

УДК 621.315.548.55

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕЙКОСАПФИРА ПУЧКОМ ИОНОВ АРГОНА ПОД МАЛЫМ УГЛОМ ПАДЕНИЯ К ПОВЕРХНОСТИ

О.В. Девицкий^{a,b}, О.Г. Дмитриева^b, Д.А. Никулин^b, И.В. Касьянов^{a,b}, И.А. Сысоев^b

^a Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

^b Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация
 Адрес для переписки: v2517@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.05.19, принята к печати 03.07.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Девицкий О.В., Дмитриева О.Г., Никулин Д.А., Касьянов И.В., Сысоев И.А. Исследование изменения морфологии поверхности лейкосапфира пучком ионов аргона под малым углом падения к поверхности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 848–854. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования особенностей воздействия пучка ионов аргона на поверхность сапфира под малыми углами к поверхности. В качестве экспериментальных образцов использовались механически шлифованные и дефектные эпитолерованные пластины лейкосапфира размерами $20 \times 20 \times 1,2$ мм. Исходная шероховатость поверхности шлифованных образцов составляла 0,250–1 мкм, эпитолерованных — 5–10 нм. **Метод.** Для проведения исследований использована установка ионно-лучевого осаждения, включающая в себя ионный источник типа КЛАН-53М с нейтрализатором ионов. Ионный источник генерирует ионный поток с энергиями в диапазоне 150–1500 эВ при выходной плотности ионного тока до 4 мА/см², с ионным током от 10 до 80 мА. Исследования проведены при разных технологических параметрах ионно-лучевой полировки: энергии ионов, угле между поверхностью сапфира и осью ионного пучка α . **Основные результаты.** Выявлены эффекты изменения морфологии поверхности сапфира как с сохранением, так и с изменением общего уровня шероховатости, а также эффект структурирования поверхности при обработке в двух проекциях с формированием пологих вершин диаметром 2 мкм. Результаты эксперимента показали, что максимальная эффективность (наибольшее значение изменения средней арифметической шероховатости поверхности) при ионно-лучевой полировке наблюдается при α равном 15° и энергии ионного пучка 400 эВ. При значении α от 25 до 30° происходит ориентированное изменение морфологии поверхности от симметрично упорядоченного микрорельефа поверхности на асимметричный. При этом пологие стороны мало стравливаются, и наблюдается эффект крутого теневого выглаживания локального микрорельефа, но с сохранением общего уровня шероховатости на прежнем уровне. После обработки поверхности данного образца ионным пучком на первом этапе эксперимента произведена повторная обработка под углом 90° по отношению к предыдущей обработке, что привело к перекрестному распылению теневых участков и оформлению пологих вершин диаметром около 2 мкм (эффект структурирования поверхности подложки). **Практическая значимость.** После проведения ионно-лучевой полировки образцов эпитолерованной сапфировой подложки наблюдается наиболее высоких неровностей поверхности, причем значение средней арифметической шероховатости поверхности снизилось с 5,7 до 0,9 нм для полированного образца.

Ключевые слова

ионно-лучевая обработка, шероховатость поверхности сапфира, ионно-лучевая полировка, атомно-силовая микроскопия

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания «Разработка и создание полупроводниковых гетероинтерфейсов на основе многокомпонентных материалов для устройств СВЧ-электроники и фотоники» (№ АААА-А19-119040390081-2).

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854

STUDY OF LEUKOSAPPHIRE SURFACE MORPHOLOGY CHANGE BY ARGON ION BEAM AT SMALL GRAZING ANGLE

O.V. Devitskiy^{a,b}, O.G. Dmitrieva^b, D.A. Nikulin^b, I.V. Kasyanov^{a,b}, I.A. Sysoev^b

^a Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

^b North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation

Corresponding author: v2517@rambler.ru

Article info

Received 28.05.19, accepted 03.07.19

Article in Russian

For citation: Devitsky O.V., Dmitrieva O.G., Nikulin D.A., Kasyanov I.V., Sysoev I.A. Study of leucosapphire surface morphology change by argon ion beam at small grazing angle. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 848–854 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854

Abstract

Subject of Research. The paper presents the results of experimental study on the specific features of argon ion beam effect on a sapphire surface at small grazing angles. Mechanically ground and defective epipolished leucosapphire plates with $20 \times 20 \times 1.2$ mm in size were used as experimental samples. The initial surface roughness of the polished samples was 0.250–1 μm and of the epipolished ones was 5–10 nm. **Method.** The ion beam deposition setup was used for research. It includes the ion source of CLAN-53M type with ion neutralizer. The ion source generates ion flux with energies in the range of 150–1500 eV, with an output ion current density up to 4 mA/cm², with ion current from 10 to 80 mA. The studies were carried out at different technological parameters of ion-beam polishing: the ion energy and the angle between the sapphire surface and the ion beam axis α . **Main Results.** We have determined effects of sapphire surface morphology change both with preservation and change in the overall roughness level, and the effect of surface structuring during processing in two projections with the formation of flat peaks with a diameter of 2 μm . The experiment results have shown that the maximum efficiency (the highest value is a change in the arithmetic average surface roughness) during ion-beam polishing is observed at α equal to 15° and the ion beam energy of 400 eV. When α value changes from 25 to 30°, an oriented change of the surface morphology from the symmetrically ordered surface microrelief to an asymmetric one occurs. At the same time, the flat sides do not bleed much, and the effect of steep shadow smoothing of the local microrelief is observed with retention of the same general roughness level. After the sample surface processing with ion beam at the first stage of the experiment, it was re-processed at 90° angle relative to the previous treatment, which led to cross-spraying of the shadow sections and the design of gentle peaks with a diameter of about 2 μm (effect of the substrate surface structuring). **Practical Relevance.** After the ion-beam polishing of epipolished sapphire substrate samples, smoothing of the highest surface irregularities is observed, and the average arithmetic value of surface roughness has decreased from 5.7 nm to 0.9 nm for the polished sample.

Keywords

ion-beam treatment, sapphire surface roughness, ion-beam polishing, atomic force microscopy

Acknowledgments

The publication was prepared as part of the state enterprise implementation “Development and creation of semiconductor hetero interfaces based on multicomponent materials for microwave electronics and photonics devices” (No. AAAA-A19-119040390081-2).

Введение

На данный момент сапфир является основным материалом для изготовления светодиодов. Параметры его кристаллической решетки позволяют получать эпитаксиальный слой GaN высокого кристаллического совершенства. От качества поверхности сапфировых подложек во многом зависят важнейшие характеристики светодиодов. Наиболее перспективным методом снижения уровня шероховатости поверхности сапфировых подложек является ионно-лучевая полировка [1–6]. Этот метод представляет наибольший интерес у исследователей, так как кроме полировки он позволяет формировать на поверхности подложки массивы повторяющихся поверхностных структур или, иными словами, текстурировать поверхность подложки [4].

Основными параметрами, влияющими на шероховатость поверхности подложки сапфира при ионно-лучевой полировке, являются: энергия ионного потока, температура поверхности подложки и угол падения ионного потока на поверхность сапфировой подложки. В работе [4] исследована зависимость влияния поверхности сапфировой подложки от ее температуры. При этом было обнаружено, что скорость распыления сапфира остается постоянной вплоть до температуры 427 °С, однако изменение морфологии поверхности и ее шероховатости в данном исследовании не затрагивалось. Исследование влияния ионно-лучевой полировки на поверхностные дефекты обсуждалось в работе [5]. В ней установлено, что после ионно-лучевой полировки поверхностные дефекты сглаживаются, микрорельеф поверхности усредняется. Также необходимо сказать, что ионно-лучевая полировка поверхности сапфира имеет важное влияние при удалении нарушенного слоя, образующегося при его механической обработке [6–8]. Все приведенные факты свидетельствуют о том, что метод ионно-лучевой полировки поверхности сапфира является достаточно перспективным.

Целью данной работы является исследование изменения морфологии и изменения средней шероховатости поверхности сапфира при ионно-лучевой полировке при малых углах падения к поверхности.

Материалы и методы

Для проведения исследований была использована установка ионно-лучевого осаждения, включающая в себя ионный источник типа КЛАН-53М с нейтрализатором ионов [9]. Ионный источник генерирует ионный поток с энергиями в диапазоне 150–1500 эВ при выходной плотности ионного тока до 4 mA/cm² с ионным током от 10 до 80 mA. Выходной диаметр ионного потока составляет 50 мм. Рабочим газом являлся аргон [10].

Внутри вакуумной камеры установки на специально изготовленной оснастке, схематически изображенной на рис. 1, было установлено шесть образцов сапфировой подложки, расположенных под углами α к оси ионного потока в диапазоне от 5 до 30° с шагом 5° и точностью 10 %. Для оптимизации времени и улучшения воспроизводимости результатов эксперимента производилась одновременная загрузка всех шести образцов. Расстояние от ионного источника до поверхности полируемых подложек составляло 100 и 200 мм.

Температура мишеней сапфира была постоянной во всех случаях и не превышала 200 °С (точность ± 2 %), что было зафиксировано с помощью термопары хромель–алюмель с обработкой данных внешним мультиметром. При проведении исследований плотность тока составляла от 0,28 до 0,75 мА/см². Так как время процесса варьировалось от 1 до 3 ч, то флуенс, исходя из формулы $\Phi = j\Delta t/e$, где j — плотность ионного тока, Δt — время ионно-лучевой полировки, e — заряд электрона, изменялся от $7,5 \times 10^{15}$ до 15×10^{15} см⁻².

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе проводилась ионно-лучевая полировка шлифованных подложек с диапазоном угла обработки от 5 до 30° и при энергии ионного пучка 400–1200 эВ. Это необходимо для определения рабочих пределов технологической оснастки и общего характера процесса ионно-лучевой полировки.

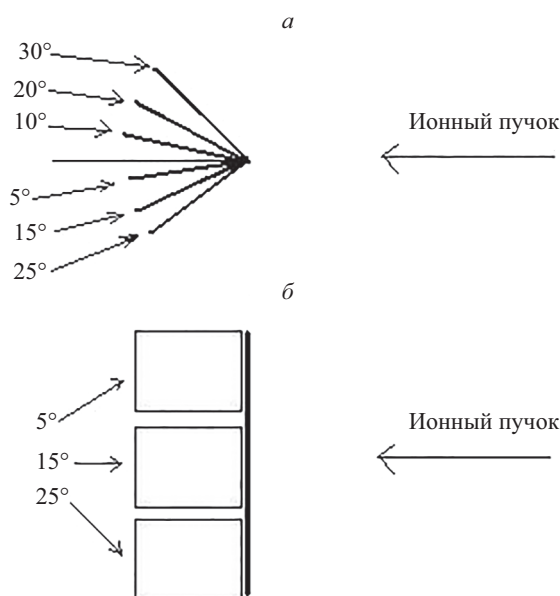


Рис. 1. Схематическое изображение оснастки для ионно-лучевой полировки: а — вид сверху, б — вид спереди

Второй этап исследования включал в себя эксперимент по ионно-лучевой полировке шлифованных подложек с ограниченным набором углов для получения более выраженного изменения морфологии сапфировой подложки.

На заключительном, третьем, этапе исследования подвергались ионно-лучевой полировке эпитолированные сапфировые подложки.

В качестве экспериментальных образцов на первом и втором этапе исследования использовались механически шлифованные сапфировые подложки размерами $20 \times 20 \times 1,2$ мм. На третьем этапе исследования использовались дефектные эпитолированные пластины лейкосапфира. Исходная шероховатость поверхности шлифованных образцов составляла 0,250–1 мкм, эпитолированных 5–10 нм.

Для определения наиболее оптимального угла α для ионно-лучевой полировки эпитолированных сапфировых подложек проводился эксперимент при энергии ионного пучка 400 эВ и плотности ионного тока 0,75 мА/см².

Для оценки состояния сапфировой подложки до и после ионно-лучевой полировки, а также изменения шероховатости поверхности сапфира [11–13], проводились исследования на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Aura фирмы NT-MDT. Обработка полученных с помощью АСМ данных включала в себя вычитание поверхности второго порядка и определения величины средней арифметической шероховатости поверхности и была произведена в программной среде Nova 1000 [14].

Результаты и обсуждение

Результаты проведения эксперимента по ионно-лучевой полировке шлифованных образцов сапфировой подложки приведены в таблице. Основным исследуемым показателем являлось изменение средней арифметической шероховатости поверхности ΔRa как разности между величиной исходной среднеарифметической шероховатости поверхности образца Ra до и после ионно-лучевой полировки.

Таблица. Параметры проведения эксперимента для шлифованных образцов

Энергия ионного пучка U , эВ	Плотность ионного тока J , мА/см^2	Время полировки, мин	Изменение средней арифметической шероховатости поверхности ΔRa , нм при величине угла α , град					
			5°	10°	15°	20°	25°	30°
400	0,75	120	50	112	513	447	370	340
600	0,34	60	18	158	306	171	136	168
600	0,75	120	30	80	191	112	14	160
900	0,28	180	36	48	186	618	423	353
900	0,62	120	43	63	112	182	197	257
1200	0,62	120	78	141	-41	-26	-16	-10

На рис. 2 представлен график зависимости изменения разницы средней арифметической шероховатости сапфировой подложки ΔRa до ионной полировки и после образцов от угла α при различных значениях энергии ионного пучка.

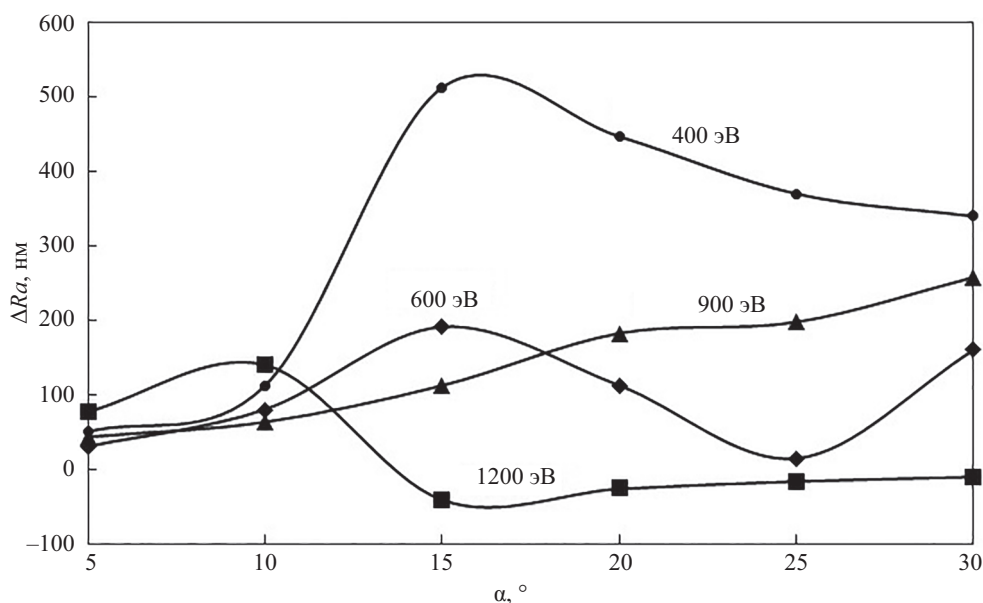


Рис. 2. График зависимости изменения средней арифметической шероховатости Ra образцов сапфировой подложки от угла α при различных значениях энергии ионного пучка

Из представленных на рис. 2 зависимостей следует, что максимальная эффективность (наибольшее значение ΔRa) при ионно-лучевой полировке наблюдается при α равном 15° и энергии ионного пучка 400 эВ.

Также следует отметить, что с возрастанием значения энергии ионного пучка общая эффективность ионно-лучевой полировки поверхности сапфира снижается. Для образцов, полученных при энергии ионного пучка 1200 эВ и α равным 15 и 20°, наблюдается отрицательное значение ΔRa (увеличение Ra с 526 до 567 нм и с 241 до 262 нм соответственно).

Этот факт можно объяснить тем, что при высоких значениях энергии ионного пучка величина оптимального угла травления поверхности сапфира α снижается. Поэтому в результате ионно-лучевой полировки при углах α более 15° происходит увеличение вытравливания рельефа поверхности подложки и при слабом сглаживании наиболее высоких неровностей поверхности, вследствие этого значение ΔRa увеличивается.

На рис. 3 представлены топографические АСМ-изображения образцов шлифованных сапфировых подложек до и после проведения ионно-лучевой полировки.

Из анализа представленных изображений следует, что для значений угла α в пределах 5–10° (рис. 3, а, б) вместе со стравливанием местного рельефа поверхности происходит снижение величины ΔRa вследствие затенения впадин от потока ионов вершинами возвышенностей и слишком малого угла для распыления во впадинах с переходом механизма распыления в отражение атомов аргона.

В диапазоне углов α 15–20° наблюдается снижение Ra , так как отмечается наиболее интенсивное травление максимально высоких неровностей поверхности подложки (рис. 3, в, г).

При значениях α от 25 до 30° происходит ориентированное изменение морфологии поверхности с симметрично упорядоченного микрорельефа поверхности на асимметричный (рис. 3, д, е). При этом полугие

стороны мало стравливаются и наблюдается эффект крутого теневого выглаживания локального микро рельефа, но с сохранением общего уровня шероховатости на прежнем уровне. После обработки поверхности данного образца ионным пучком на первом этапе эксперимента была произведена повторная обработка по 90° по отношению к предыдущей обработке, что привело к перекрестной распылению теневых участков и оформлению пологих вершин диаметром около 2 мкм (эффект структурирования поверхности подложки). Полученные экспериментальные данные хорошо согласовываются с исследованием, описанным в работе [15].

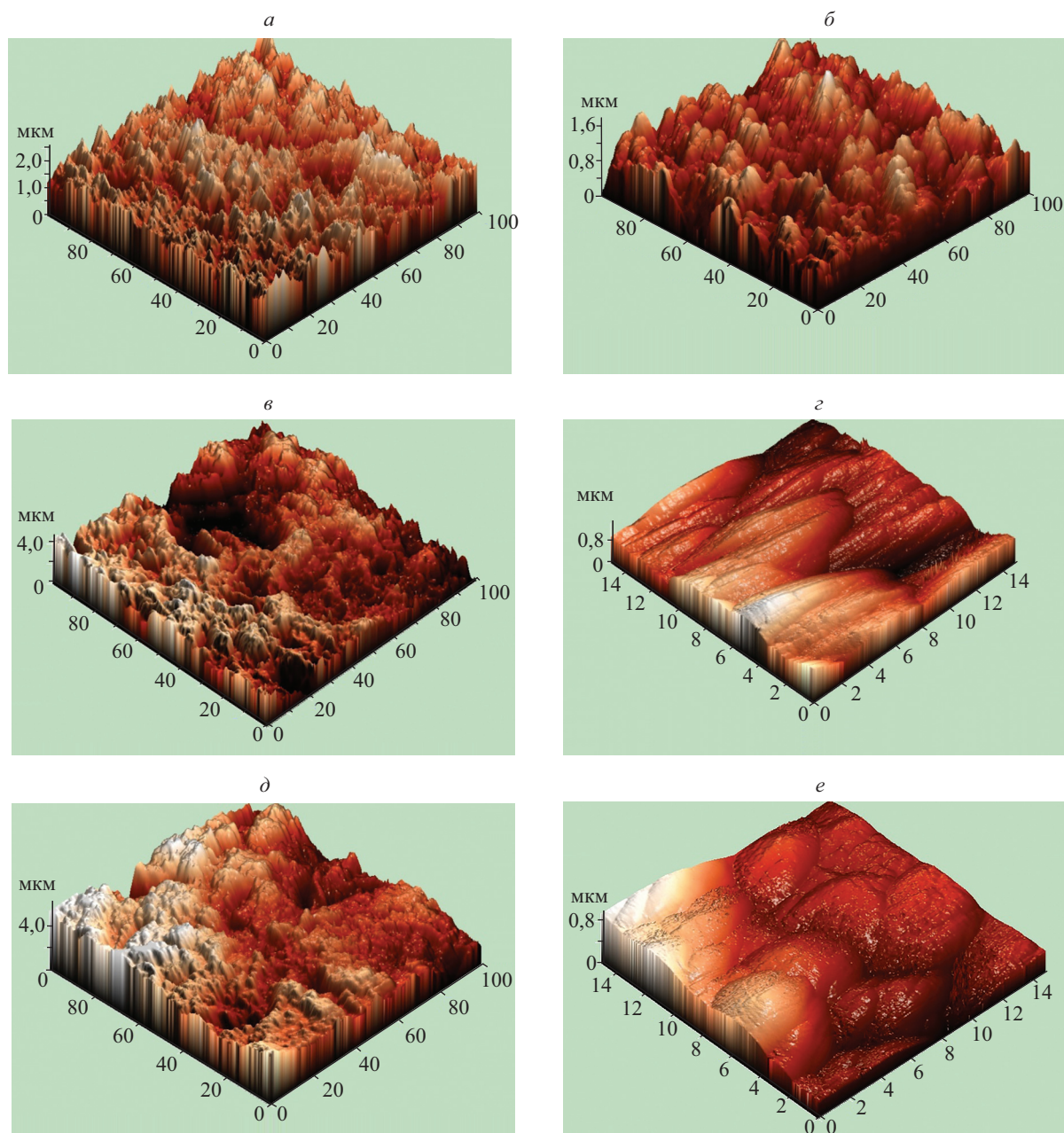


Рис. 3. Топографические АСМ-изображения образцов шлифованных сапфировых подложек до и после ионно-лучевой полировки при энергии ионного пучка 400 эВ и угле α : a, b — 10° ; c, d — 15° ; e, f — 30°

На рис. 4 представлены топографические АСМ-изображения образцов эпитолированной сапфировой подложки до и после проведения ионно-лучевой полировки. Из рисунка видно, что после проведения ионно-лучевой полировки наблюдается сглаживание наиболее высоких неровностей поверхности, причем значение ΔRa снизилось с 5,7 до 0,9 нм для полированного образца (рис. 4, б).

Таким образом, выбор параметров ионно-лучевой обработки поверхности сапфировых подложек позволяет производить их ионно-лучевую полировку, снижая величину среднеарифметической шероховатости поверхности вплоть до 0,9 нм.

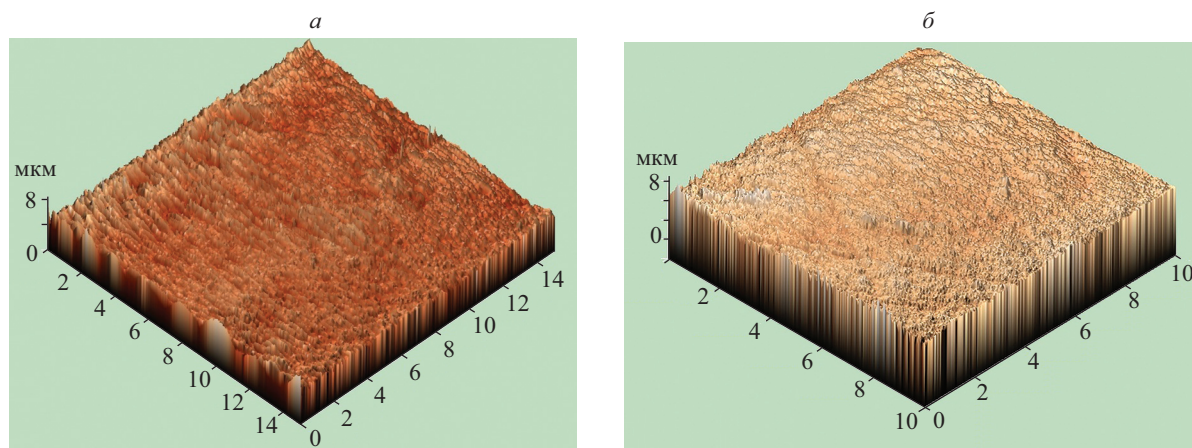


Рис. 4. Топографические АСМ-изображения образцов эпитопированных сапфировых подложек до (а) и после ионно-лучевой полировки (б) при угле α равном 15° и энергии ионного пучка 400 эВ

Заключение

В результате исследований ионно-лучевой полировки поверхности сапфировых подложек были выявлены особенности зависимости изменения морфологии подложек лейкосапфира при воздействии пучка ионов аргона на его поверхность. Выявлены зависимости изменения средней арифметической шероховатости от энергии ионного пучка и угла падения к оси образцов. Выявлены эффекты изменения характера рельефа на асимметричный с пологим стравливаемым склоном и крутым теньвым выглаживанием локального микрорельефа, но с сохранением общего уровня шероховатости, эффект снижения уровня средней шероховатости вследствие затенения впадин от потока ионов вершинами возвышенностей и слишком малого угла для распыления во впадинах, а также эффект структурирования поверхности при ионно-лучевой обработке в двух проекциях с формированием пологих вершин диаметром около 2 мкм.

Литература

1. Распыление под действием бомбардировки частицами. Вып. 3. Характеристики распыленных частиц, применения в технике / Под ред. Р. Бериша, К. Витмаака. Москва: Мир, 1998. С. 551–561.
2. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Боровская В.В., Машкова Е.С. Исследование процесса ионно-лучевой полировки поверхности оптических деталей приборов // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 36–39.
3. Барченко В.Т., Быстров Ю.А., Колгин Е.А. Ионно-плазменные технологии в электронном. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 331 с.
4. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: Сб. статей 1986–1987 гг. / Сост. Е.С.Машкова. М.: Мир, 1989. 346 с.
5. Ziberi B., Cornejo M., Frost F., Rauschenbach B. Highly ordered nanopatterns on Ge and Si surfaces by ion beam sputtering // Journal of Physics: Condensed Matter. 2009. V. 21. N 22. P. 224003. doi: 10.1088/0953-8984/21/22/224003
6. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Völlner J., Flamm D., Schindler A. Large area smoothing of surfaces by ion bombardment: Fundamentals and applications // Journal of Physics: Condensed Matter. 2009. V. 21. N 22. P. 224026. doi: 10.1088/0953-8984/21/22/224026
7. Aida H., Kim S.-W., Suzuki T. Effect of back-surface roughness of sapphire substrate on growth of GaN thin films // Precision Engineering. 2017. V. 50. P. 142–147. doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.05.001
8. Carter G., Nobes M., Katardjiev I. The theory of ion beam polishing and machining // Vacuum. 1993. V. 44. N 3-4. P. 303–309. doi: 10.1016/0042-207X(93)90174-9
9. Гончаров Л.А., Григорьев В.Г. Источники ионов для операций ионно-лучевой технологии // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 67–70.
10. Белоус В.А., Заднепровский Ю.А., Ломино Н.С., Соболев О.В. Роль аргона в газовой смеси с азотом при получении нитридных конденсатов системы Ti-Si-N в вакуумно-дуговых процессах осаждения // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 7. С. 69–76.

References

1. *Sputtering by particle bombardment: Vol. 3: Characteristics of sputtered particles, technical applications* / Ed. by R.Behrisch, K.Wittmaack. Berlin: Springer, 1991, XIII, 410 p. doi: 10.1007/3-540-53428-8
2. Andrianova N.N., Borisov A.M., Borovskaya V.V., Mashkova E.S. Ion-beam polishing study of the surfaces of optical device components. *Applied Physics*, 2012, no. 2, pp. 36–39. (in Russian)
3. Barchenko V.T., Bystrov Yu.A., Kolgin E.A. *Ion-plasma technologies in electronic production*. St. Petersburg, Energoatomizdat, 2001, 332 p. (in Russian)
4. *Fundamental and applied aspects of spraying solids: Sat. articles 1986–1987*. M.: Mir, 1989, 346 p. (in Russian)
5. Ziberi B., Cornejo M., Frost F., Rauschenbach B. Highly ordered nanopatterns on Ge and Si surfaces by ion beam sputtering. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, vol. 21, no. 22, pp. 224003. doi: 10.1088/0953-8984/21/22/224003
6. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Völlner J., Flamm D., Schindler A. Large area smoothing of surfaces by ion bombardment: Fundamentals and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, vol. 21, no. 22, pp. 224026. doi: 10.1088/0953-8984/21/22/224026
7. Aida H., Kim S.-W., Suzuki T. Effect of back-surface roughness of sapphire substrate on growth of GaN thin films. *Precision Engineering*, 2017, vol. 50, pp. 142–147. doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.05.001
8. Carter G., Nobes M., Katardjiev I. The theory of ion beam polishing and machining. *Vacuum*, 1993, vol. 44, no. 3-4, pp. 303–309. doi: 10.1016/0042-207X(93)90174-9
9. Gontcharov L.A., Grigorian V.G. Ion sources for ion-beam technology operations. *Applied Physics*, 2007, no. 5, pp. 67–70. (in Russian)
10. Belous V.A., Zadneprovskii Y.A., Lomino N.S., Sobol' O.V. Role of argon in its mixture with nitrogen in deposition of nitride condensates in the Ti-Si-N system and in vacuum arc deposition

11. Кузнецов А.С., Острун Б.С., Путилин Э.С., Лисицын Ю.В., Дронь О.С., Коровкина Н.М. Исследование процесса полирования сапфира // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. Т. 6. № 7(30). С. 129–135.
12. Wang Y.-Z., Wu W., Liu Z.-W., Yi Z., Ding M.-J., Zhang C.-G. Application of argon ion beam cross section polishing in material microstructure research // *Key Engineering Materials*. 2012. V. 492. P. 419–423. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.492.419
13. Осинский В.И., Гончаренко Т.И., Ляхова Н.Н. Влияние обработки поверхности чипов на экстракцию излучения сверхярких светодиодов на гетероструктурах InGaN/Al₂O₃. // *Физическая инженерия поверхности*. 2003. Т. 1. № 1. С. 94–98.
14. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермяков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
15. Лунин Л.С., Синельников Б.М., Сысоев И.А. Особенности ионно-лучевой полировки поверхности сапфира // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018. № 9. С. 73–77. doi: 10.1134/S020735281809010X
11. Kuznetsov A.S., Ostrun B.S., Putilin E.S., Lisitsin Yu.V., Dron O.S., Korovkina N.M. Investigation on the process of polishing sapphire. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, vol. 6, no. 7(30), pp. 129–135. (in Russian)
12. Wang Y.-Z., Wu W., Liu Z.-W., Yi Z., Ding M.-J., Zhang C.-G. Application of argon ion beam cross section polishing in material microstructure research. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 492, pp. 419–423. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.492.419
13. Osinsky V.I., Goncharenko T.I., Lyahova N.N. Influencing of surfacing chips on extraction of radiation of superbright light emitting diodes on heterostructures InGaN/Al₂O₃. *Physical Surface Engineering*, 2003, vol. 1, no. 1, pp. 94–98. (in Russian)
14. Moshnikov V.A., Spivak Yu.M., Alekseev P.A., Permyakov N.V. *Atomic force microscopy for the study of nanostructured materials and instrument structures*: textbook. St. Petersburg: Publishing house of SPbGETU “LETI”, 2014, 144 p. (in Russian)
15. Lunin L.S., Sinel'nikov B.M., Sysoev I.A. Features of ion-beam polishing of the surface of sapphire. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 12, no. 5, pp. 898–901. doi: 10.1134/S1027451018050105

Авторы

Девичкий Олег Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, Scopus ID: 57193670678, ORCID ID: 0000-0003-3153-696X, v2517@rambler.ru

Дмитриева Олеся Геннадьевна — инженер, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-7512-3409, Alkor112@list.ru

Никulin Дмитрий Александрович — студент, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-0755-4068, dmitnikul@gmail.com

Касьянов Иван Владимирович — младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; ведущий инженер, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-6900-9420, redrem@rambler.ru

Сысоев Игорь Александрович — доктор технических наук, доцент, директор, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, Scopus ID: 32467535800, ORCID ID: 0000-0001-5415-0782, eianpisia@yandex.ru

Authors

Oleg V. Devitsky — PhD, Senior scientific researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Junior scientific researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, Scopus ID: 57193670678, ORCID ID: 0000-0003-3153-696X, v2517@rambler.ru

Olesya G. Dmitrieva — engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-7512-3409, Alkor112@list.ru

Dmitry A. Nikulin — student, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-0755-4068, dmitnikul@gmail.com

Ivan V. Kasyanov — Junior scientific researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Leading engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-6900-9420, redrem@rambler.ru

Igor A. Sysoev — D.Sc., Associate professor, Director, North Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, Scopus ID: 32467535800, ORCID ID: 0000-0001-5415-0782, eianpisia@yandex.ru