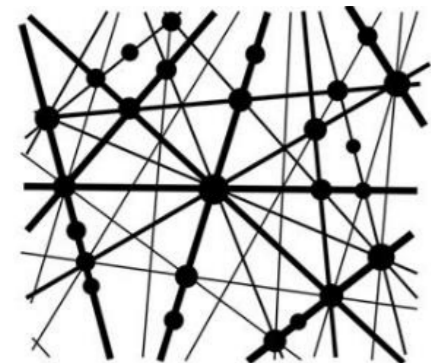




Модификация поверхностных свойств $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ облучением ускоренными ионами

Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами 2024



Е.Д. Федоренко*, А.И. Клевцов, А.И. Титов, В.Д. Андреева, П.А. Карасев

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: lizasever69@mail.ru

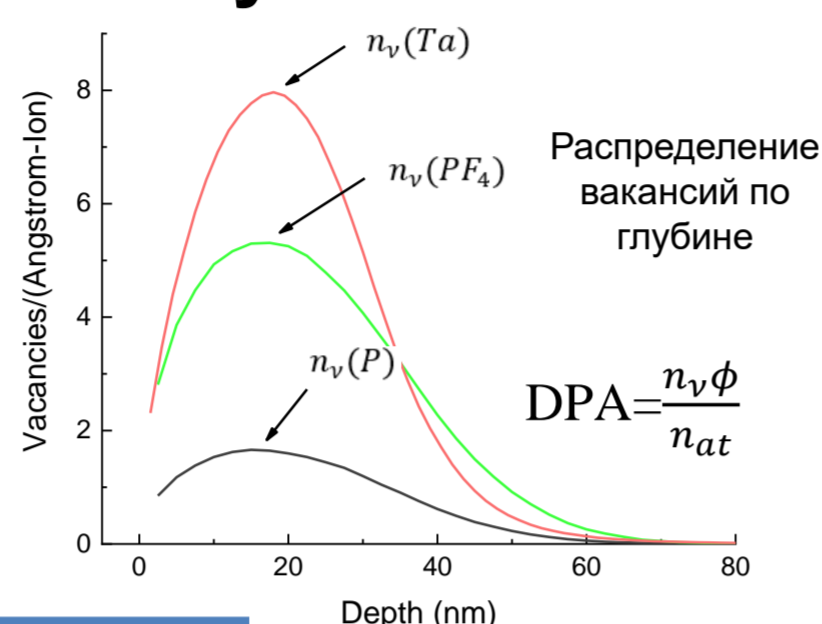
Оксид галлия – один из многообещающих полупроводниковых материалов для создания нового поколения мощных электронных приборов и УФ оптоэлектроники, поскольку обладает следующими достоинствами: широкая запрещенная зона (4.4 – 5.3 эВ в зависимости от кристаллической фазы), высокие значения напряжения пробоя (~ 8 МВ/см). Облучение ускоренными ионами широко используется в современной полупроводниковой технологии, в частности, при производстве электронных устройств. В работе описаны результаты высокодозного воздействия ионной бомбардировки на структурные и поверхностные свойства в $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Изучено влияние облучения ускоренными атомарными (P, Ta) и молекулярными (PF_4) ионами с дозами от 3 до 45 ДПА на состояние поверхности и структуру $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

Методика эксперимента: облучение ионами

Образец представляет собой эпитаксиальную пленку $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ толщиной 2 мкм с ориентацией (0001) на с-плоскости сапфировой подложки.

Облучение при комнатной температуре на 500 кВ имплантере под углом 7° от направления [0001].

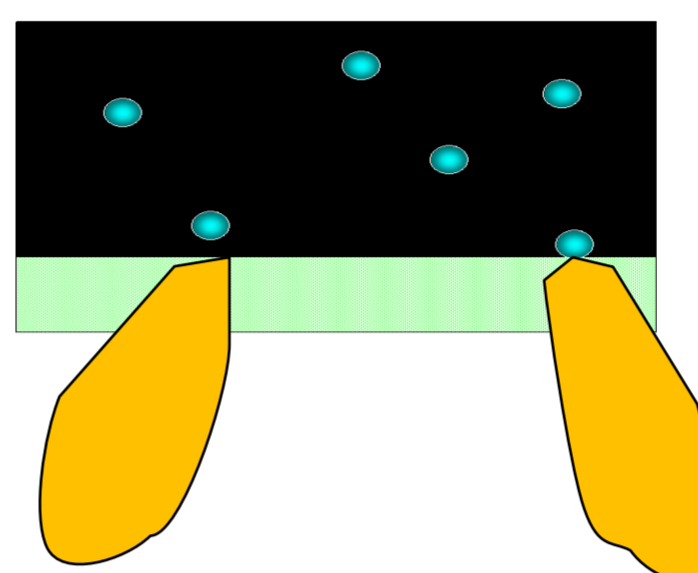
Ион и энергия keV	Плотность тока				Доза Φ , $\times 10^{16} \text{cm}^{-2}$	
	мкА/см ²	10 ⁻³ dpa/s	30 DPA	45 DPA	30 DPA	45 DPA
P 40	0,242	0,484	2,41	4,82	1,89	2,84
PF4 140	0,076	0,152	2,41	4,82	0,59	0,89
Ta 150	0,047	0,094	2,41	4,82	0,37	0,55



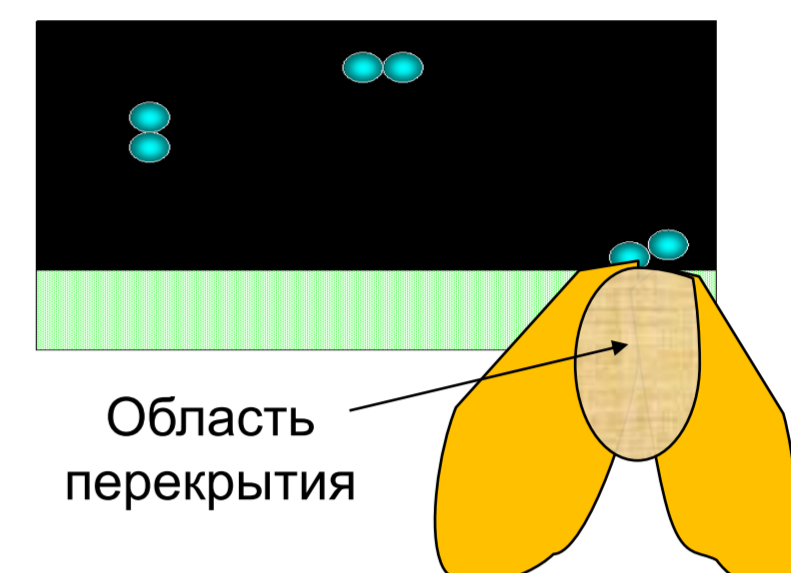
*DPA – среднее число смещений каждого атома мишени на глубине максимума упругих потерь энергии. Рассчитано TRIM.

Особенности каскадов столкновений

Атомарные ионы (P)



Молекулярные ионы (PF_4)



- Атомарные ионы входят в мишень в случайном образом распределенных точках
- Атомы, составляющие молекулу, входят в мишень в одном и том же месте. После прохождения нескольких ангстрем по глубине от поверхности атомы начинают двигаться независимо, но каскады смещений вблизи поверхности перекрываются.

Дифракция рентгеновских лучей

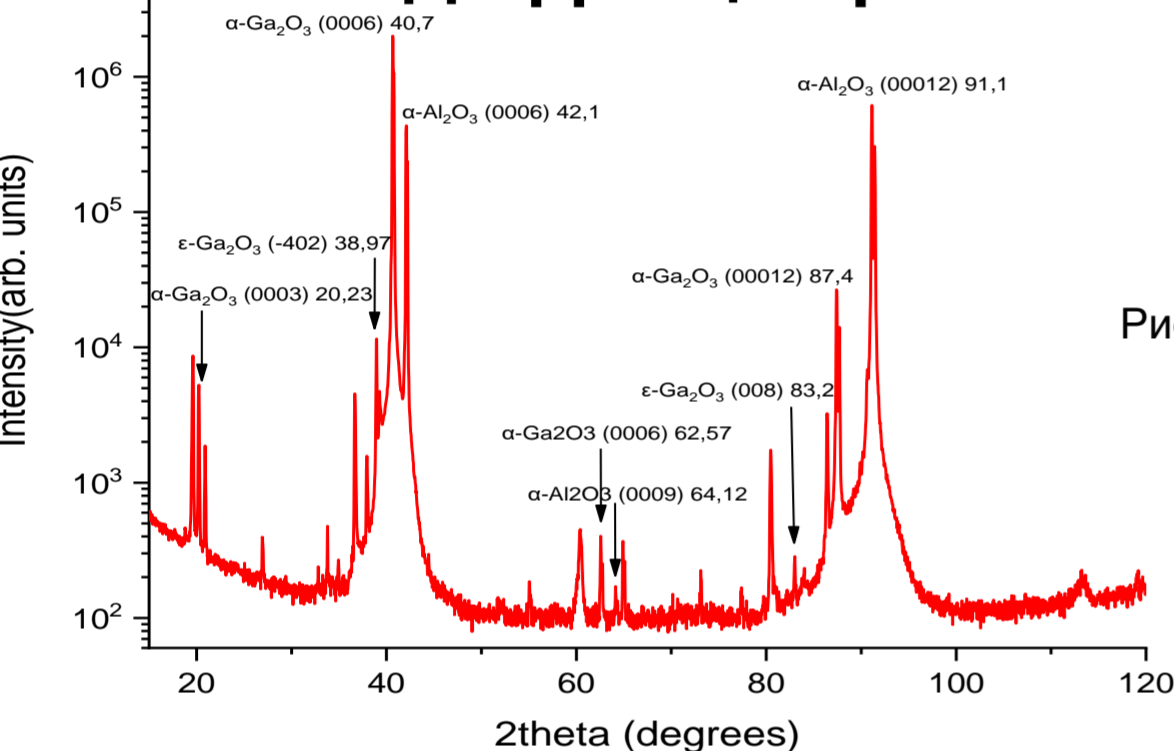
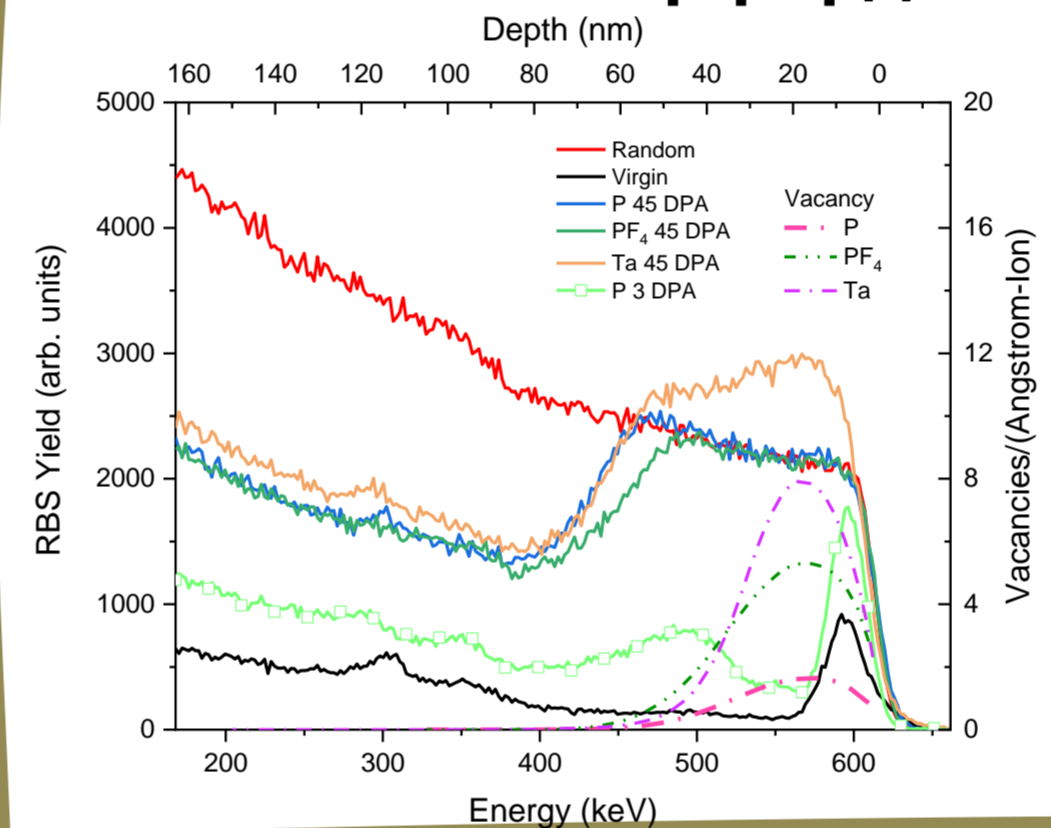


Рис. 1. Рентгенструктурные спектры исходного образца $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$

На спектре пики при $2\theta = 40.7, 62.57$ и 87.4° соответствуют отражениям от системы плоскостей (0006) и (00012) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Максимумы вблизи $42,1^\circ$ и $91,1^\circ$ соответствуют дифракционным отражениям (0006) и (00012) от подложки сапфира. В районе $38,9^\circ$ и $83,5^\circ$ виден небольшой пик, свидетельствующий о наличии вкраплений $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

Резерфордское обратное рассеяние



Для невысоких доз (до 4.5 DPA) на спектрах отчетливо видны поверхностный и объемный максимумы дефектов. При увеличении дозы (от 4.5 до 45 DPA) эти два пика сливаются в один. Наблюдается полная аморфизация мишени.

Рисунок 3. Спектры RBS/C от образцов $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в случайном (random) и каналируемом направлении до (virgin) и после облучения ионами.

Пунктирные линии - распределения генерируемых ионами смещений по глубине

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

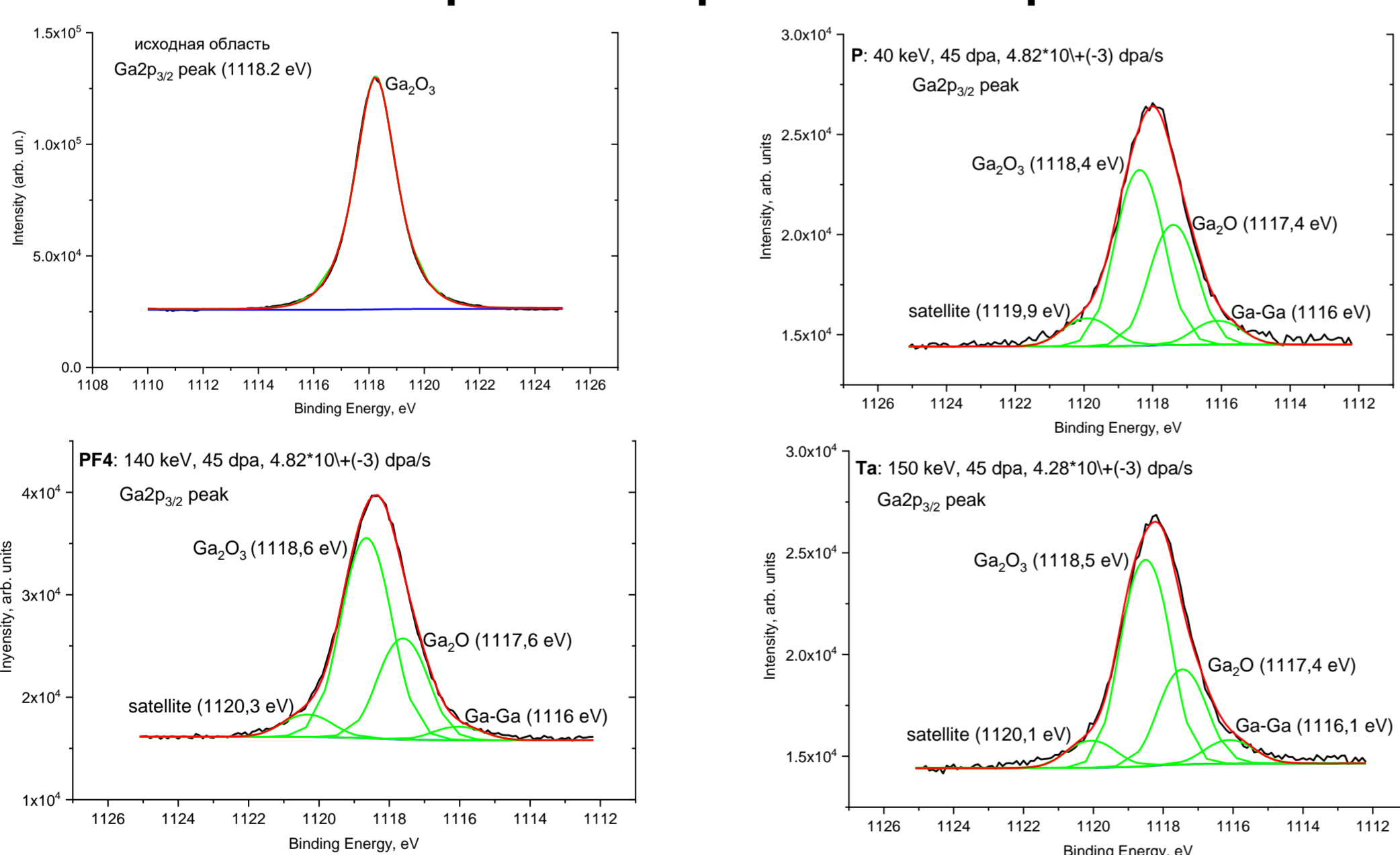


Рис. 2. РФЭС пики $\text{Ga}2p_{3/2}$ от исходной области и облученных ионами P, PF_4 и Ta с дозой 45 DPA

Наблюдаемое при бомбардировке разрушение кристаллической структуры и образование разупорядоченного слоя сопровождается появлением в мишени оксида галлия новых степеней окисления: степень Ga^{1+} может частично переходить в Ga^{3+} , с образованием Ga^0

Атомно-силовая и электронная микроскопия

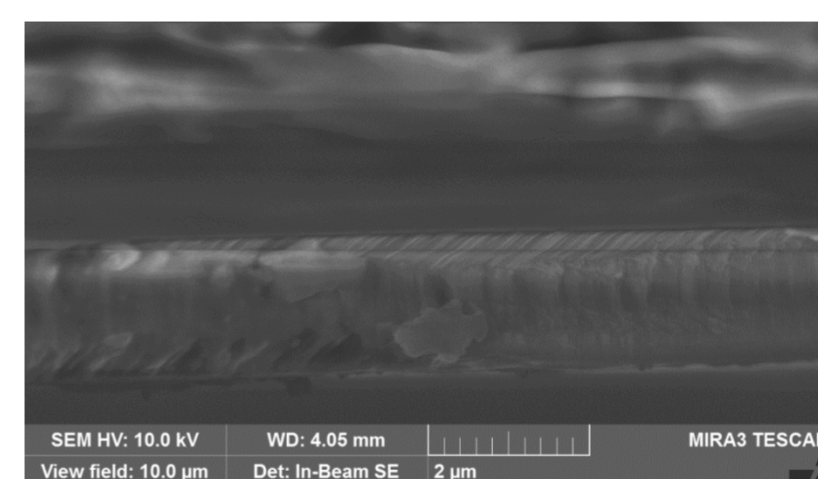


Рисунок 3. СЭМ-изображение скола пленки $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$

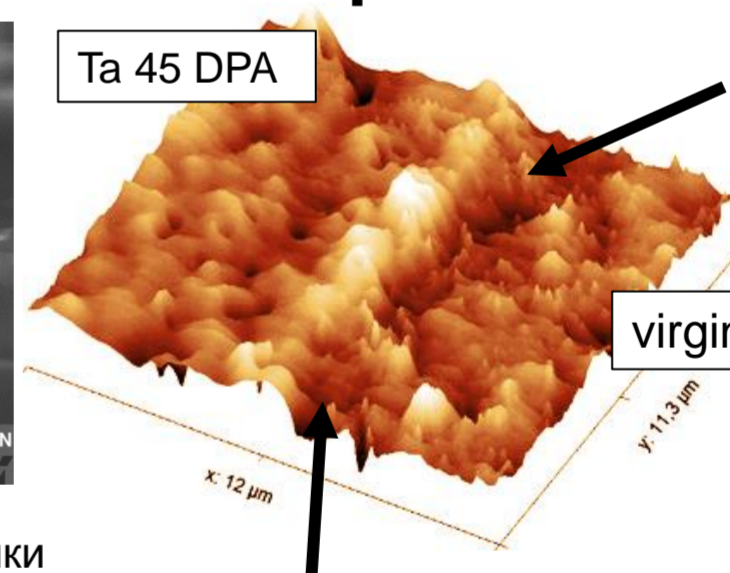
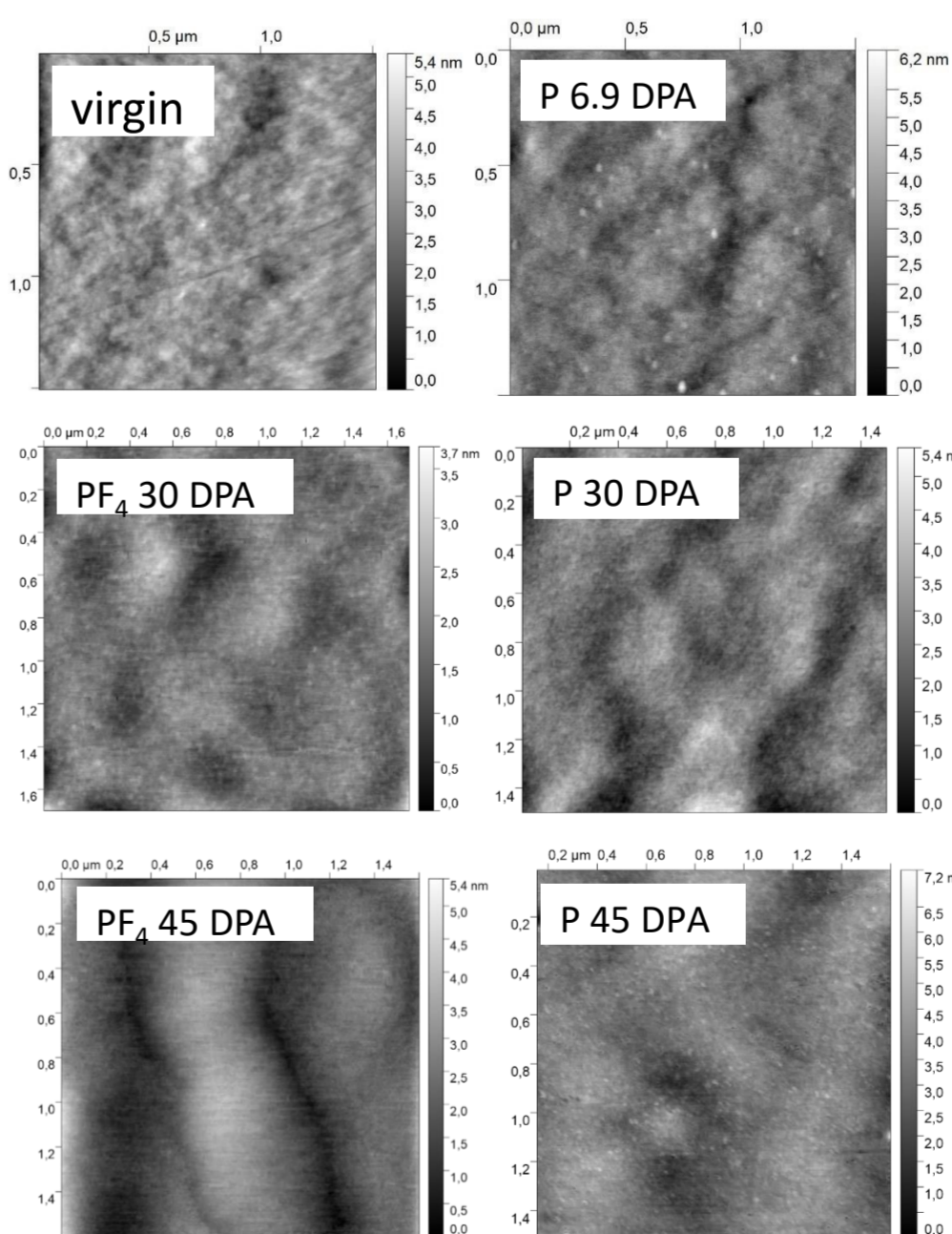


Рисунок 5. 3D АСМ-изображения границы облученной и необлученной областей поверхности оксида галлия



При увеличении дозы легких и тяжелых ионов до 45 DPA проявляется небольшая ступенька: поверхность облученной области выше, чем была до облучения. Высота ступеньки в среднем составляет 5 нм.

Вплоть до дозы 45 DPA среднеквадратичная шероховатость поверхности менялась не существенно (от 0,7 до 0,5 нм) независимо от типа ионов. Сглаживание и потеря детальности заметны лишь для мелкомасштабного рельефа.

Рисунок 4. АСМ-изображения поверхности оксида галлия до и после облучения с дозой 6,9 DPA и после облучения ионами P, PF_4 с дозами 30 и 45 DPA

Выводы

- Высокодозное облучение приводит к полной аморфизации приповерхностного слоя мишени Ga_2O_3 .
- Облучение ионами вплоть до дозы 30 DPA не вызвало заметного изменения толщины образца. При дозах в диапазоне от 30 до 45 DPA наблюдается небольшой свеллинг. Среднеквадратичная шероховатость незначительно снижается (от 0,7 до 0,5 нм).
- При больших дозах атомарные ионы P и Ta формируют более толстый аморфный слой и вызывают более сильный свеллинг, чем молекулярные ионы PF_4 .
- Бомбардировка атомарными и молекулярными ионами приводит к изменению степени окисления вплоть до нуля.