

Наноструктурирование поверхности монокристалла КТР с помощью бомбардировки кластерными ионами

И.В. Николаев, Н.Г. Коробейщиков*

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

**i.nikolaev@nsu.ru*

Аннотация. Рассмотрено формирование самоупорядоченных периодических наноструктур на поверхности титанил-фосфата калия (КТР) при бомбардировки кластерными ионами аргона. Проведено сравнение результатов бомбардировки кластерными ионами аргона с различной энергией, приходящейся на 1 атом кластера $E/N_{mean} = 12.5$ и 110 эВ/атом. Продемонстрировано изменение рельефа поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для определения периода наноструктур использовалась функция спектральной плотности мощности (power spectral density, PSD). Выявлены особенности бомбардировки поверхности монокристалла КТР при нормальном и наклонном падениях кластерных ионов.

Ключевые слова: наноструктурирование, кластерный ион, титанил-фосфат калия, поверхность.

1. Введение

Титанил-фосфат калия (KTiOPO_4 , КТР) является нелинейно-оптическим монокристаллом и широко применяется в параметрических генераторах видимого и инфракрасного диапазонов излучения, в лазерных системах большой мощности, оптических волноводах в интегральной оптике и электрооптических модуляторах с высокой эффективностью преобразования частоты и др. [1, 2].

Известно, что пучок мономерных ионов может формировать периодические наноструктуры на поверхности различных материалов [3–5]. Такие структуры на различных поверхностях вызывают интерес для широкого практического использования [6]. Благодаря своим особенностям, газофазные ионно-кластерные пучки эффективно применяются для высокоэффективного сглаживания поверхности, но они могут быть эффективны также для формирования периодических наноструктур при энергии, приходящейся на один атом в кластере, единицы–десятки электрон-вольт [7–11]. Следует отметить, что кластерные ионы меньше повреждают приповерхностный слой после обработки, так как имеют меньшую глубину воздействия и могут иметь меньшую энергию, приходящуюся на один атом, по сравнению с мономерными ионами [8–11]. В данной работе сравнивается эффективность формирования наноструктур газофазными кластерами с низкой и высокой энергией атома в кластере.

2. Материалы и методы

В качестве мишеней использовались монокристаллы КТР, предварительно обработанные химико-механической полировкой (Рис.1). Для изучения рельефа поверхности монокристаллов до и после бомбардировки кластерными ионами аргона использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) NTEGRA Prima HD. Размер областей сканирования составлял 1 мкм × 1 мкм с разрешением 512×512 пикселей.

Принципиальное описание экспериментального оборудования приведено в [11]. Для определения параметров пучка кластерных ионов использовалась времяпролетная диагностика [12]. Бомбардировку поверхности монокристаллов КТР проводили кластерными ионами аргона с различной энергией, приходящаяся на один атом в кластере, – $E/N_{mean} = 12.5$ и 110 эВ/атом. Бомбардировку поверхности мишеней проводили при различных углах падения кластерных ионов: 0°, 45°, 60°, 70°. Максимальная доза облучения составила $3.7 \cdot 10^{15}$ ион/см².

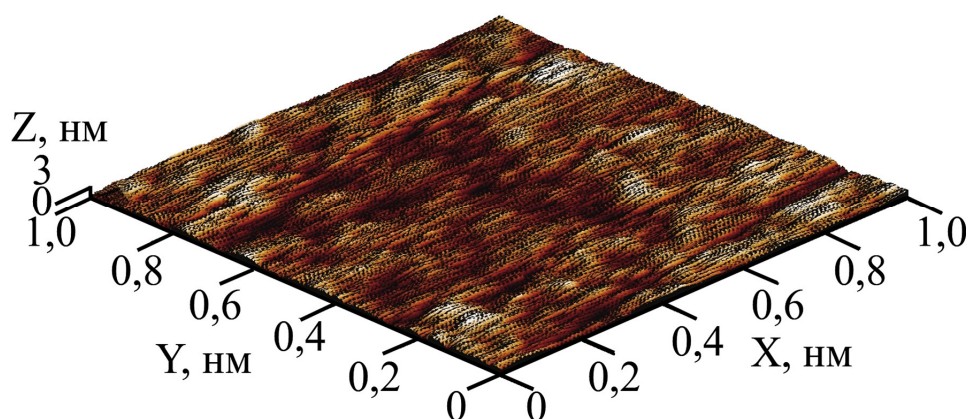


Рис.1. ACM-изображения исходной поверхности монокристалла КТР.

3. Результаты и обсуждение

На Рис.2 и Рис.3 представлены 3D ACM-изображения поверхности КТР после бомбардировки кластерными ионами аргона. Высота рельефа поверхности отсчитывается от самой низкой точки области сканирования ($Z = 0$ нм). Видно, что рельеф поверхности и формирование наноструктур значительно зависят от удельной энергии кластера E/N_{mean} .

На Рис.2 и Рис.3 видно, что при бомбардировке низкоэнергетическими кластерными ионами аргона (12,5 эВ/атом) максимальная высота рельефа в зависимости от наклонного угла падения в 3–7 раз выше, чем при высокоэнергетических кластерных ионах (110 эВ/атом). Также видно, что высокоэнергетическая бомбардировка не приводит к формированию наноструктур (Рис.3).

Для определения периода наноструктур использовалась функция спектральной плотности мощности (power spectral density, PSD-функция). PSD-функция шероховатости представляет собой быстрое Фурье-преобразование набора данных высот на поверхности [13, 14]. Данная функция позволяет учитывать латеральный размер неровностей и оценивать период неровностей с одинаковой высотой [11, 13–15]. В нашем случае, пик PSD-функции характеризует период самоупорядоченных наноструктур. Стоит отметить, что интеграл PSD-функции шероховатости представляет собой эффективный параметр шероховатости σ_{eff} , учитывающий латеральный размер неровностей на поверхности.

Как видно на Рис.4, после бомбардировки в обоих режимах при нормальном падении кластерных ионов аргона PSD-функции лежат ниже исходных PSD-функции, что характеризует сглаживание поверхности монокристаллов КТР. При наклонном падении кластеров, PSD-функции значительно отличаются для разных удельных энергий кластера. В отличие от высокоэнергетического режима (Рис.4б), низкоэнергетические кластерные ионы (Рис.4а) приводят к формированию наноструктур с периодом $\approx 167, 200, 250\text{--}300$ нм при углах падения кластеров $45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$, соответственно. Наиболее ярко выраженным является пик PSD-функции при 60° – это означает, что при данном угле наноструктуры являются наиболее упорядоченными с наименьшим разбросом по периоду.

В Таблице 1 приведены данные параметры шероховатости монокристалла КТР. Как видно из таблицы, при низкоэнергетическом режиме максимальная высота рельефа поверхности R_t возрастает в 17 раз при 60° , который является наиболее эффективным для формирования наноструктур (Рис.4а). Стоит отметить, что среднеквадратичная R_q и эффективная σ_{eff} шероховатости близки, но различаются при наклонном падении кластеров, что объясняется тем, что σ_{eff} учитывает латеральный размер неровностей, что вносит дополнительный вклад в величину шероховатости поверхности.

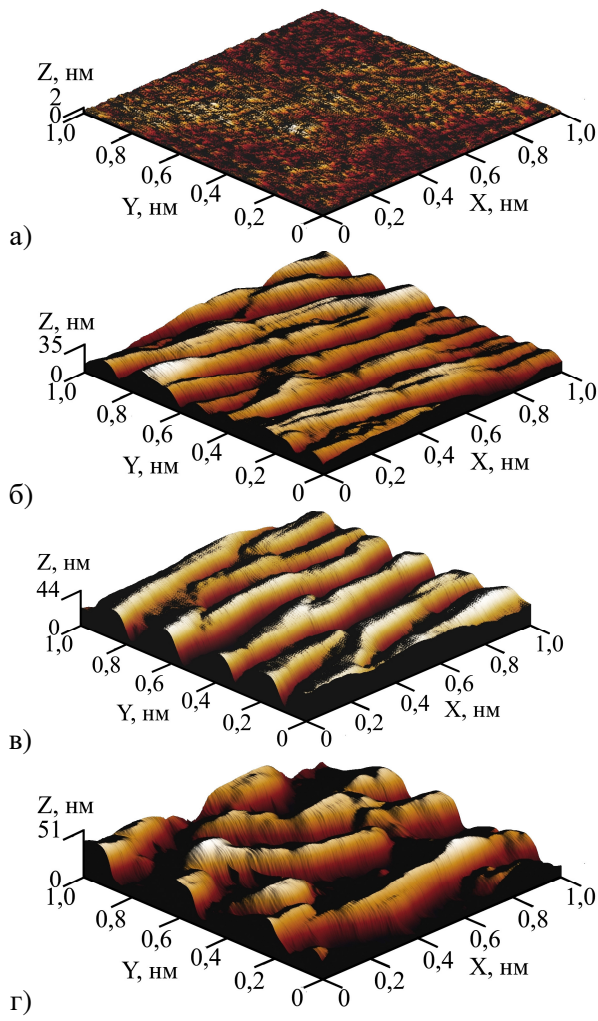


Рис.2. АСМ-изображения поверхности монокристалла КТР после бомбардировки при $E/N_{mean} = 12.5$ эВ/атом и при угле падения кластерных ионов: а) 0° , б) 45° , в) 60° , г) 70° .

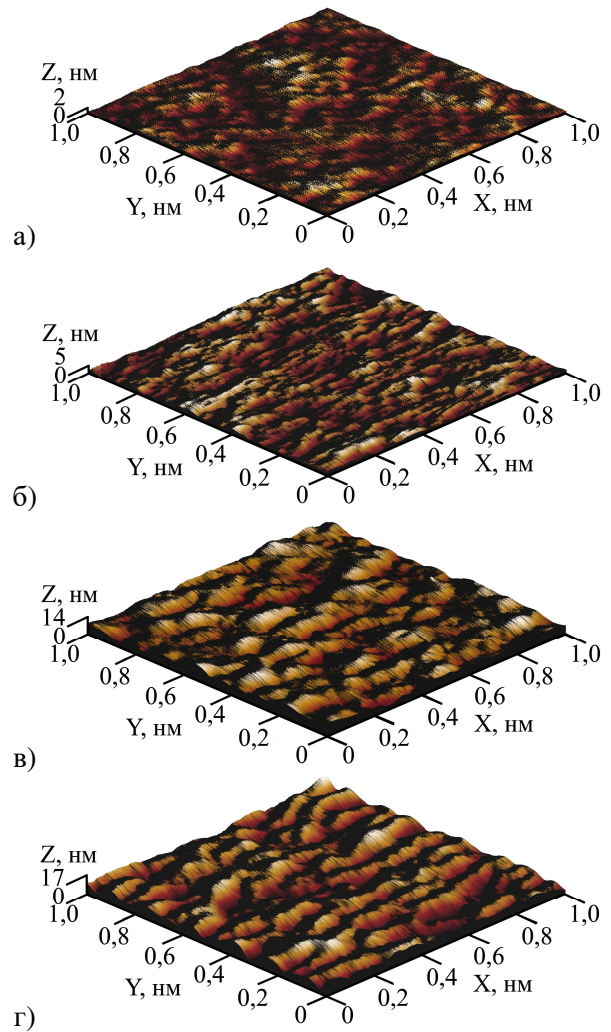


Рис.3. АСМ-изображения поверхности монокристалла КТР после бомбардировки при $E/N_{mean} = 110$ эВ/атом и при угле падения кластерных ионов: а) 0° , б) 45° , в) 60° , г) 70° .

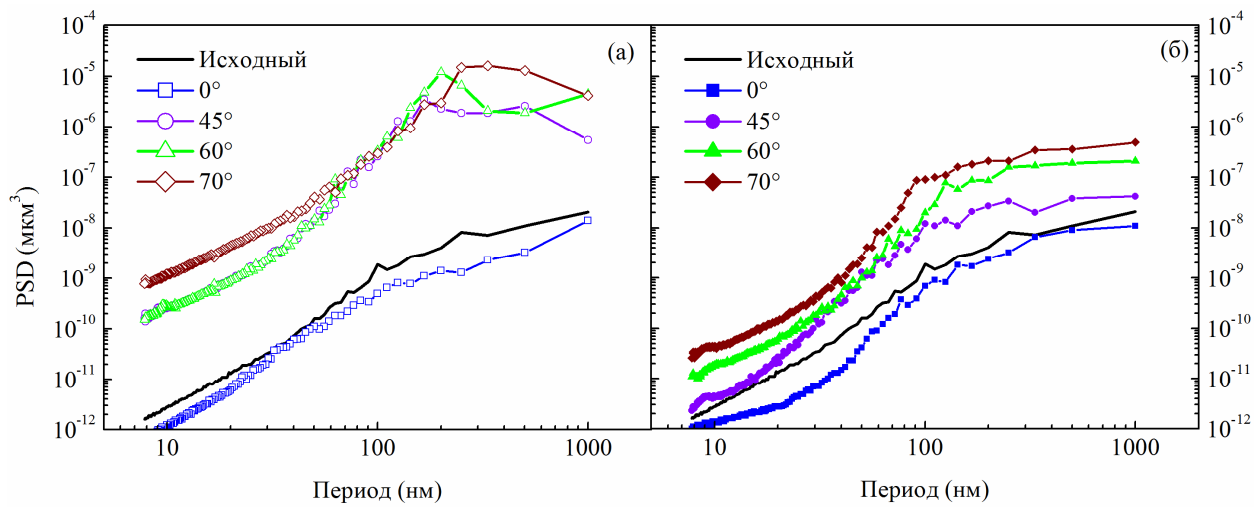


Рис.4. PSD-функции поверхности КТР до и после бомбардировки кластерными ионами аргона при E/N_{mean} : а) 12.5, (б) 110 эВ/атом.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхности монокристалла КТР

Угол падения кластеров	12 эВ/атом			110 эВ/атом		
	R_t , нм	R_q , нм	σ_{eff} , нм	R_t , нм	R_q , нм	σ_{eff} , нм
Исходный	2.6	0.40	0.38	2.6	0.40	0.38
0°	2.0	0.25	0.23	2.2	0.30	0.30
45°	35	5.8	6.5	4.7	0.75	0.78
60°	44	8.5	9.2	14	1.5	1.7
70°	51	11.0	11.8	17	2.3	2.5

4. Заключение

Экспериментально изучено влияние принципиально различных режимов бомбардировки кластерными ионами аргона на формирование наноструктур на поверхности монокристаллов КТР. При нормальном падении низко- и высокоэнергетических кластерных ионов шероховатость поверхности уменьшается на 23% и 15%, соответственно. Бомбардировка высокоэнергетическими кластерными ионами ($E/N_{mean} = 110$ эВ/атом) не приводит к формированию упорядоченных наноструктур. Предполагается, что бомбардировка низкоэнергетическими кластерными ионами (12.5 эВ/атом) приводит к эффективному формированию самоупорядоченных периодических наноструктур, т.к. данной удельной энергии кластеров недостаточно для эффективного распыления мишени, но достаточно для значительного латерального смещения приповерхностных атомов мишени. Наиболее упорядоченные наноструктуры формируются при бомбардировке поверхности под углом 60° и имеют период ≈ 200 нм. Одним из приложений является формирование периодических наноструктур на подложках просветляющих покрытий для улучшения их качества.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант FSUS–2020–0039) в части пробоподготовки и анализа и Российского научного фонда (грант №21–19–00046) в части обработке образцов кластерными ионами. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Прикладная физика» Новосибирского государственного университета.

5. Литература

- [1] Mamrashev A., Nikolaev N., Antsygin V., Andreev Y., Lanskii G., Meshalkin A., *Crystals*, **8**(9), 310, 2018; doi: 10.3390/cryst8080310
- [2] Sorokina N.I., Voronkova V.I., *Crystallogr. Rep.*, **52**, 80, 2007; doi: 10.1134/S1063774507010099
- [3] El-Atwani O., Ortoleva S., Cimaroli A., Allain J.P., *Nanoscale Res. Lett.*, **6**, 403, 2011; doi: 10.1186/1556-276X-6-403
- [4] Ziberi B., Frost F., Höche T., Rauschenbach B., *Vacuum*, **81**, 155, 2006; doi: 10.1016/j.vacuum.2006.03.018
- [5] Pohl K., Bartelt M.C., de la Figuera J., Bartelt N.C., Hrbek J., Hwang R.Q., *Nature*, **397**, 238, 1999; doi: 10.1038/16667
- [6] Barth J.V., Costantini G., Kern K., *Nature*, **437**, 671, 2005; doi: 10.1038/nature04166
- [7] Toyoda N., Mashita T., Yamada I., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **232**, 212, 2005; doi: 10.1016/j.nimb.2005.03.047
- [8] Toyoda N., Tilakaratne B., Saalem I., Chu W.-K., *Appl. Phys. Rev.*, **6**, 020901, 2019; doi: 10.1063/1.5030500

- [9] Zeng X., Pelenovich V., Xing B., Rakhimov R., Zuo W., Tolstogouzov A., Liu C., Fu D., Xiao X., Beilstein J., *Nanotech.*, **11**, 383, 2020; doi: 10.3762/bjnano.11.29
- [10] Ieshkin A., Kireev D., Ozerova K., Senatulin B., *Mater. Lett.*, **272**, 127829, 2020; doi: 10.1016/j.matlet.2020.127829
- [11] Korobeishchikov N.G., Nikolaev I.V., Roenko M.A., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **438**, 1, 2019; doi: 10.1016/j.nimb.2018.10.019
- [12] Korobeishchikov N.G., Kalyada V.V., Skovorodko P.A., Shmakov A.A., Khodakov M.D., Shulzhenko G.I., Voskoboynikov R.V., Zarvin A.E., *Vacuum*, **119**, 256, 2015; doi: 10.1016/j.vacuum.2015.05.039
- [13] Persson, B.N.J.; Albohr, O.; Tartaglino, U.; Volokitin, A.I.; Tosatti, E., *J. Phys. Condens. Matter.*, **17**, R1, 2004; doi: 10.1088/0953-8984/17/1/R01
- [14] Duparré A., Ferre-Borrull J., Gliech S., Notni G., Steinert J., Bennett J.M., *Appl. Opt.*, **41**, 154, 2002; doi: 10.1364/AO.41.000154
- [15] Martínez J.F.G., Nieto-Carvajal I., Abad J., Colchero J., *Nanoscale Res. Lett.*, **7**, 174, 2012; doi: 10.1186/1556-276X-7-174