

Формирование острия апертурных кантилевров для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии методом локального ионно-стимулированного осаждения

© А.С. Коломийцев, А.В. Саенко, А.В. Котосорова

Южный федеральный университет,
Таганрог, Россия

E-mail: askolomiytsev@sfedu.ru

Поступила в Редакцию 16 мая 2023 г.

В окончательной редакции 17 августа 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Представлена новая методика формирования острия зондов для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Проведены экспериментальные исследования по формированию острия методом локального ионно-стимулированного осаждения углерода. Установлены значения технологических параметров, обеспечивающих высокую точность формирования и повторяемость результатов процесса. Проведены исследования параметров зондов при работе в режиме атомно-силовой микроскопии, исследовано пропускание оптического излучения через апертуру зонда.

Ключевые слова: кантилевер, ионно-стимулированное осаждение, сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия, осаждение, травление.

DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56750.5157k

В настоящее время для создания элементов и структур микро- и наномеханики применяются методы и технологические процессы традиционной микроэлектроники, которые позволяют добиться высокой экономической эффективности при массовом производстве. Однако существенным недостатком такого подхода является ограниченность номенклатуры параметров структур, которые могут быть сформированы, и зачастую в жертву технологичности приносится возможность достижения более качественных характеристик устройств. Перспективным подходом к решению данной проблемы является интеграция традиционных микроэлектронных технологий и методов локального формирования микро- и наноразмерных структур. Одним из таких методов является метод локального ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы [1,2]. Формирование структур осуществляется путем локального разложения технологического газа-носителя под действием фокусированного ионного пучка (ФИП) диаметром от 7 nm и энергией до 30–50 keV. Наиболее часто при реализации таких процессов используются либо ионы Ga^+ , либо ионы инертных газов, позволяющие добиться несколько большей дозы облучения и скорости осаждения при некотором снижении разрешающей способности. Минимальные размеры структур, которые могут быть сформированы данным методом, определяются диаметром ионного пучка и составляют 10 nm и более [3]. Одним из перспективных направлений применения такого подхода является формирование и модификация острия зондовых датчиков для сканирующей зондовой микроскопии [4].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по формированию острия апертурных кантилевров для сканирующей ближне-

польной оптической микроскопии (СБОМ) методом локального осаждения углерода пучком ионов Ga^+ . Апертурные кантилеверы представляют собой микромеханическую консоль, на конце которой расположено полое острие, имеющее входную и субволновую выходную апертуры, предназначенные для пропускания оптического излучения и детектирования сигнала в области ближнего поля [5]. Диаметр выходного отверстия острия апертурного кантилевера составляет 100–200 nm, а его стенки являются непрозрачными для излучения используемой длины волны. Важным преимуществом кантилевров такого типа является возможность их работы как в режиме динамической атомно-силовой микроскопии, так и в режиме СБОМ в одном цикле измерений.

Для формирования острия апертурного зонда на начальном этапе на балке стандартного безострийного кремниевого кантилевера FMG01 методом локального травления ФИП при значении тока пучка 7 nA было сформировано сквозное отверстие диаметром 10 μm , через которое вводится оптическое излучение ближнепольного микроскопа. После этого, методом локального ионно-стимулированного осаждения при значении ионного тока 0.3 nA с использованием газа-носителя осаждаемого углерода C_{10}H_8 , было сформировано острие зонда в виде полого конуса, диаметр основания которого составил около 10.5 μm , что больше диаметра входной апертуры. Острие СБОМ зонда формируется последовательно с использованием набора шаблонов в виде концентрических окружностей с постоянно уменьшающимся диаметром. В результате на конце консоли кантилевера было сформировано полое коническое острие с углом при вершине 30°, высотой 27.99 μm , в основании которого расположено отверстие входной

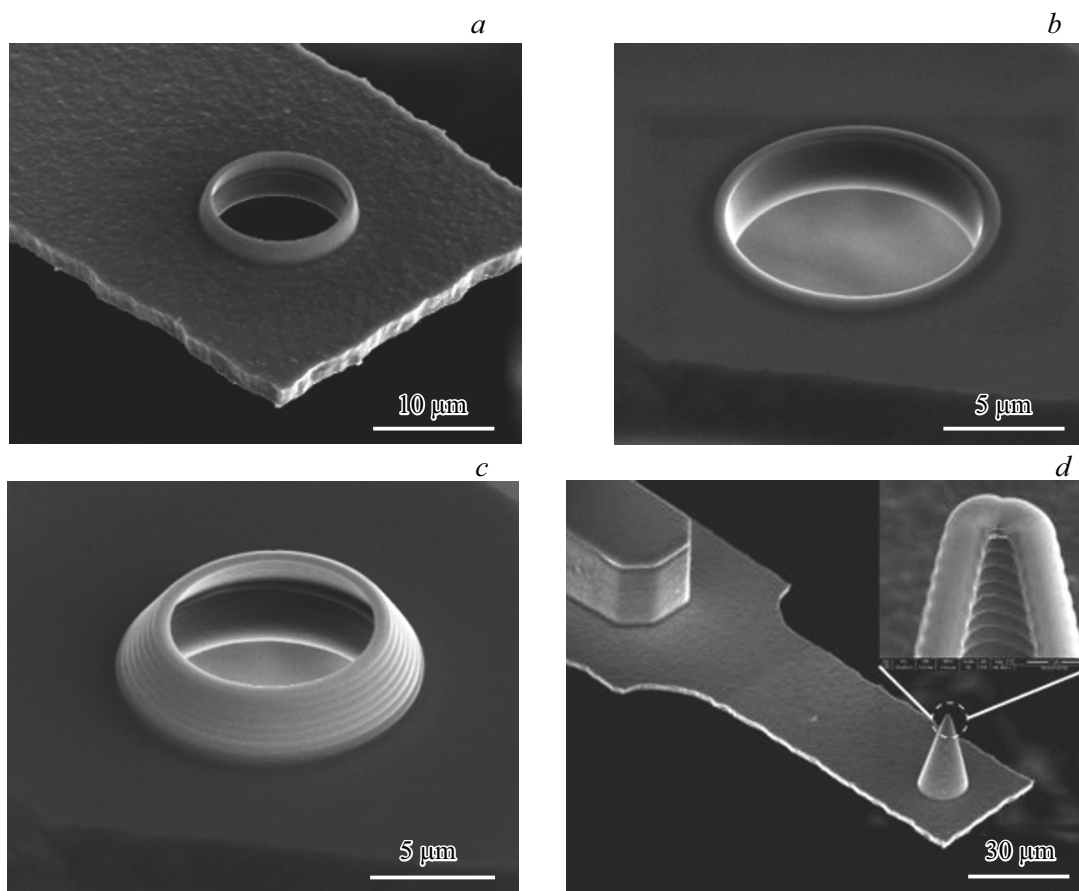


Рис. 1. РЭМ-изображения, иллюстрирующие процесс формирования острия СБОМ-зонда методом ионно-стимулированного осаждения: (a) — формирование входной апертуры, (b, c) — послойное наращивание углерода и формирование формы острия, (d) — формирование выходной апертуры. На вставке к рис. d — поперечное сечение острия с апертурой диаметром 100 нм.

апертуры. Этапы процесса изготовления апертурного СБОМ-зонда представлены на рис. 1. Выходная апертура также формировалась методом локального травления фокусированным ионным пучком при токе пучка 10 pA. На рис. 1, d представлено РЭМ-изображение апертурного СБОМ-зонда с полым острием, на вставке показано изображение поперечного сечения такого острия, полученное методом травления фокусированным ионным пучком Ga^+ с энергией 30 keV и током пучка 0.3 nA. Для снижения вероятности паразитного пропускания оптического излучения боковыми стенками зонда и повышения его температурной стабильности, на поверхность острия осаждается тонкая металлическая пленка алюминия или золота. В ходе выполнения экспериментальной части работы были изготовлены апертурные кантилеверы для СБОМ, диаметром входной апертуры 10 μm , углом острия зонда 30, 70 и 100° и диаметром выходного отверстия от 80 до 150 нм. Одной из задач, решаемых в данной работе, было отработать технологические режимы процесса для обеспечения высокой воспроизводимости и повторяемости параметров острия зонда. В ходе исследований было установлено, что при обеспечении постоянства ионного тока (при значениях в диапазоне

от 0.3 до 3 nA) и фиксированного значения времени воздействия ионного пучка в точке, равного 500 ns для достижения высокой повторяемости параметров зондов (отклонения размеров не более 1%) ключевыми параметрами являются поддержание постоянного давления газа-носителя осаждаемого материала при сохранении давления в камере в пределах 10^{-3} – 10^{-4} Pa, а также обеспечение минимального интервала времени между проходами ионного пучка, в течение которого газ мог обновляться в области осаждения. Экспериментально установлено, что оптимальное значение такого интервала времени составляет 200 ns, так как при меньшем значении молекулы газа не успевают обновляться и эффективность осаждения начинает падать, и процесс осаждения постепенно замещаться ионным травлением. При больших, чем 200 ns значениях параметра динамика процесса осаждения не изменяется, однако общее время процесса возрастает.

Тестирование изготовленных зондов осуществлялось в два этапа: сначала путем сканирования тестовой калибровочной решетки TGZ02 в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии (АСМ) с целью оценки качества измерения топографии поверхности, а затем

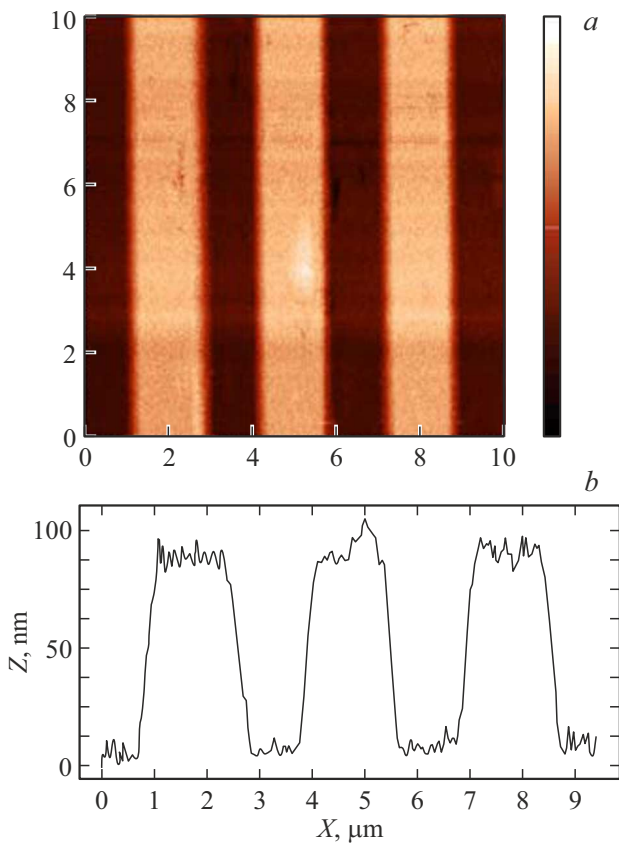


Рис. 2. АСМ-изображение (а) и профилограмма (b) калибровочной решетки TGZ02.

в режиме пропускания излучения синего лазера с длиной волны 473 nm и измерения мощности проходящего излучения. Результаты тестирования показали, что в режиме атомно-силовой микроскопии каждый из зондов позволяет получать АСМ-изображения топографии, как показано на рис. 2. Так при паспортном значении периода решетки TGZ02 $3 \pm 0.01 \mu\text{m}$ измеренные значения периода с использованием зондов с углами острия 30, 70 и 100° составили 3.01, 3.08 и $3.04 \mu\text{m}$ соответственно. Измеренные значения высоты элементов решетки TGZ02 (паспортное значение $110 \pm 10 \text{ nm}$) составили 86, 99 и 107 nm соответственно, отклонения от реальных значений высоты не превышают 23%. Так как режим АСМ для таких зондов является дополнительным и предназначен только для упрощения позиционирования зонда на образце, то результаты тестирования можно назвать приемлемыми. Результаты тестирования кантилеверов на пропускание оптического излучения показали, что для зондов с углом при вершине острия 100° и диаметрами выходных апертур от 82 до 200 nm, величина коэффициента пропускания составила от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1.5 \cdot 10^{-1}$, что позволяет использовать их при реализации апертурной СБОМ. При исследовании части непокрытых алюминием зондов наблюдалось паразитное пропускание излучения стенками острия или балкой

кантилевера. Такое пропускание может быть устранено нанесением на все зонды дополнительного тонкого покрытия алюминия толщиной до 100 nm.

Таким образом, в работе представлена оригинальная технология формирования острия кантилеверов для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии методом локального ионно-стимулированного осаждения углерода. Определены значения технологических параметров ионно-лучевого воздействия, позволяющие обеспечить высокую точность и воспроизводимость параметров структур (ток ионного пучка, время воздействия пучка в точке, величина остаточного вакуума в рабочей камере). Показано, что одним из ключевых параметров процесса является значение времени задержки между проходами ионного пучка по шаблону, которое составляет не менее 200 ns. Представлены результаты тестирования зондов с различными геометрическими параметрами.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01239 в Южном федеральном университете.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Reyntjens, R. Puers. *J. Micromech. Microeng.* **11**, 287 (2001). DOI: 10.1088/0960-1317/11/4/301.
- [2] J. Gierak. *Semicond. Sci. Technol.* **24**, 043001 (2009). DOI: 10.1088/0268-1242/24/4/043001.
- [3] A.S. Kolomiitsev, A.L. Gromov, O.I. Il'in, I.V. Panchenko, A.V. Kotosonova, A. Ballouk, D. Rodriguez, O.A. Ageev. *Ultramic.* **234**, 113481 (2022). DOI: 10.1016/j.ultramic.2022.113481.
- [4] B.G. Konoplev, O.A. Ageev, V.A. Smirnov, A.S. Kolomiitsev, N.I. Serbu. *Russ. Microelectron.* **41**, 41 (2012). DOI: 10.1134/S1063739712010052.
- [5] N.F. van Hulst, M.H.P. Moers, O.F.J. Noordman, R.G. Tack, F.B. Segerink, B. Bölger. *Appl. Phys. Lett.* **62**, 461 (1993). DOI: 10.1063/1.108933.

Редактор Д.В. Жуманов