

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТРИЯ ЗОНДОВ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

А.С. Коломийцев, А.В. Котосонова  
Южный федеральный университет,  
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,  
ул. Шевченко 2, Таганрог 347922, Ростовская обл., Россия,  
askolomiytsev@sfedu.ru, alena.kotosonova@gmail.com

В работе описано применение технологии локального травления и ионно-симулированного осаждения методом фокусированных ионных пучков для изготовления острия апертурных зондов для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Представлены результаты экспериментальных исследований режимов ионно-стимулированного осаждения углерода для достижения высокой точности и управляемости процесса. Показана возможность изготовления зондов с диаметром выходной апертуры от 50 до 600 нм, высотой от 500 нм до 30 мкм и углом при вершине от 10° до 110°.

**Ключевые слова:** нанотехнологии; микроэлектроника; фокусированный ионный пучок; травление; осаждение; ближнепольная микроскопия; зонд.

## FOCUSED ION BEAM AS A TECHNOLOGY OF SCANNING NEAR-FIELD OPTICAL MICROSCOPY PROBE TIP FORMATION

Alexey Kolomiytsev, Alena Kotosonova  
Southern Federal University,  
Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering,  
2 Shevchenko Str., 347922 Taganrog, Rostov Region, Russia,  
askolomiytsev@sfedu.ru, alena.kotosonova@gmail.com

This paper describes the application of local milling and ion-induced deposition by focused ion beams to manufacture aperture probes for scanning near-field optical microscopy. The results of experimental studies of modes of ion-stimulated carbon deposition for achieving high accuracy and controllability of the process are presented. Possibility to manufacture probes with output aperture diameters from 50 to 600 nm, heights from 500 nm to 30  $\mu$ m and apex angles from 10° to 110° is shown.

**Keywords:** nanotechnology; microelectronics; focused ion beam; etching; deposition; near-field microscopy; probe.

### Введение

В настоящее время методы микроскопии занимают важное место при исследовании структуры и свойств поверхности материалов. Они позволяют, наряду с рельефом поверхности, исследовать локальные электрические, механические, химические и оптические свойства. Вследствие влияния эффектов дифракции разрешение стандартных оптических методов микроскопии, сталкивается с фундаментальными ограничивающими факторами. При этом существует растущая потребность в

исследованиях оптическими методами структур с размерами, лежащими за границей дифракционного предела разрешения. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) — это метод, сочетающий в себе преимущества сканирующей зондовой микроскопии и возможности получения изображений поверхности в оптическом режиме [1]. Конструкция СБОМ-зонда является одним из ключевых факторов, определяющих области применения и разрешение микроскопии. Одним из наиболее перспективных

видов СБОМ-зондов являются кантилеверы с острием, имеющим субволновую апертуру [1]. Традиционные методы микроэлектроники не позволяют изготавливать острия СБОМ-зондов с оптимальными параметрами с точки зрения разрешающей способности и мощности пропускаемого излучения. Для решения этой задачи могут применяться методы локального ионно-лучевого воздействия – травления и осаждения под действием фокусированного ионного пучка (ФИП) [2]. Метод ФИП позволяет осуществлять сверхпрецизионное травление и осаждение материалов, а также визуализацию этих процессов во вторичных электронах и ионах.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования острия зондов для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии методом ФИП.

### Экспериментальная часть

Для формирования полого конического острия зонда в балке кантилевера методом локального травления ФИП формируется сквозное отверстие, которое в дальнейшем выступает входной апертурой для оптического излучения. После этого методом ионно-стимулированного осаждения углерода формируется полый конус, диаметр основания которого больше диаметра входной апертуры. Для формирования конуса используется набор шаблонов в виде концентрических окружностей с постоянно уменьшающимся диаметром. Вершина конуса – острие зонда, на финальном этапе процесса осаждения закрыта тонким слоем углерода, что обуславливает необходимость проведения операции ионно-лучевого травления ФИП для формирования отверстия выходной апертуры требуемого диаметра. На рисунке 1 показаны основные этапы процесса формирования острия зонда. Для снижения вероятности пропускания излучения стенками зонда, на его поверхность наносится пленка алюминия толщиной 80–100 нм,

что позволяет также повысить его температурную стабильность.

В процессе работы коническое острие зонда подводится к поверхности исследуемого образца в стандартном режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ). После выполнения операции подвода через входную апертуру в основании конуса вводится излучение в диапазоне длин волн 300–1600 нм.

Управление геометрией зонда: формой острия, размерами входной и выходной апертур, а также покрытием острия и балки позволяет повысить качество получаемых изображений методом СБОМ.

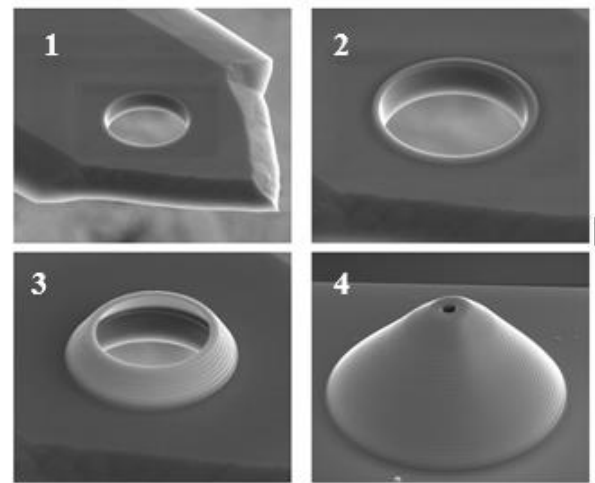


Рис. 1. Этапы формирования острия апертурного СБОМ-зонда: 1 – формирование входной апертуры; 2, 3 – формирование полого конуса из углерода; 4 – формирование выходной апертуры диаметром 100 нм

На первом этапе экспериментальной части работы были проведены исследования режимов ионно-стимулированного осаждения для формирования элементов острия зондов для СБОМ. В качестве подложки при проведении исследований были использованы чипы стандартных коммерческих безострийных кантилеверов, изготовленных на основе поликристаллического кремния. На первом этапе отработки технологического режима осаждения полых конических зондов определялось значение тока ионного пучка. При уменьшении тока пучка улучшается разрешающая способность осаждения, одна-

ко вместе с тем увеличивается время осаждения структуры. Так, при токе 0.3 нА формирование острия зонда с углом при вершине равным  $30^\circ$  составляет около 40 минут, поэтому выбор значений тока меньше 0.3 нА нецелесообразен ввиду низкой производительности процесса.

Увеличение тока позволяет сократить время осаждения при незначительной потере разрешающей способности. Однако предельное время осаждения ограничено количеством и скоростью поступления молекул газа прекурсора. При ионно-стимулированном осаждении всегда идет конкуренция между осаждением и травлением: с увеличением тока с 0.3 до 3 нА всё сильнее начинает преобладать травление, что негативным образом сказывается на структуре острия. Для устранения или минимизации этого явления необходимо определить значение параметра, определяющего временной интервал задержки между двумя проходами пучка, позволяющее молекулам газа эффективно обновляться в области воздействия ионного пучка. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при значениях тока 0.5, 1 и 3 нА, оптимальное значение параметра составляет 200 мс.

В ходе исследований было установлено, что наивысшая точность формирования апертур достигается при использовании локального травления методом ФИП. Для формирования наноразмерных апертур диаметром 50-100 нм целесообразно использовать минимальные значения тока ФИП, 1-3 пА, что позволяет добиться наилучшей управляемости процесса. Однако, при столь малых размерах области травления и значениях тока возникают технологические сложности, связанные с температурным дрейфом образца, вследствие чего нарушается симметричность выходных апертур. Для устранения влияния данного эффекта обработка велась

при значениях времени воздействия пучка в точке от 50 мкс и выше. При таких значениях параметра апертура формируется за один проход ионного пучка по шаблону за минимальное общее время, что сводит к минимуму влияние термодрейфа образца.

### Заключение

Применение ионно-стимулированного осаждения и локального ионного травления методом ФИП позволяет формировать апертурные СБОМ зонды в широком диапазоне конструктивных решений и геометрических параметров. Применяя предложенную технологию, можно изготавливать зонды высотой от 500 нм до 30 мкм, диаметром входной апертуры от 1 до 35 мкм, диаметром выходной апертуры от 50 до 600 нм, углом конусности от 10 до 110 градусов. Применение различных источников высокоселективной газовой химии при ионно-стимулированном осаждении позволяет изготовить острие зонда из углерода, платины, вольфрама, меди, золота и других материалов, осаждаемых из газовой фазы. Наличие острой вершины зонда позволяет проводить исследования поверхности одновременно как в режиме стандартной контактной или полуконтактной АСМ, так и СБОМ одновременно без необходимости смены зонда.

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

### Библиографические ссылки

1. Novotny L., Hecht B. Principles of Nano-Optics Cambridge University Press; 2006. 539 p.
2. Kolomiytsev A.S., Gromov A.L., Il'in O.I. et. al Controlling the parameters of focused ion beam for ultra-precise fabrication of nanostructures. *Ultramicroscopy* 2022; 234: 113481.