

05

Особенности формирования GaAs микродисков методом механической сканирующей зондовой литографии

© П.А. Алексеев, М.Е. Попов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: prokher@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 13 января 2025 г.

Принято к публикации 16 января 2025 г.

Исследуются особенности формирования литографического рисунка на (100) GaAs-подложке методом сканирующей зондовой литографии с использованием зондов с иглой из монокристаллического алмаза. Показано, что при нажатии зонда на поверхность и последующем движении относительно подложки происходит формирование углублений в подложке. Их глубина и ширина зависят от направления движения и формы острия зонда. Наибольшая глубина достигается при движении зонда в направлении, перпендикулярном плоскости грани острия с наибольшей площадью. Вследствие этого при циркулярном движении зонда возникает азимутальная неоднородность сформированных наноканавок по глубине, которая может быть устранена наклоном плоскости подложки.

Ключевые слова: сканирующая зондовая литография, атомно-силовая микроскопия, GaAs, микродиски.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.09.60229.20192

Методы сканирующей зондовой литографии позволяют производить безмасочную литографию современных материалов с помощью зонда сканирующего зондового микроскопа с нанометровым латеральным разрешением. Одним из таких методов является механическая сканирующая зондовая литография (МСЗЛ), заключающаяся в разрезании или удалении материала поверхности с помощью зонда, твердость которого превышает твердость поверхности [1]. Преимущество метода заключается в его универсальности и возможности литографии современных полупроводниковых материалов (дихалькогениды переходных металлов [2], ван-дер-ваальсовы материалы, галогенидные перовскиты [3] и др. [4]), для которых еще не разработана технология масочной литографии с использованием травления.

Недавно были проведены детальные исследования формирования наноканавки при литографии GaAs [5] и Si [6] с помощью алмазных зондов. Установлено влияние формы пирамиды зонда и ориентации ее граней, кристаллографической ориентации поверхности, силы нажима и других факторов на глубину и форму канавки, а также на толщину разупорядоченного слоя в исходном материале. Вместе с тем помимо линейных нанообъектов также востребованными являются циркулярные объекты. Например, микродиски из современных полупроводниковых материалов могут применяться в качестве оптических резонаторов с оптической добротностью, значительно превышающей добротность полосковых резонаторов [7]. Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования микродисков на GaAs с помощью алмазных зондов методом МСЗЛ.

В работе использовалась подложка (100) GaAs с уровнем шероховатости поверхности менее ~ 1 nm. Исследования проводились на сканирующем зондовом

микроскопе Ntegra AURA (NT-MDT) с использованием кантилеверов DRP_IN (Tipsnano). Для сравнения было выбрано два зонда из одной партии, жесткость которых составила 180 N/m (зонд 1) и 120 N/m (зонд 2). Данные зонды имели острие из монокристаллического алмаза с радиусом закругления, заявляемым производителем, 25 nm. В начале процедуры МСЗЛ относительно твердых материалов, как правило, происходит самопроизвольное отламывание самого кончика острия зонда. После отламывания форма острия определялась с помощью тестовой решетки TGT1 (NT-MDT), которая представляет собой массив вертикальных игл с радиусом закругления острия меньше 10 nm.

Перед созданием микродисков были сделаны пробные канавки при движении зонда в различных направлениях. На рис. 1, *a* представлены изображения канавок, полученные методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием зонда 1 (слева) и зонда 2 (справа). Движение зонда происходило в пронумерованной последовательности, показанной стрелками. Сила нажима составляла $50 \mu\text{N}$, скорость движения $10 \mu\text{m/s}$. Для оценки глубины и ширины созданных канавок на рис. 1, *b* и *c* представлены профили, полученные перпендикулярно направлению резки. Анализ изображений показал, что зонд 2 оставляет примерно в 1.5 раза более глубокие и широкие канавки, чем зонд 1. Важно отметить, что глубина и ширина канавок значительно зависят от направления движения. При этом если для зонда 1 наиболее глубокая канавка получилась при движении в направлении 7, то для зонда 2 наибольшая глубина получена в направлениях 3 и 6. Также обращают на себя внимание различие глубины и бортиков (светлые особенности на АСМ-изображениях) при вертикальном движении зонда, но в различную сторону (направления 1 и 6). Поскольку

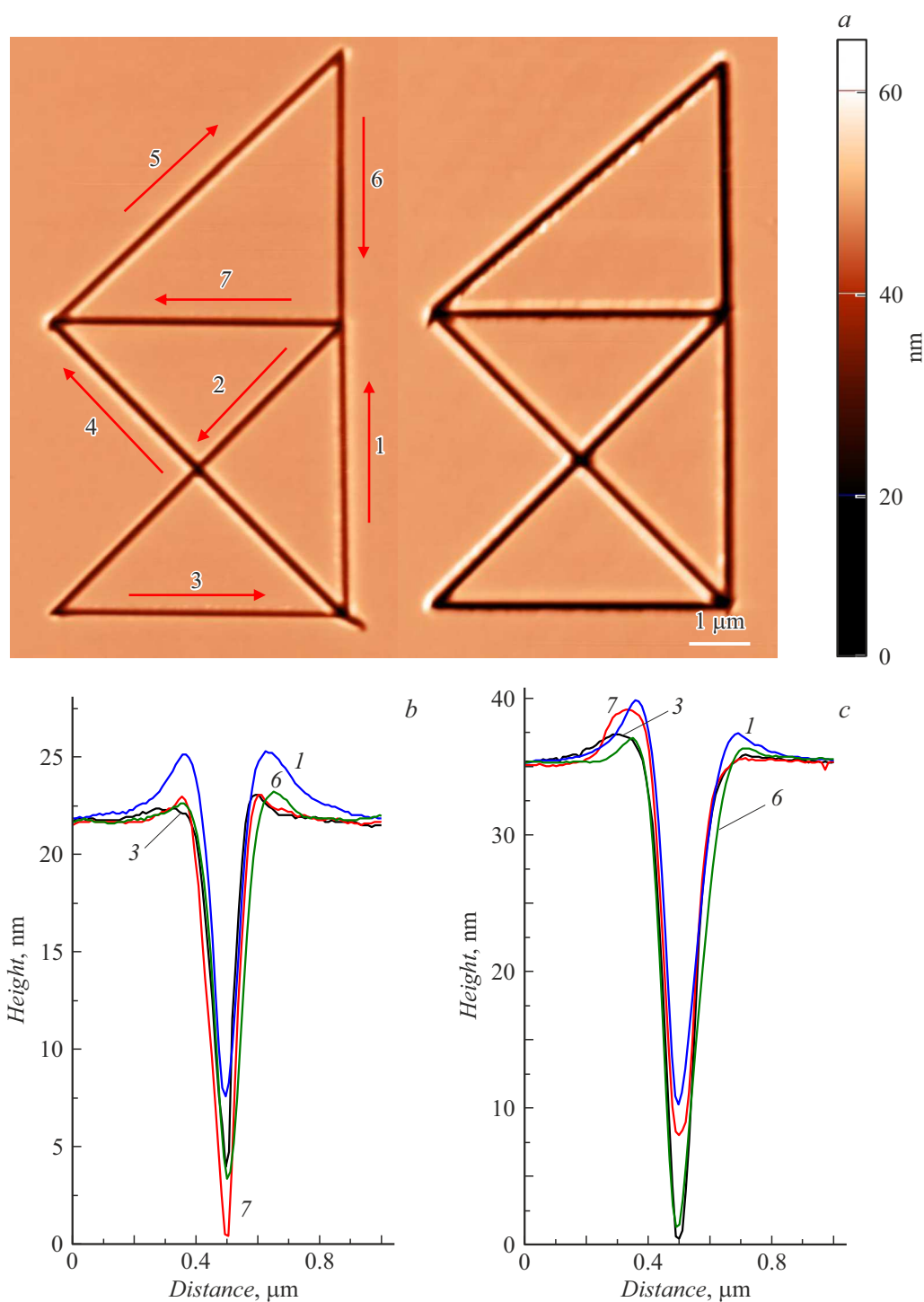


Рис. 1. АСМ-изображение (а) и соответствующие профили (b, c), полученные после МСЗЛ при движении зонда 1 (а, слева) и 2 (а, справа) в последовательности, указанной стрелками. Профили получены в направлениях, перпендикулярных направлению движения зонда.

подложка была ориентирована одинаково и сила нажима и скорость движения зондов также были одинаковыми, различия в зависимости формы канавок для двух зондов, вероятно, объясняются различием формы их кончиков.

На рис. 2, а и b представлены АСМ-изображения кончиков зондов 1 и 2 соответственно. Для удобства вос-

приятия изображения, полученные с помощью тестовой решетки, отражены по вертикали и горизонтали. Действительно, формы кончиков зондов существенно различаются и не могут быть описаны полусферой, поскольку представляют собой пирамиды с различным количеством и площадью граней.

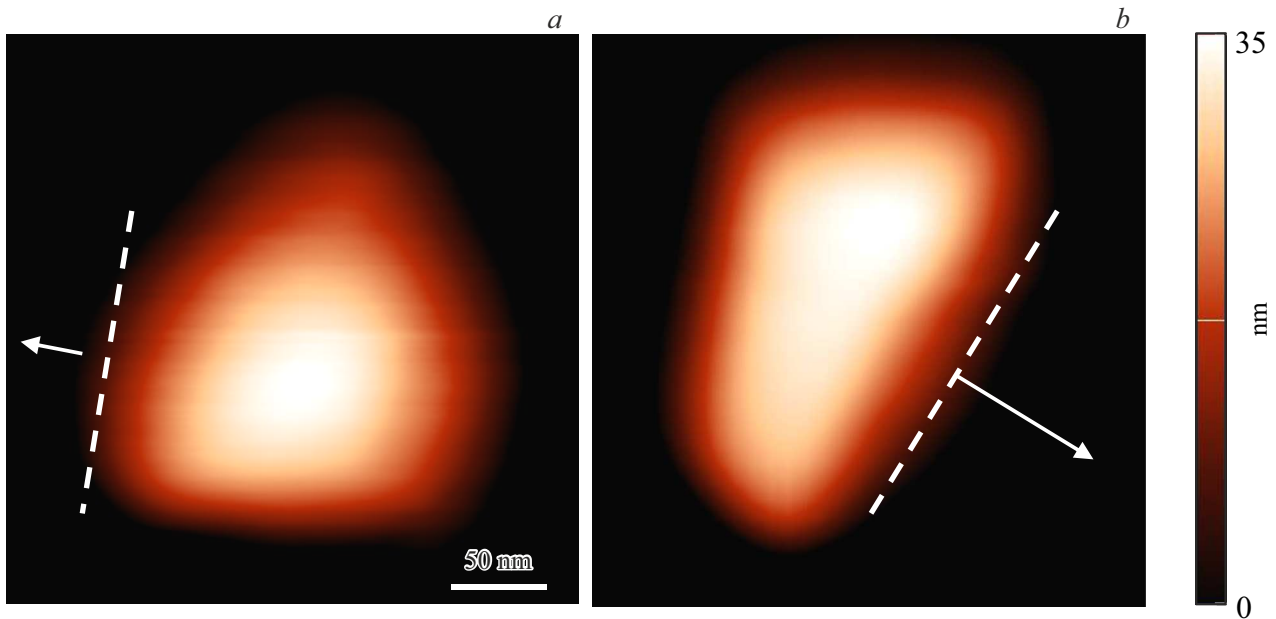


Рис. 2. АСМ-изображения кончика зонда 1 (а) и зонда 2 (б). Штриховой линией показана грань наибольшей площади.

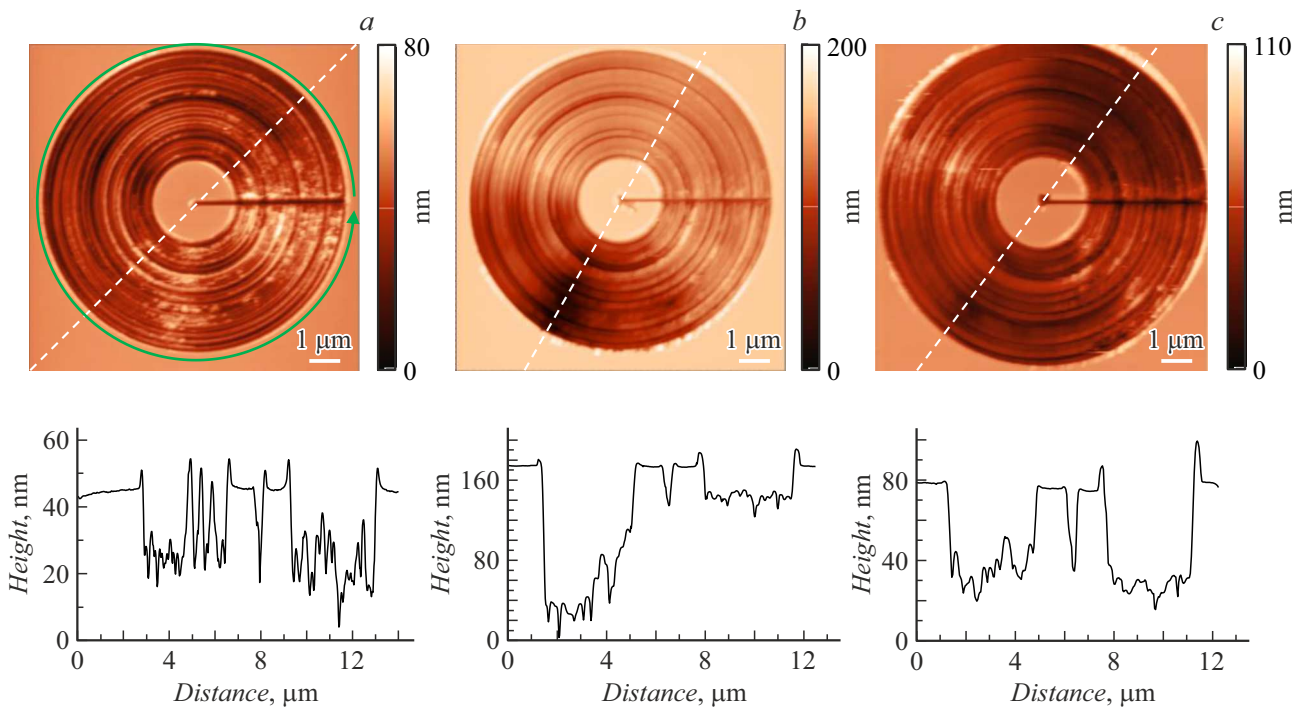


Рис. 3. АСМ-изображения (а–с) и соответствующие профили микродисков, сформированных зондом 1 (а) и зондом 2 (б, с). Профили получены вдоль штриховых линий. Микродиск на фрагменте с сформирован при другом наклоне плоскости подложки, выбранном с целью уменьшения неоднородности удаления материала.

На рис. 3 представлены АСМ-изображения и соответствующие профили микродисков, созданных с помощью зонда 1 (а) и зонда 2 (б, с). При создании микродисков зонд двигался по круговым траекториям против часовой стрелки (показано стрелкой на рис. 3, а). При этом в самом начале зонд передвигался из центра диска, и переход на следующую круговую траекторию большего

радиуса происходил при перемещении зонда вправо. Вследствие этого на АСМ-изображениях заметна горизонтальная линия, начинающаяся в центре диска.

Анализ изображений показывает, что удаление материала вокруг диска происходит неравномерно. При этом наиболее глубокие (темные) и возвышенные (светлые) области коррелируют с данными, представленными на

рис. 1. Действительно, на рис. 3, *a* наибольшая глубина имеет место в верхней и левой частях изображения, что соответствует направлениям 7 и 6 на рис. 1, *a*. На рис. 3, *b* наибольшая глубина получилась в нижнем левом углу между направлениями 3 и 6 (правая часть рис. 1, *a*). Следует отметить сильную азимутальную неоднородность при удалении материала зондом 2, что, вероятно, объясняется существенным различием плоскостей, которые образуют вершину данного зонда (рис. 2, *b*). В работе [8] показано, что канавка наибольшей ширины и глубины образуется при движении зонда вперед гранью в направлении, перпендикулярном грани. Наименьшая глубина получается при движении ребром пирамиды вперед. Изображения на рис. 1 и 3 согласуются с данным наблюдением. Действительно, для зонда 1 направление 1 с движением ребром пирамиды вперед создает канавку наименьшей глубины, при движении в направлении 7 грань наибольшей площади движется по нормали и образуется канавка наибольшей глубины. Для зонда 2 грань наибольшей длины (штриховая линия на рис. 2, *b*) создает максимальную глубину в направлении (светлая стрелка), перпендикулярном плоскости грани (см. рис. 3, *b*, наиболее темная область).

Для однородного удаления материала в азимутальном направлении зондом 2 был произведен наклон плоскости подложки. Было исследовано влияние наклона плоскости в различных направлениях (здесь не представлено), однако наиболее однородное удаление материала было получено при изменении наклона вдоль штриховой линии на рис. 2, *b* таким образом, что нижний конец данной линии был поднят вверх (на наблюдателя) на 2° . На рис. 3, *c* показано АСМ-изображение микродиска с относительно однородным азимутальным удалением материала. Диск сформирован при нажиме $40\text{ }\mu\text{N}$ и измененном наклоне подложки.

Таким образом, было исследовано формирование микродисков на поверхности GaAs методом МСЗЛ. Показано, что удаление материала при движении зонда с нажимом на поверхность зависит от направления движения зонда и формы кончика зонда. В качестве примера использованы два алмазных зонда из одной поставки, обладающих существенным различием огранки кончика. Показано, что наибольшее удаление материала (глубина и ширина) происходит при движении вперед в направлении, перпендикулярном грани острия с наибольшей площадью. Значительное различие в площади граней, формирующих острие, приводит к существенной азимутальной неоднородности в удалении материала при круговом движении зонда. Данная неоднородность может быть уменьшена наклоном плоскости образца.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-12-00209 (<https://rscf.ru/project/24-12-00209/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Fan, J. Gao, H. Mao, Y. Geng, Y. Yan, Y. Wang, S. Goel, X. Luo, *Micromachines*, **13** (2), 228 (2022). DOI: 10.3390/mi13020228
- [2] B.R. Borodin, F.A. Benimetskiy, V.Yu. Davydov, I.A. Eliseyev, S.I. Lepeshov, A.A. Bogdanov, P.A. Alekseev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2015**, 012020 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2015/1/012020
- [3] N. Glebov, M. Masharin, B. Borodin, P. Alekseev, F. Benimetskiy, S. Makarov, A. Samusev, *Appl. Phys. Lett.*, **122** (14), 141103 (2023). DOI: 10.1063/5.0142570
- [4] F. Zhang, D. Edwards, X. Deng, Y. Wang, J.I. Kilpatrick, N. Bassiri-Gharb, A. Kumar, D. Chen, X. Gao, B.J. Rodriguez, *J. Appl. Phys.*, **127** (3), 034103 (2020). DOI: 10.1063/1.5133018
- [5] J. Wang, Y. Yan, B. Jia, Y. Geng, *J. Manuf. Process.*, **70**, 238 (2021). DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.033
- [6] J. Wang, Y. Yan, Z. Li, Y. Geng, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **162**, 103701 (2021). DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103701
- [7] B.R. Borodin, F.A. Benimetskiy, V.Y. Davydov, I.A. Eliseyev, A.N. Smirnov, D.A. Pidgayko, S.I. Lepeshov, A.A. Bogdanov, P.A. Alekseev, *Nanoscale Horiz.*, **8** (3), 396 (2023). DOI: 10.1039/D2NH00465H
- [8] P. Fan, N.K. Katiyar, S. Goel, Y. He, Y. Geng, Y. Yan, H. Mao, X. Luo, *J. Manuf. Process.*, **90**, 125 (2023). DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.002