

# Топография GaN при последовательном облучении молекулярными и атомарными ионами

А.И. Титов, К.В. Карабешкин, А.В. Архипов, А.И. Стручков\*, П.А. Карасев

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

\*andrei.struchckov@yandex.ru

Проведено исследование топографических эффектов на поверхности GaN при последовательной имплантации молекулярными ионами  $PF_4$  и атомарными ионами P с энергией 1.3 кэВ/а.е.м. Показано, что результат существенным образом зависит от последовательности облучений. Формирование поверхностного рельефа обусловлено ходом накопления структурных нарушений у поверхности GaN.

## Детали эксперимента

Эпитаксиальные слои GaN толщиной 2 мкм структуры вюрцита (0001), выращенные по технологии MOVPE на сапфировой подложке, облучались пучками ионов P и  $PF_4$  в разной последовательности. Имплантация осуществлялась при комнатной температуре имплантером 500 kV HVEE под углом  $7^\circ$  от направления [0001] для минимизации эффектов каналирования. Энергия ионов – 1.3 кэВ/а.е.м. (40 и 140 кэВ для P и  $PF_4$ , соответственно), плотность потока –  $3.6 \times 10^{-3}$  DPA/с (т.е.  $1.8 \times 10^{12}$  и  $0.54 \times 10^{12}$  см $^{-2}$  с $^{-1}$  для ионов P и  $PF_4$ ). Дозы были приведены в усредненное число смещений на атом (DPA). Величины DPA вычислены кодом TRIM [1].

Топография поверхности изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) оборудованием Nano-DST производства Pacific Nanotechnology. Также измерялись высоты ступенек между облученными и необлученными областями поверхности. Эти области были созданы установкой маски на поверхность GaN – сколотого куска кремния, находившегося в механическом контакте с частью поверхности GaN во время имплантации. Шероховатость поверхности измерялась на квадратах  $4 \times 4$  мкм $^2$  или  $1.5 \times 1.5$  мкм $^2$  вдали от границ облучаемых областей.

## Результаты и обсуждение

При имплантации ионов в GaN, происходит аморфизация материала наряду с его разложением и формированием пузырьков  $N_2$ , которые приводят к таким изменениям топографии поверхности, как свеллинг и рост шероховатости поверхности [2]. Установлено также, что при имплантации ионов разных типов и/или энергий накопление структурных нарушений зависит от порядка последовательности их внедрения [3].

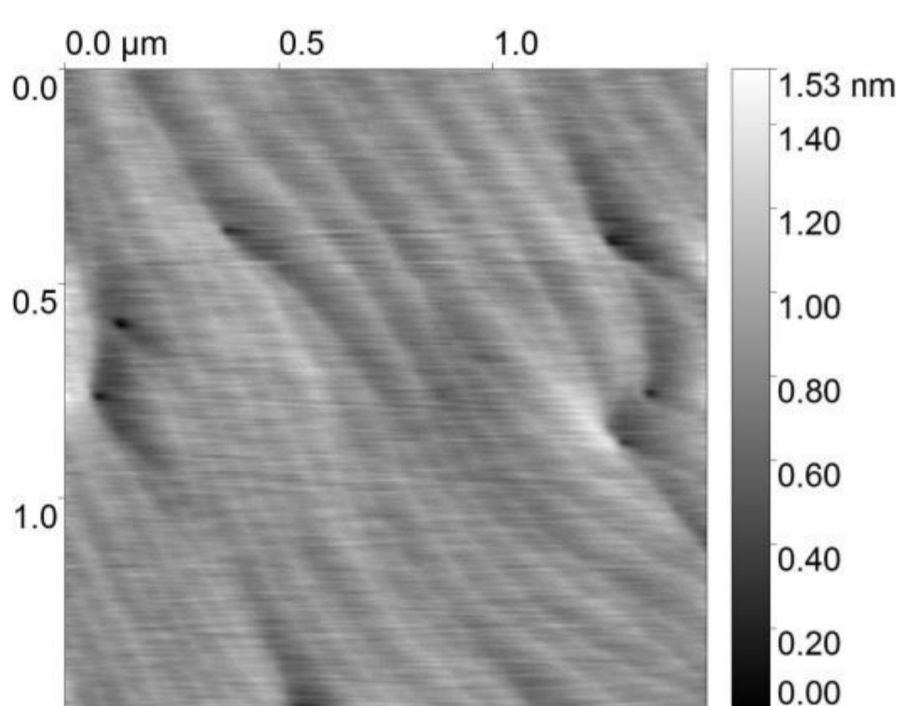


Рис. 1. АСМ изображение необлученного участка поверхности GaN.

Рис. 1-3 показывают изображения АСМ необлученной поверхности GaN и поверхностей, облученных ионами P и  $PF_4$  дозами по 30 ДПА в различном порядке. Видно, что после облучений наблюдается формирование наночастиц на поверхности нитрида галлия. При последовательном облучении GaN молекулярными и атомарными ионами  $PF_4$  и P проявляется существенное различие в топографии поверхности в зависимости от порядка облучения.

При облучении сначала ионами  $PF_4$  высота сформированных наночастиц больше. Кроме того, из рис. 4 видно, что больше и итоговая шероховатость поверхности. Как показано в [2], облучение GaN атомарными ионами P приводит к свеллингу поверхности, в то время как при большей плотности каскадов столкновений при облучении молекулярными ионами, происходит распыление поверхности. Согласно рис. 4, при последовательном облучении свеллинг преобладает только в случае облучения  $PF_4 + P$ , а при обратном порядке эффекты компенсируют друг друга. Данные эффекты, возможно, связаны с ослаблением молекулярного эффекта при облучении уже заведомо сильно разупорядоченной поверхности GaN кластерными ионами.

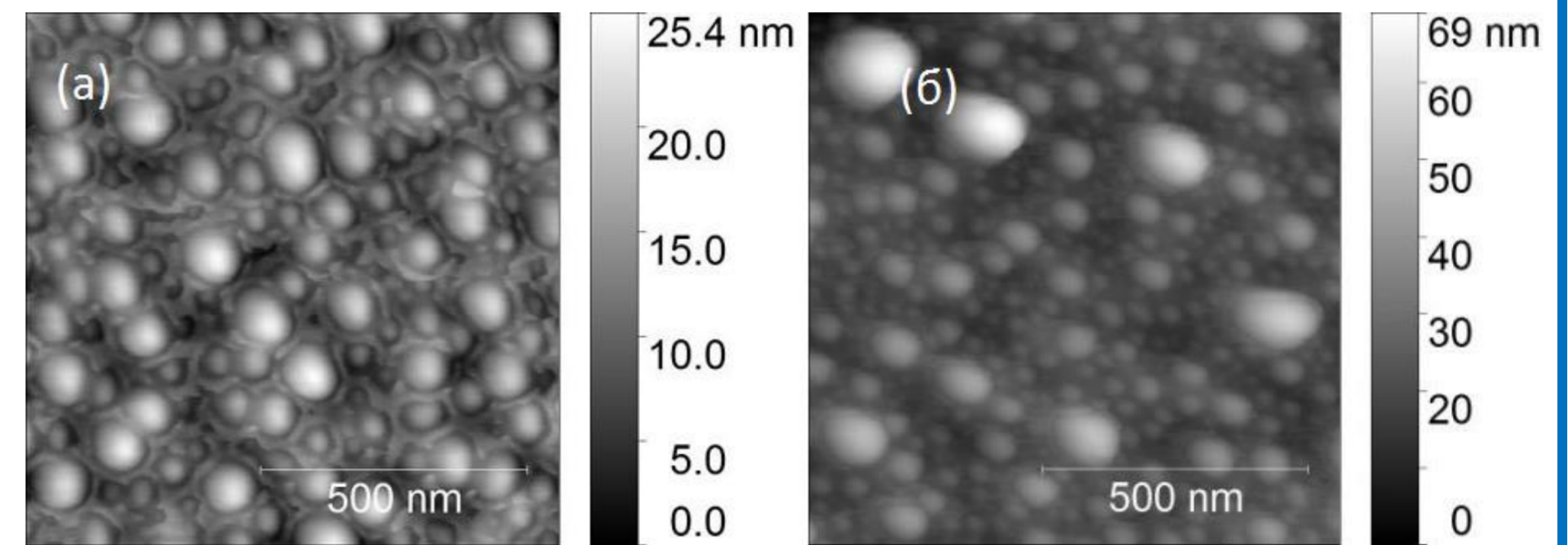


Рис. 2. АСМ изображения топографии поверхности GaN, облученной ионами в порядке P 40 кэВ 30 ДПА +  $PF_4$  140 кэВ 30 ДПА (а) и  $PF_4$  140 кэВ 30 ДПА + P 40 кэВ 30 ДПА (б).

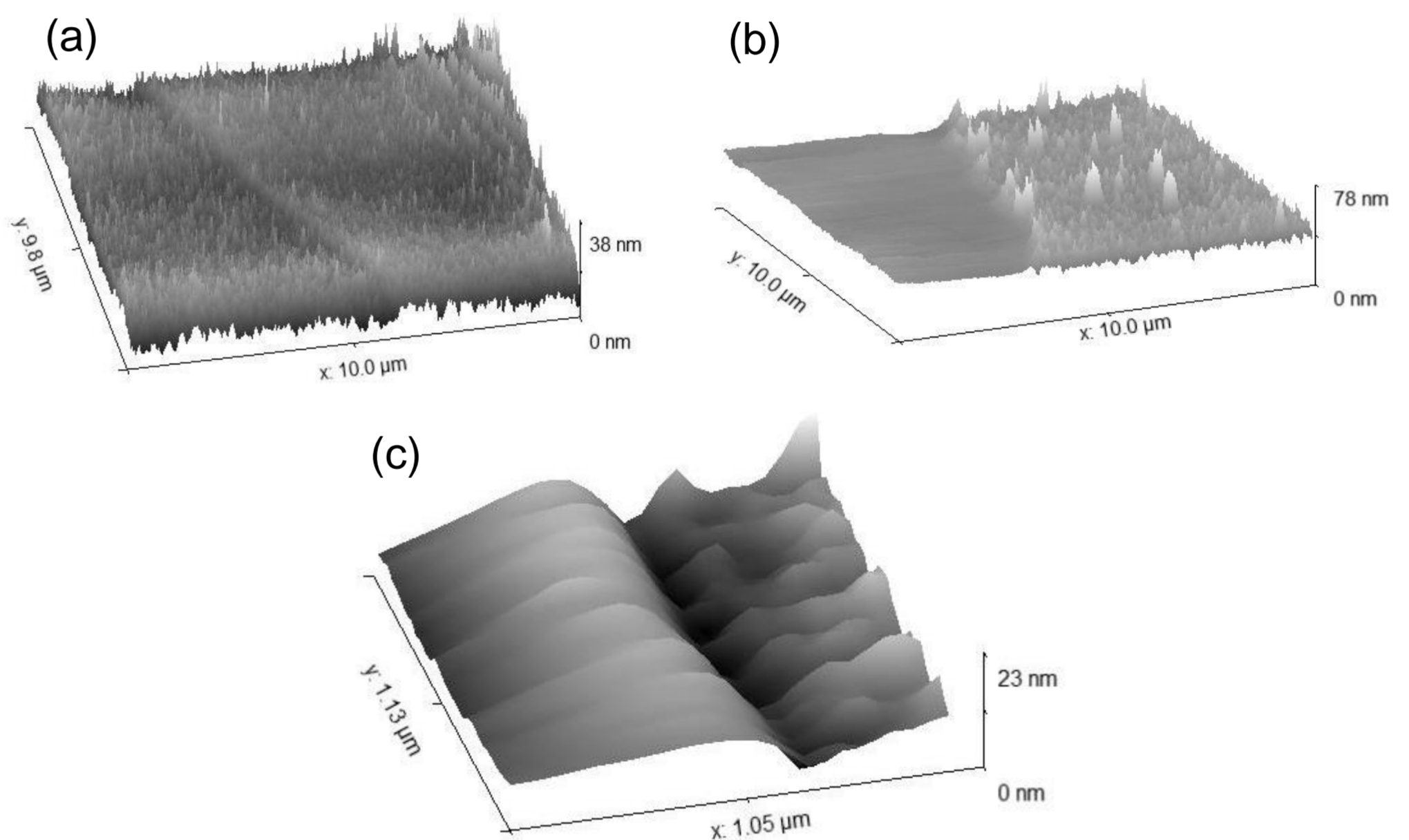


Рис. 3. 3D АСМ изображения границ областей облучения поверхности GaN: (а) между областью, облученной P 40 кэВ 30 ДПА (справа) и областью, облученной P 40 кэВ 30 ДПА +  $PF_4$  140 кэВ 30 ДПА. (б) между областью, облученной P 40 кэВ 30 ДПА (справа) и необлученной областью. (с) между необлученной областью (слева) и областью, облученной  $PF_4$  140 кэВ 30 ДПА + P 40 кэВ 30 ДПА.

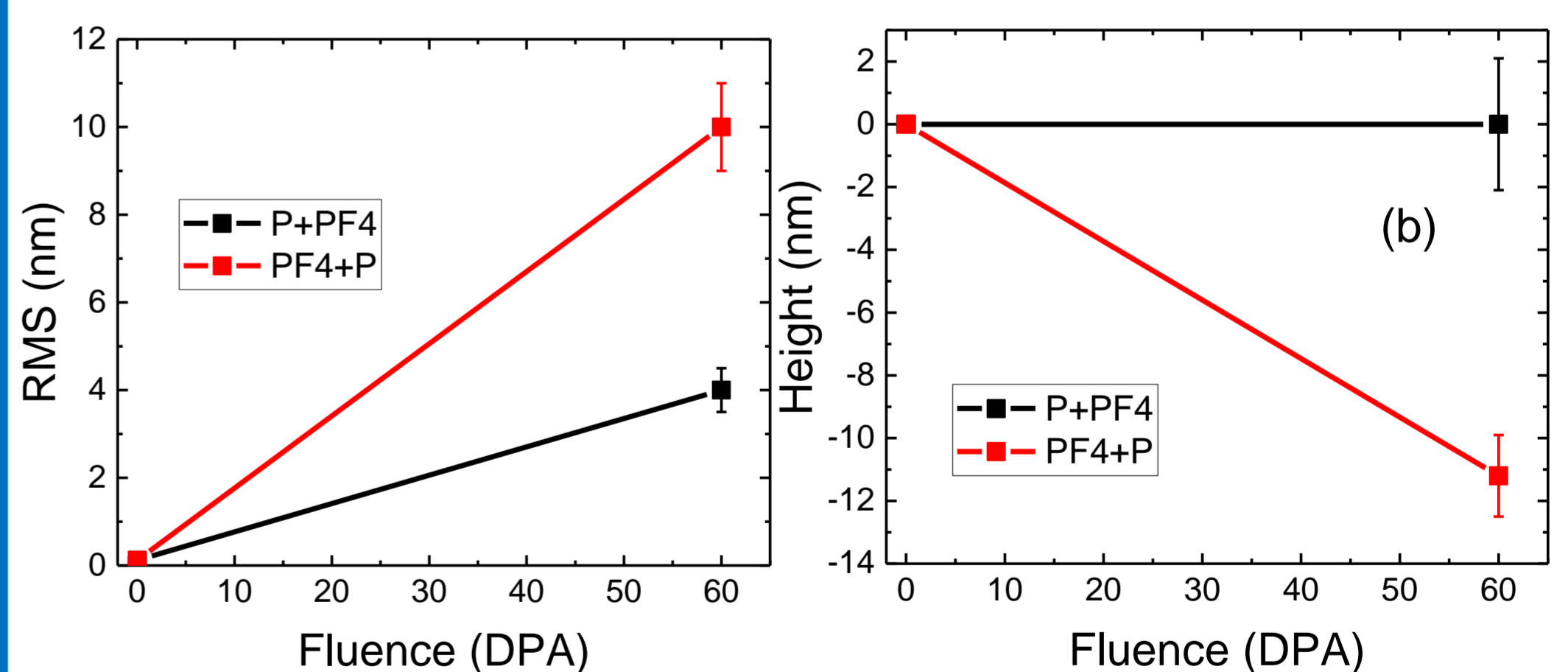


Рис. 4. Зависимости от суммарной дозы (а) среднеквадратичной шероховатости поверхности GaN (б) высоты ступеньки между облученной и необлученными областями образцов.

## Заключение

- Обнаружен неизвестный ранее эффект некоммутативности при изменении топографии поверхности нитрида галлия в результате облучения ионами.
- При облучении GaN ионами P и  $PF_4$  в порядке  $PF_4 + P$  наблюдается больший уровень шероховатости поверхности, чем при облучении в обратном порядке. Также при таком облучении эффекты распыления и свеллинга примерно компенсируют друг друга, в то время как в обратном порядке преобладает распыление.
- Наблюдаемые эффекты вызваны менее выраженным молекулярным эффектом в случае облучения заранее поврежденной поверхности.

1. Ziegler J.F., SRIM-2013 software package, available online at <http://www.srim.org>.

2. Titov A.I., Karaseov P.A., Karabeshkin K.V., Belyakov V.S., Arkhipov A.V., Kucheyev S.O. Nucl Instrum Methods Phys Res B, **315**, 257 (2013)

3. Titov A.I., Karaseov P.A., Karabeshkin K.V., Struchkov A.I. Vacuum, 2020, **173**, p. 109149.