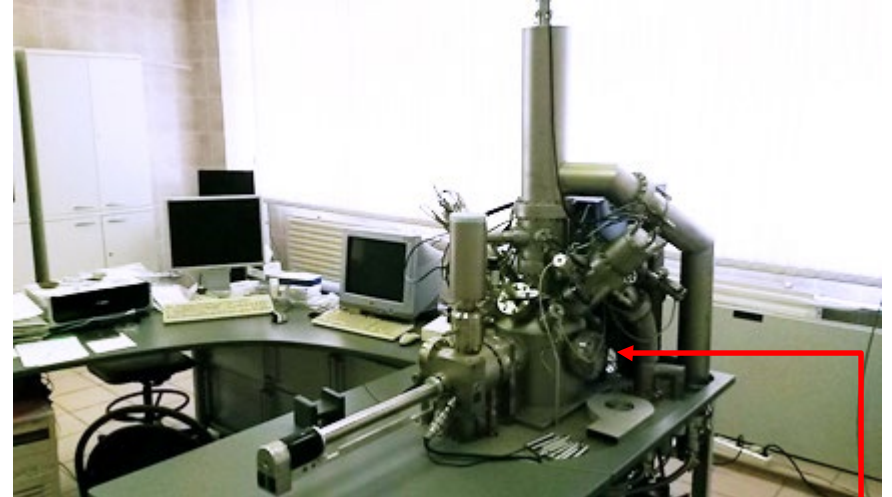


Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Rogov A.M., Vorobyov V.V. *Formation of layers of porous silicon and germanium with metal nanoparticles*, Fitzpress Kazan, 2019





ЭКСПЕРИМЕНТ



Quanta 3D 200i

$30 \text{ кэВ Ga}^+ \rightarrow \text{Ge} (p\text{-тип})$

$\Phi = 10^{15} - 5 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^2$

$\theta = 0 - 85^\circ$

$\varnothing = 60 \text{ нм}$

Supra 40

$E = 20 \text{ кэВ}$

$\theta = 0 - 70^\circ$



IONTOF SIMS⁵

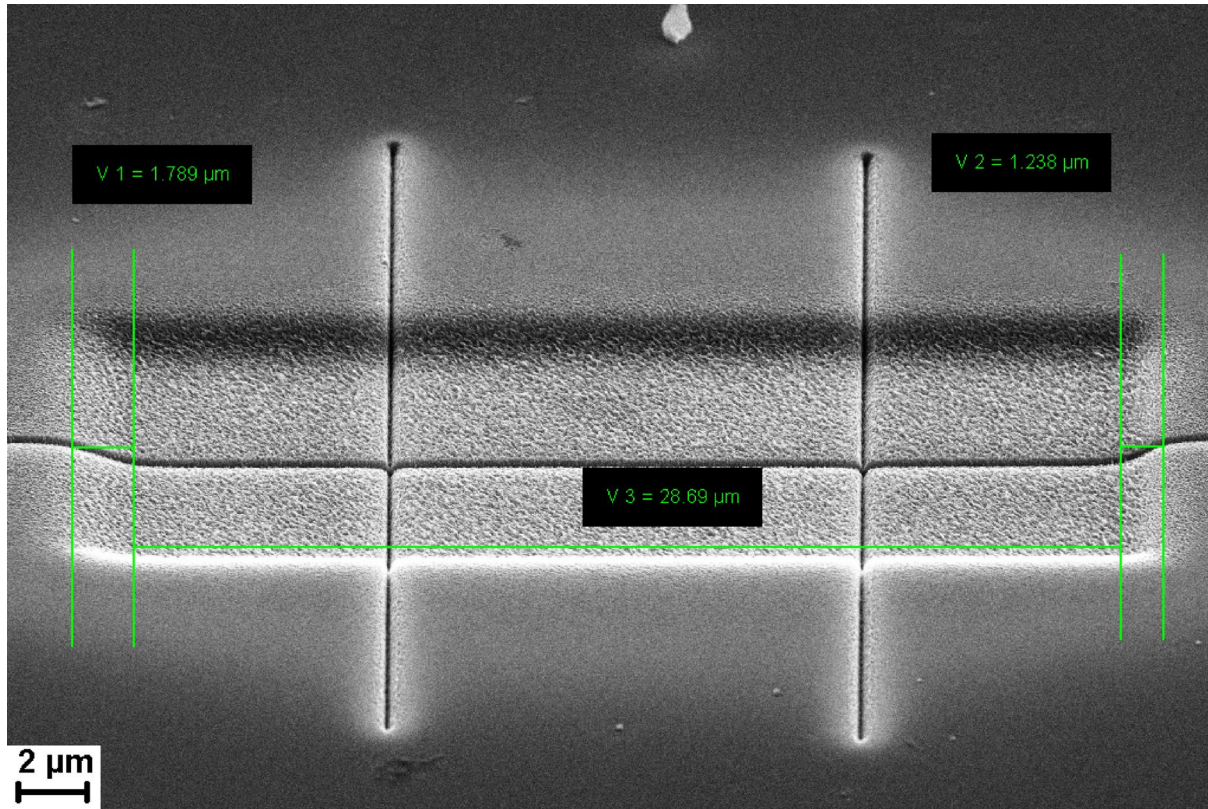
25 кэВ Bi_3^+
(Анализ.пучок)

1 кэВ O_2^+
(Распыл.пучок)





ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ



$$Y = \frac{\rho \cdot V \cdot N_A \cdot e}{M \cdot D} \quad (1)$$

$$Y = \frac{H \cdot N_T}{D} \quad (2)$$

Рис. 5. Экспериментальный растр ($\theta = 40^\circ$, $D = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) для вычисления коэффициента распыления.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (КОЭФФИЦИЕНТ РАСПЫЛЕНИЯ)

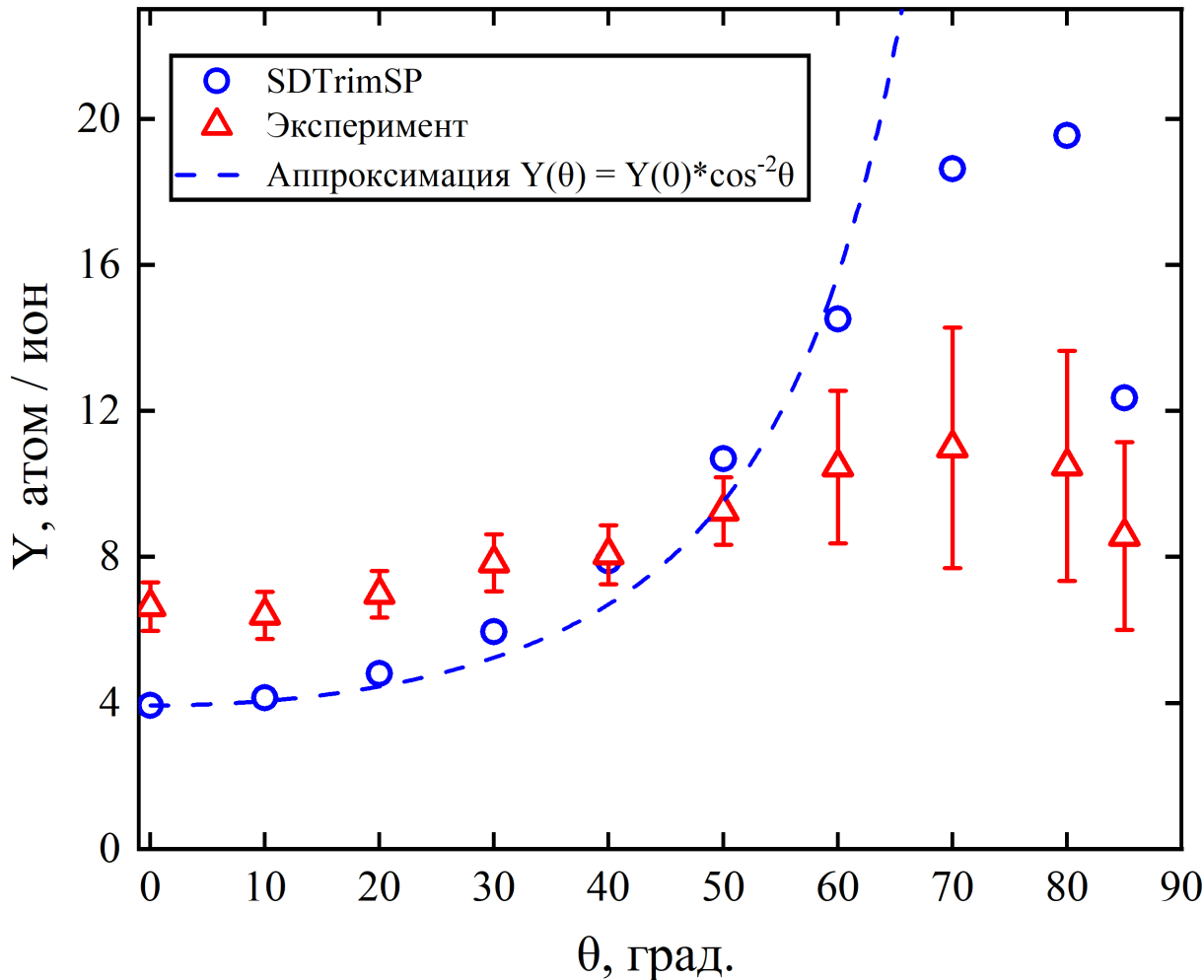


Рис. 6.
Угловые зависимости коэффициента распыления Ge ФИП Ga⁺.
Доза облучения $5 \cdot 10^{17}$ ион/см².
Теория и эксперимент.





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛЛИЯ)

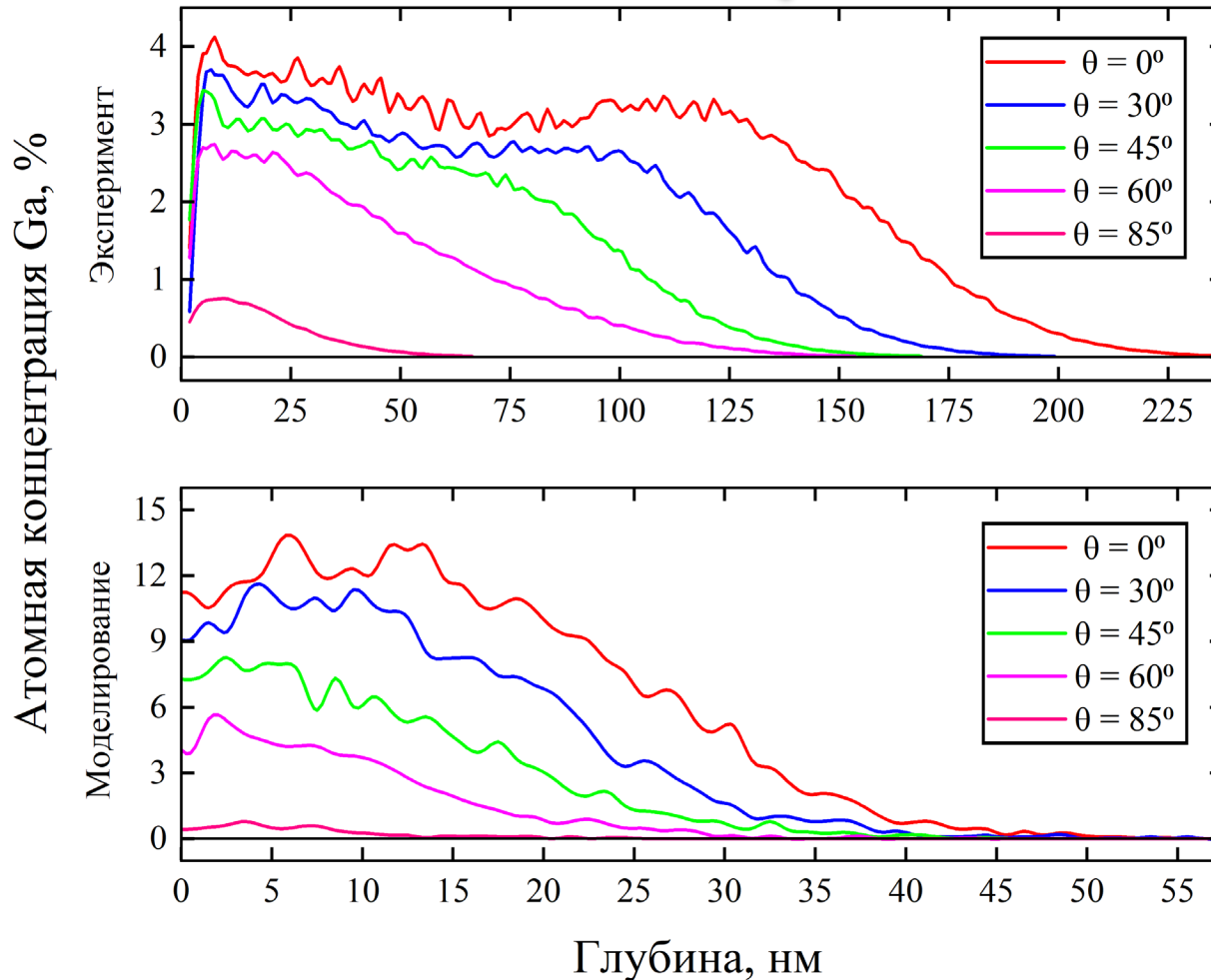


Рис. 7. Послойные профили распределения концентрации Ga в приповерхностном слое Ge, облученного ионами Ga⁺ при различных углах падения ионного пучка с дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см².





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (ТОПОГРАФИЯ)

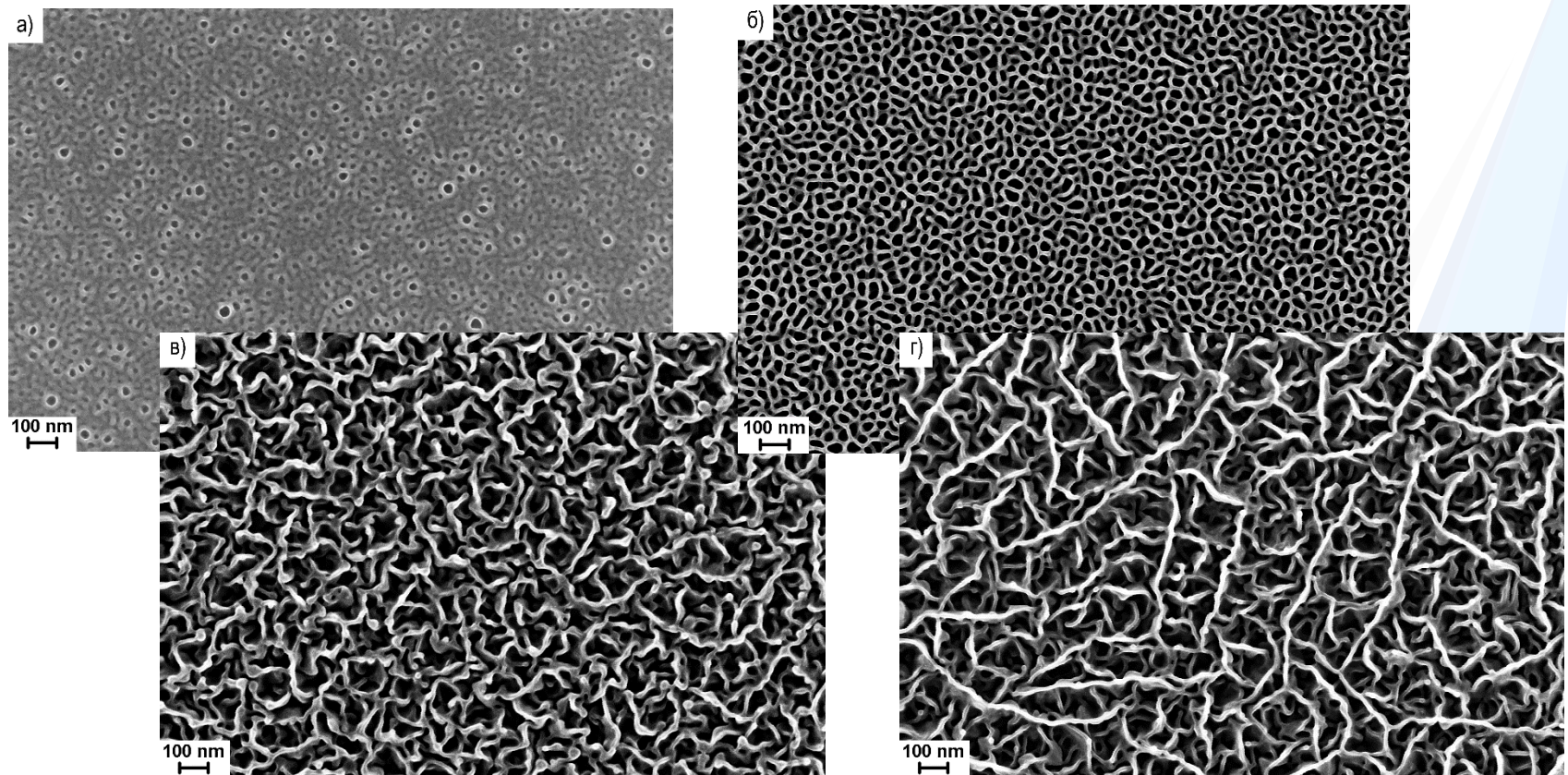


Рис. 8. СЭМ-изображения поверхности Ge, подвергнутой бомбардировке ионами Ga^+ при нормальном падении ионного пучка. Дозы облучения: а) $5 \cdot 10^{15}$, б) 10^{16} , в) 10^{17} , г) 10^{18} ион/см².





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (ТОПОГРАФИЯ)

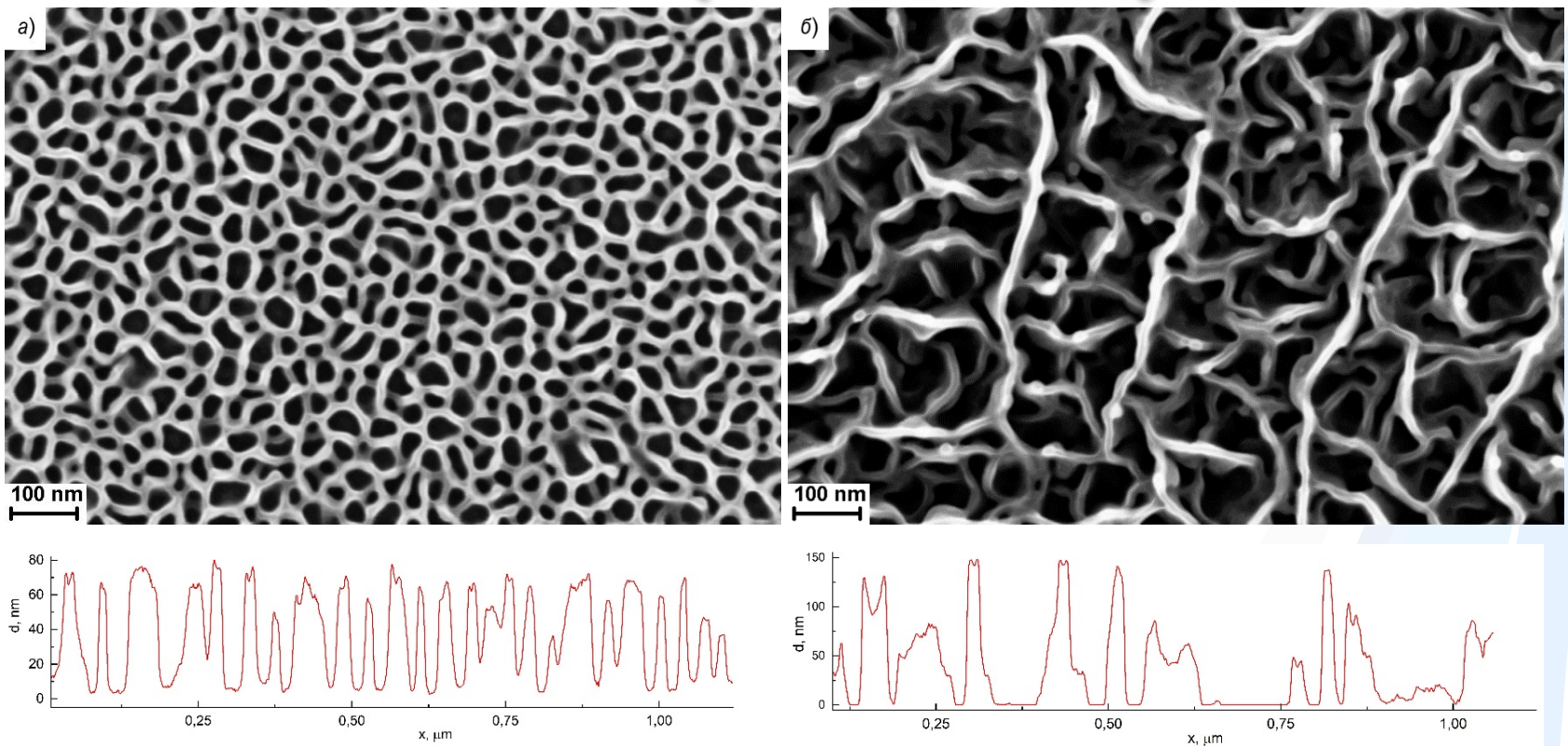


Рис. 9. СЭМ-изображения поверхности Ge, облученной Ga^+ при нормальном падении ионного пучка с дозами а) 10^{16} и б) 10^{18} ион/см². Ниже приведены соответствующие профили рельефа поверхности.





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (ТОПОГРАФИЯ)

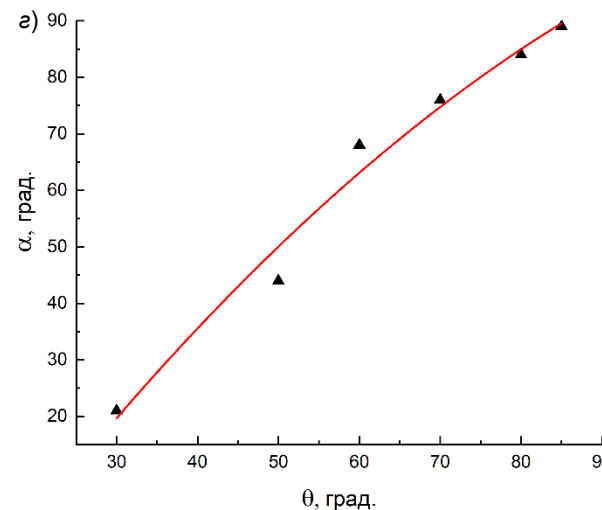
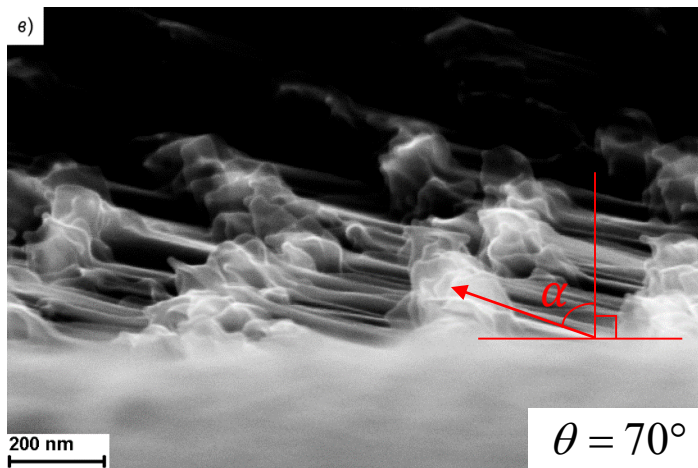
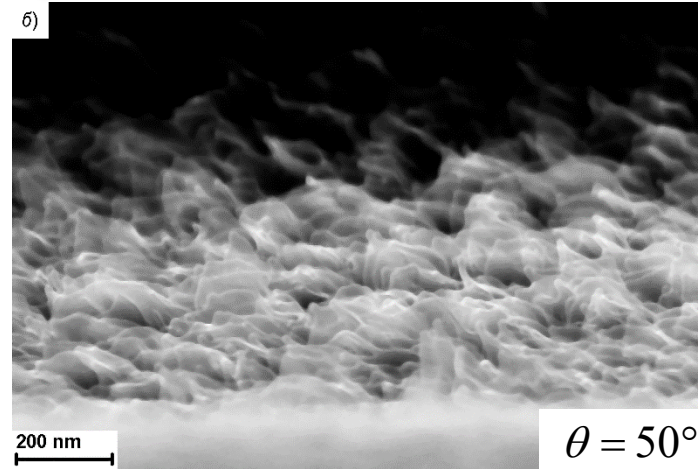
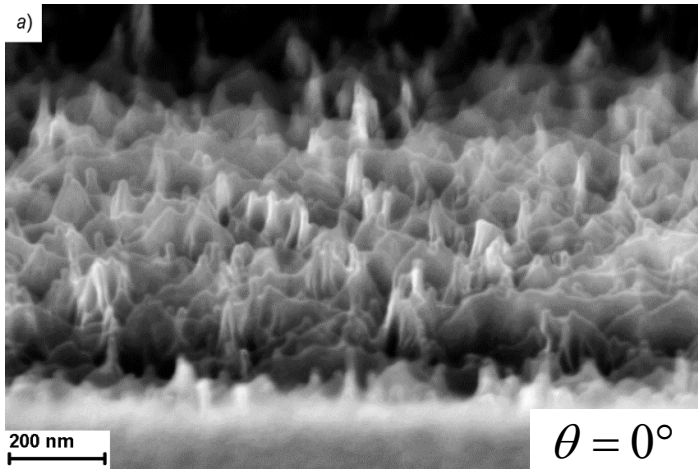


Рис. 10. СЭМ-изображения поверхности Ge, облученной ионами Ga⁺ под различными углами с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² (а-в). г) – график зависимости угла наклона стенок между порами от угла падения ионного пучка.



➔ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (ТОПОГРАФИЯ)

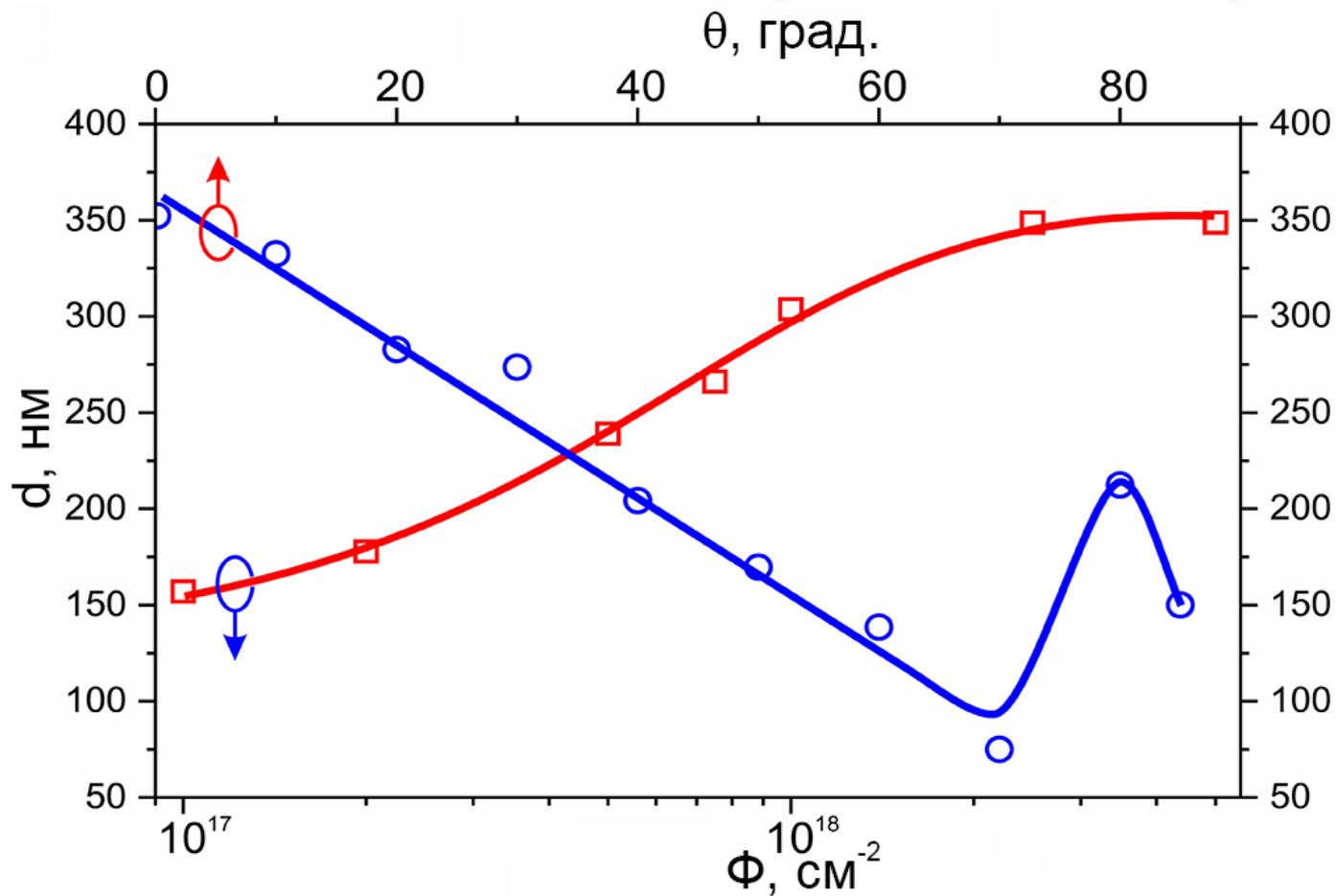
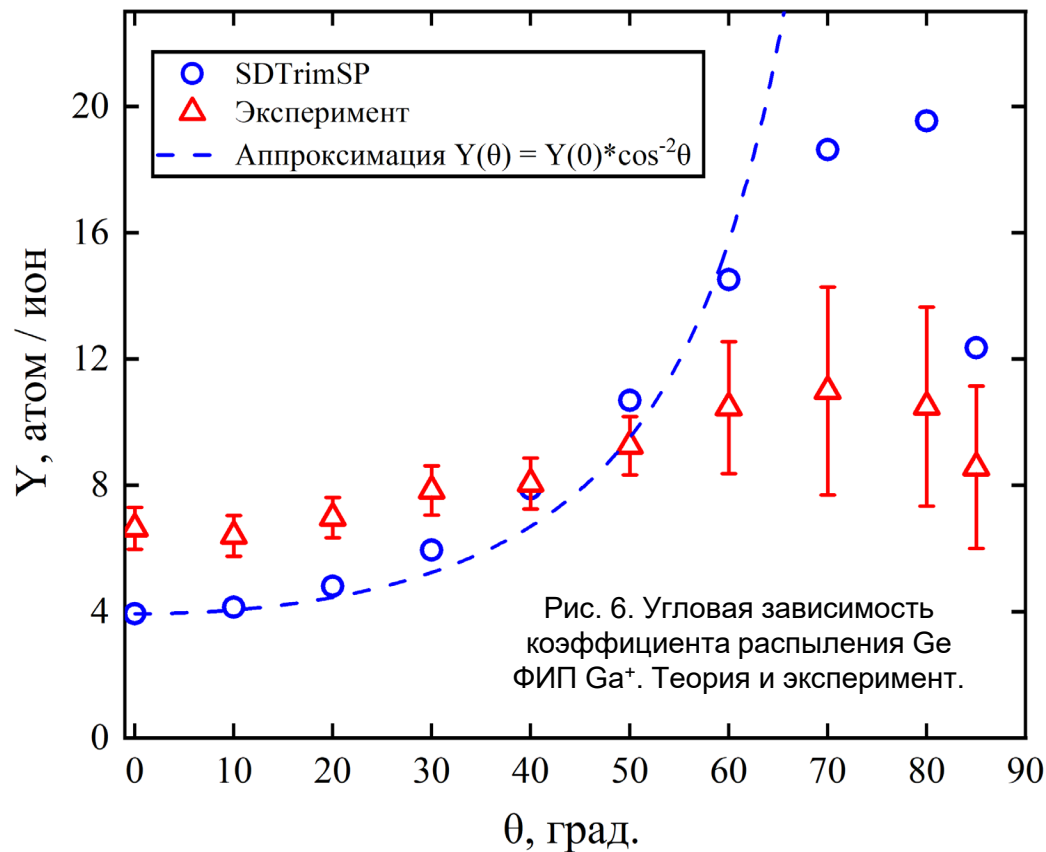


Рис. 11. Экспериментальные зависимости амплитуды рельефа от дозы облучения и угла падения ионного пучка.



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (КОЭФФИЦИЕНТ РАСПЫЛЕНИЯ)



$$Y = \frac{\rho \cdot V \cdot N_A \cdot e}{M \cdot D} \quad (1)$$

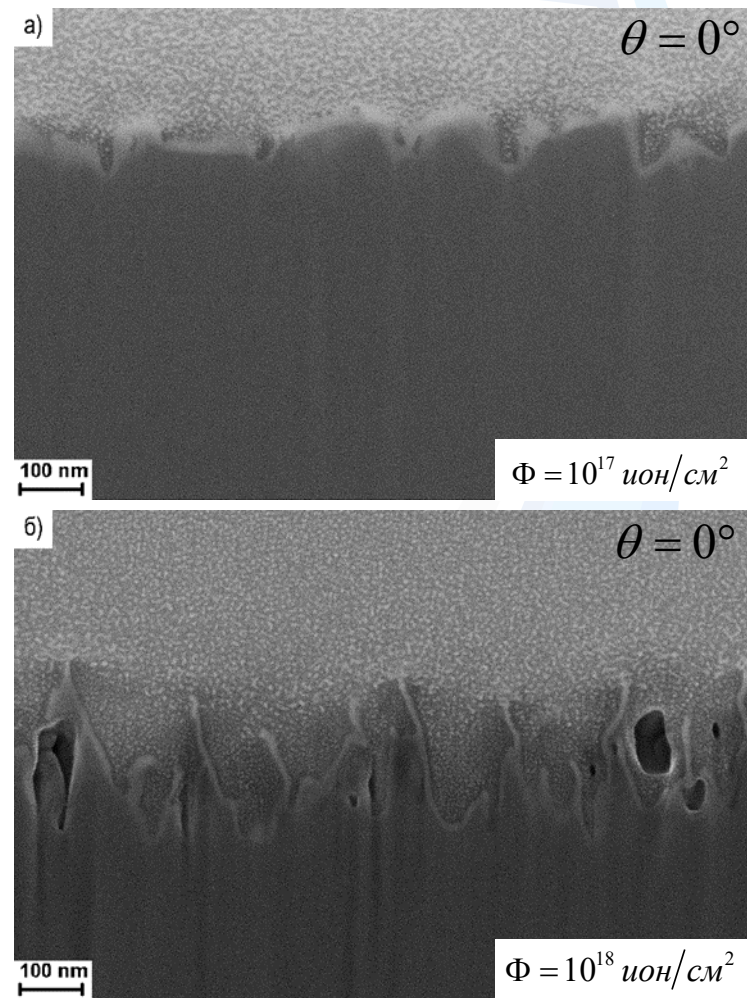


Рис. 12. Поперечный срез экспериментальных растров.



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (распределение Ga)

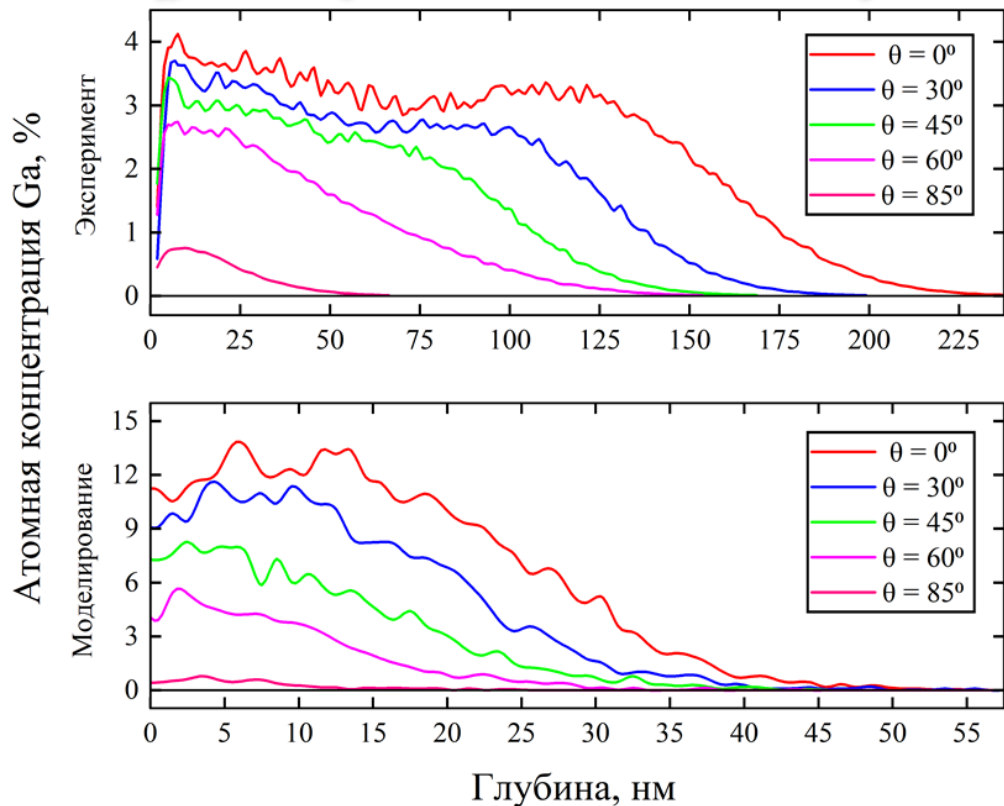


Рис. 7. Послойные профили распределения концентрации Ga в приповерхностном слое Ge, облученного ионами Ga⁺ при различных углах падения ионного пучка.

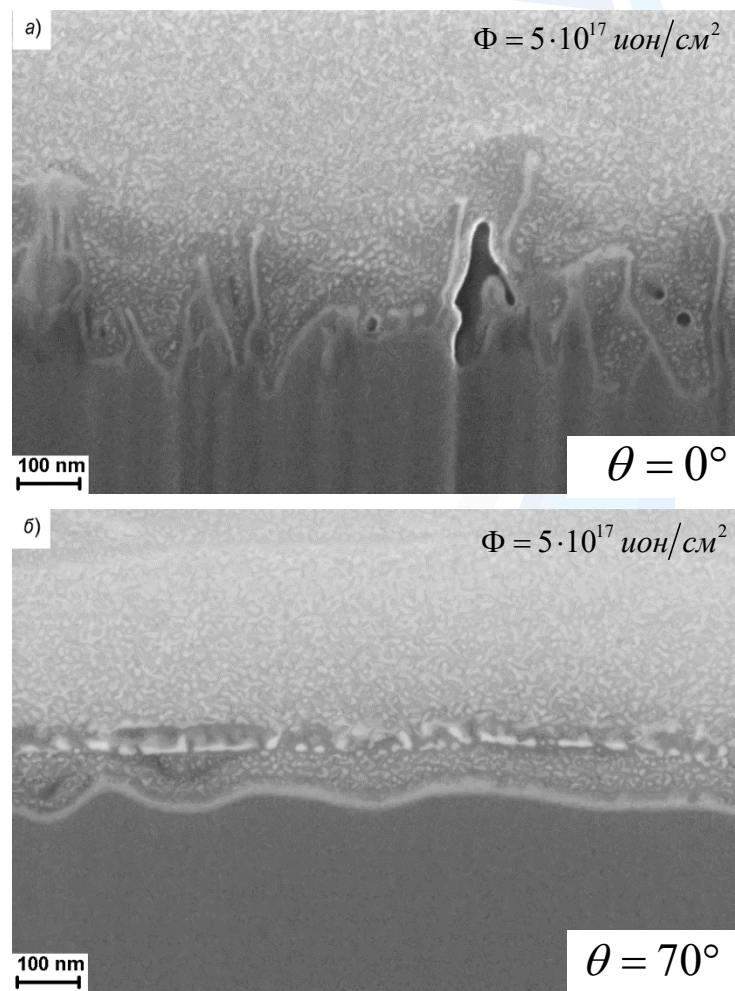
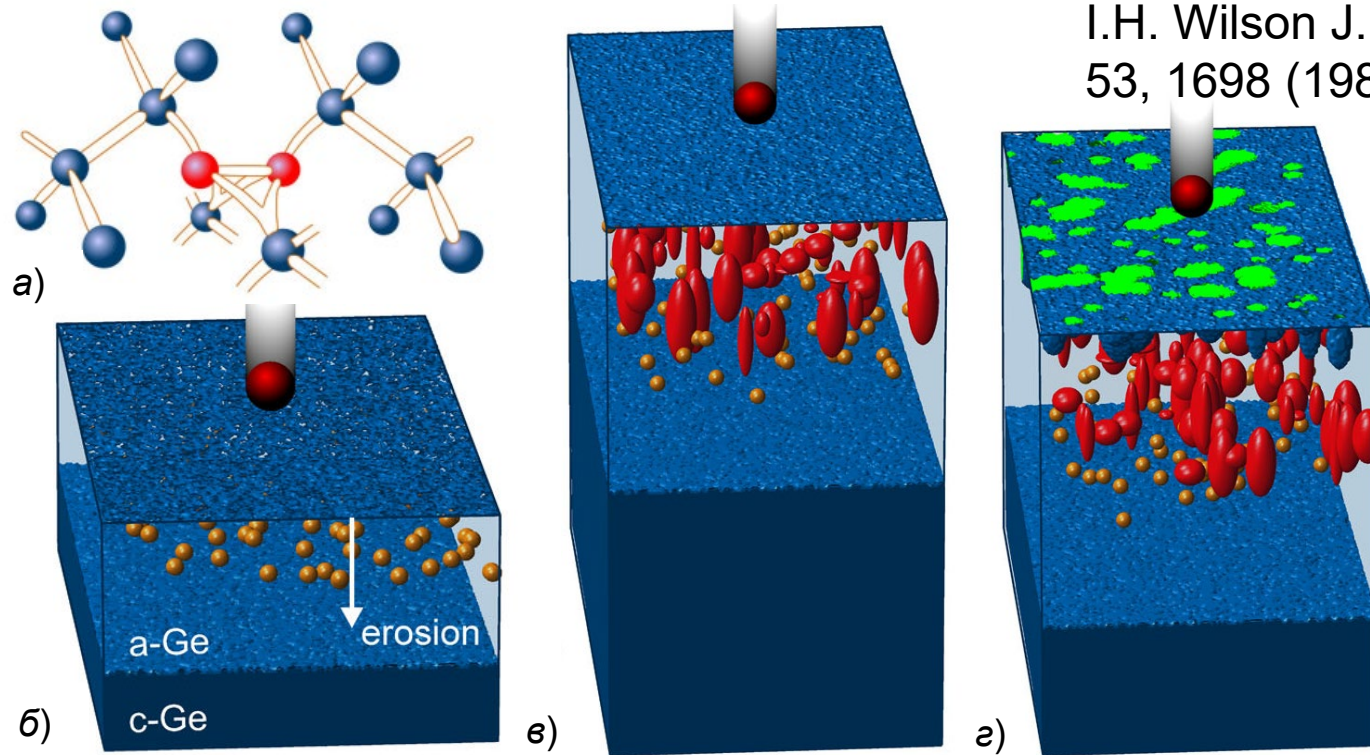


Рис. 13. Поперечный срез экспериментальных растров.



→ ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (МЕХАНИЗМЫ ПОРООБРАЗОВАНИЯ)



I.H. Wilson J. Appl. Phys.
53, 1698 (1982)

Рис. 14. Механизм порообразования при ионной бомбардировке поверхности*.

*Böttger R., Heinig K.-H., Bischoff L., Liedke B., Facsko S., From holes to sponge at irradiated Ge surfaces with increasing ion energy—an effect of defect kinetics?, *Applied Physics A*, 113 (2013)



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ)

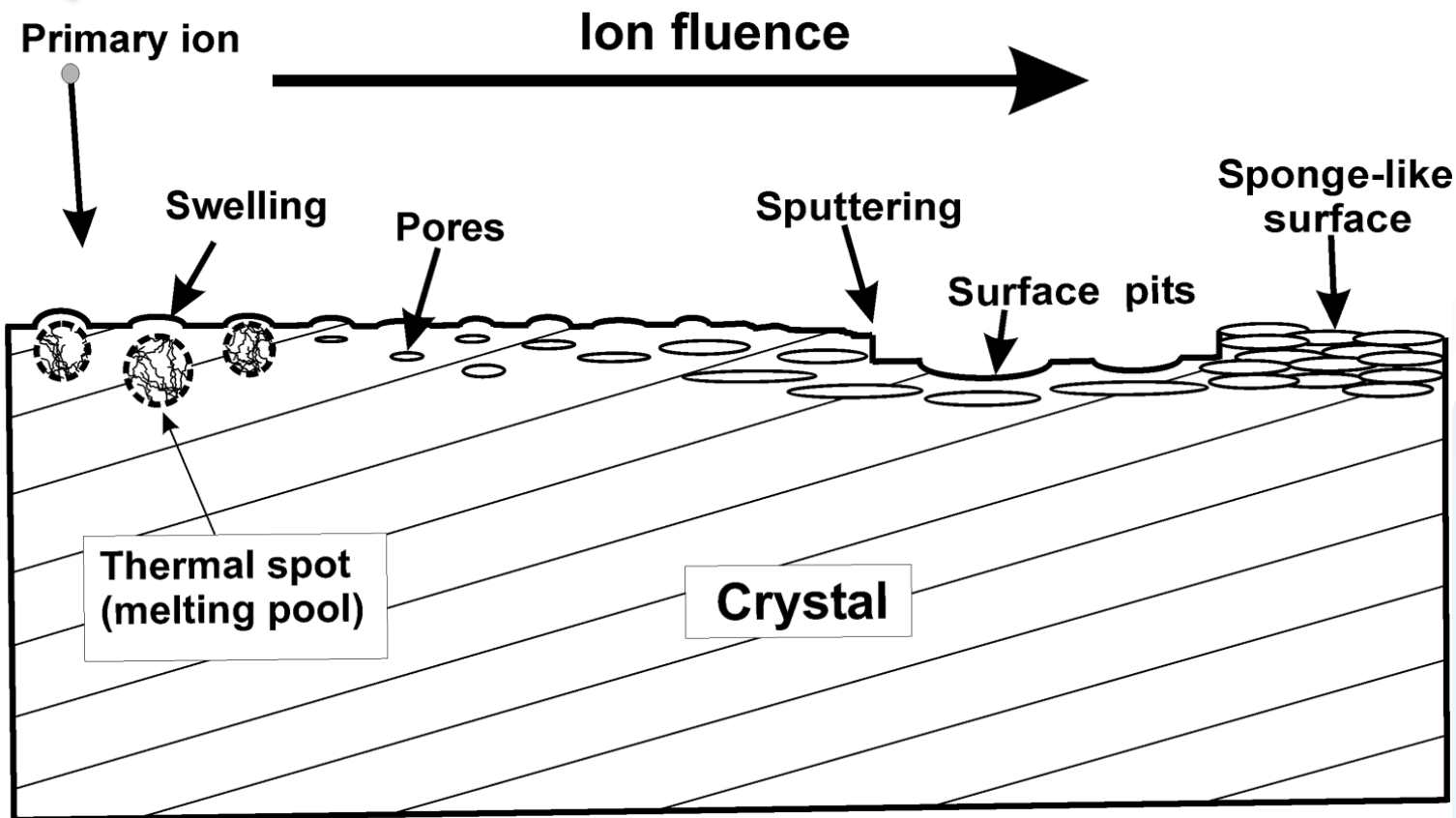


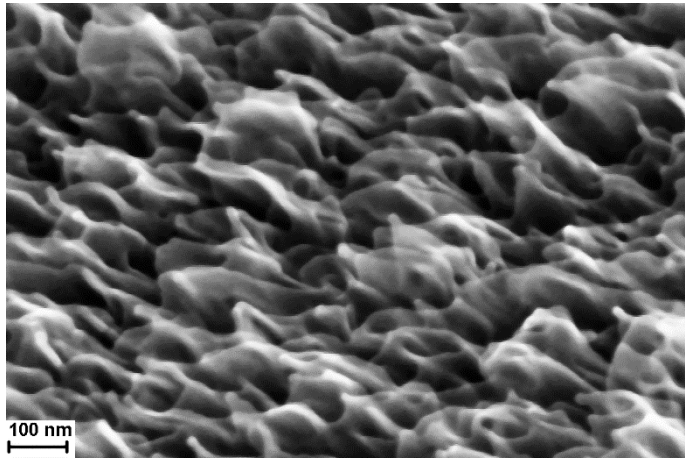
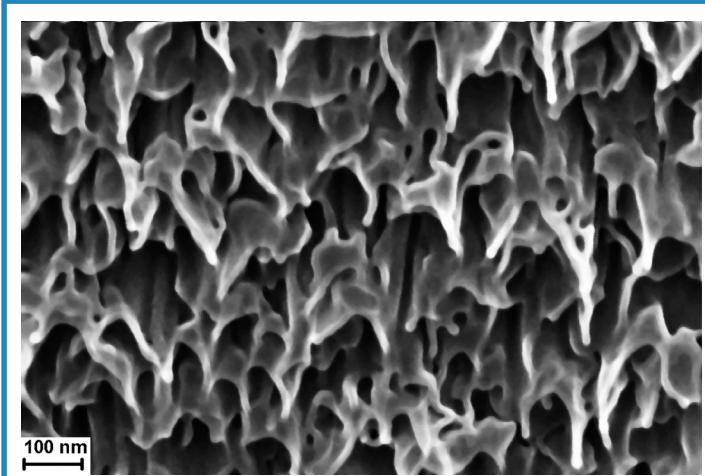
Рис. 15. Механизм порообразования при ионной бомбардировке поверхности**.

**Yu. Kudriavtsev, R. Asomoza, A. Hernandez, etc. Nonlinear effects in low-energy ion sputtering of solids *JVSTA* 38, 053203-1, (2020)

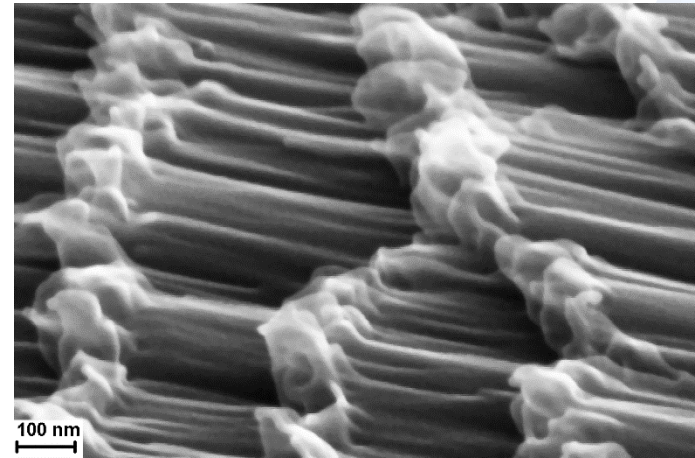
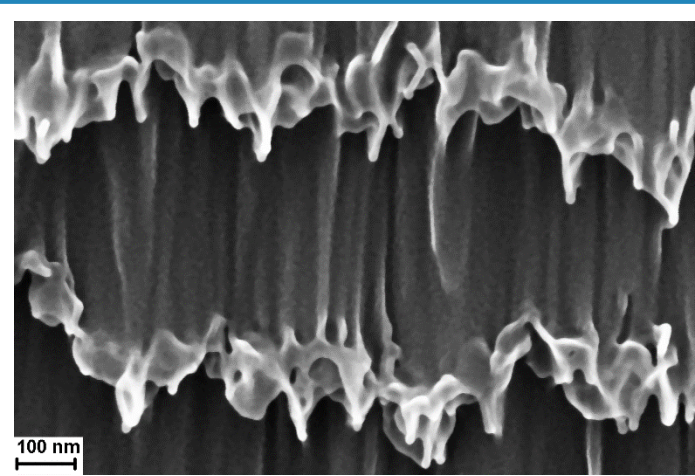




ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ)



$$\theta = 50^\circ \quad \Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$$



$$\theta = 70^\circ \quad \Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$$





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ❑ Исследован процесс формирования топографии поверхности Ge при облучении ионами Ga⁺ с энергией 30 кэВ при углах падения ионного пучка от 0 до 85° и дозах облучения от 10¹⁵ до 5·10¹⁸ ион/см²;
- ❑ Угловые зависимости коэффициента распыления Ge получены в ходе проведения эксперимента и математическим моделированием в программе SDTrimSP.
- ❑ Получены послойные распределения имплантированного Ga в Ge экспериментально и математическим моделированием.
- ❑ Наблюдаются численные расхождения данных модели и эксперимента (для Y, C_{Ga}, R_p). Объясняется это тем, что модель не учитывает процесс порообразования, наблюдаемый в эксперименте;
- ❑ Выдвинуто предположение, что помимо стандартного вакансионного механизма порообразования в формирование наблюдаемой морфологии поверхности вносит вклад механизм «теплового пятна»;
- ❑ Установлено, что одновременно с изменением угла падения ионного пучка наблюдается наклон пористой структуры. Вследствие чего, плотность распыляемого слоя изменяется непредсказуемо. Поэтому для пористых структур необходимо использовать методы измерения, основанные на определении массы распылённого материала, а не на вычислении распыленного объема.





Спасибо за внимание!

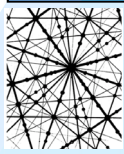
Работа выполнена в рамках Государственного задания
ЯрГУ им. П.Г. Демидова Минобрнауки РФ по теме
№ 0856-2020-0006 на оборудовании Центра
коллективного пользования
«Диагностика микро и нано структур»

ЯФ ФТИАН 
им. К. А. Валиева РАН

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

www.nano.yar.ru

Смирнова Мария Александровна
masha_19957@mail.ru



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

Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 30 мая – 1 июня 2023 г.