

УДК 53.086

Исследование методов очистки образцов, полученных силовой литографией на атомно-силовом микроскопе

Кошелева Маргарита Александровна (*)

rikosheleva@mail.ru

Ибрагимов Артем Рустамович

ibragimov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Силовая зондовая литография — метод сканирующей зондовой нанолитографии, основанный на механическом воздействии остроконечного зонда атомно-силового микроскопа на поверхность образца. Технология обеспечивает контролируемое удаление материала из матрицы с целью формирования топологии с точными геометрическими параметрами. Основным недостатком метода является загрязнение поверхности удаленными частицами, в связи с чем обязательным этапом является постобработка поверхности с целью очистки. Анализ эффективности методов очистки проводился с использованием коллоидной фотонно-кристаллической пленки с диаметром части 400 нм, характеризующейся упорядоченной периодической структурой и развитым рельефом. В работе представлена методика очистки поверхности путем механического перемещения частиц зондом атомно-силового микроскопа. По результатам работы был сделан ряд выводов о том, что неправильный подбор режимов очистки может привести к повреждению структуры, сформированной методом СЗЛ. При оптимальных значениях воздействий зонда на образец и скорости его перемещения методика позволяет эффективно обрабатывать поверхность после СЗЛ.

Ключевые слова: зондовая литография, силовая зондовая литография, атомно-силовая микроскопия, очистка поверхности, фотонные кристаллы

Investigation of cleaning methods for samples fabricated by force lithography using an atomic force microscope

Kosheleva Margarita Alexandrovna (*)

rikosheleva@mail.ru

Ibragimov Artem Rustamovich

ibragimov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Force probe lithography is a scanning probe nanolithography technique based on the mechanical interaction of a sharp atomic force microscope (AFM) probe with the sample surface. This technology enables the controlled removal of material from a matrix to create topography with precise geometric parameters. A key drawback of the method is the contamination of the surface with removed particles, which makes a post-processing cleaning stage essential. The analysis of the cleaning methods' effectiveness was conducted using a colloidal photonic crystal film, characterized by an ordered periodic structure and a developed relief. This paper presents a surface cleaning technique based on the mechanical displacement of particles using an AFM probe, demonstrated on the processing of a colloidal film obtained from a polystyrene solution with a particle diameter of 400 nm. The study

results led to a number of conclusions, namely that an incorrect selection of cleaning parameters can damage the structure fabricated by FPL. When the probe's impact on the sample is minimal and its travel speed is maximized, the technique allows for effective surface processing after FPL.

Keywords: scanning probe lithography, Force-Based Scanning Probe Lithography, atomic force microscopy, surface treatment, photonic crystals

Введение. Зондовая литография — это один из перспективных методов нанолитографии, позволяющий контролируемо вносить изменения в структуру, формируя топологию с заданной геометрией посредством воздействия остроконечного зонда на образец [1]. Силовая зондовая литография (СЗЛ) на основе атомно-силовой микроскопии (АСМ) заключается в механическом воздействии иглы на поверхность [2]. Зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима — так, что на образце формируется рисунок в виде углублений (царапин). Материал извлекается («выцарапывается») из подложки, оставляя канавки с характерным сечением, определяемым формой кончика зонда (рис. 1). Описываемая технология позволяет формировать топологию любой сложности без использования масок, при этом стоимость используемого оборудования значительно ниже стоимости установок других видов литографий (электронно- или ионно-лучевой), что делает метод экономически выгодным. Универсальность атомно-силового микроскопа позволяет производить контроль результата непосредственно после проведения литографии без использования дополнительного оборудования [3]. Основным недостатком метода является загрязнение поверхности образца удаленным из структуры материалом, для решения этой проблемы следует проводить дополнительную обработку образца после проведения СЗЛ. Очистка может производиться с использованием ультразвука или путем механического воздействия остроконечного АСМ зонда на загрязнения. Метод зондовой очистки заключается в следующем: игла перемещается с высокой скоростью по поверхности, практически не воздействуя на нее, при этом траектория движения обязательно проходит через лежащие на поверхности загрязнения, что приводит к их механическому удалению с подложки.

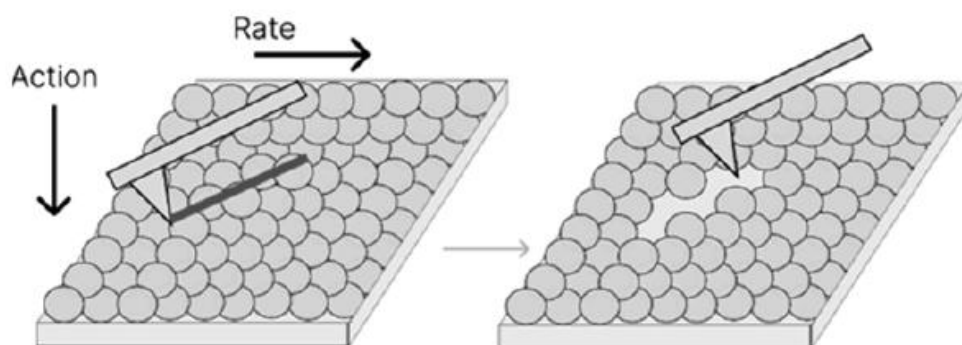


Рис. 1. Схема СЗЛ на основе АСМ

Материалы и методы. Обработка проводилась на атомно-силовом микроскопе Solver Next (NT-MDT, Россия) путем механического воздействия зонда на частицы, лежащие на поверхности. Для реализации очистки использовался зонд NSG01 (NT-MDT, Россия). Очистка подложки производилась с использованием ультразвуковой ванны УЗВ 35л1,3 (Vodoley, Россия). Сканирование образцов до и после проведения различных видов очистки осуществлялось на ACM Solver Next в полуконтактном режиме работы с использованием зонда NSG01. Исследуемый образец — коллоидная фотонно-кристаллическая (КФК) пленка из раствора полистирола с диаметром частиц 400 нм, полученная методом вертикального вытягивания [3]. На образце методом СЗЛ был сформирован линейный дефект: из матрицы кристалла были удалены последовательно расположенные частицы в векторном режиме силовой литографии.

Результаты. Поскольку использование коллоидных фотонных кристаллов — периодических структур, состоящих из сферических наночастиц мягкого диэлектрического материала, с развитым рельефом [4] — позволяет получить более полную информацию об эффективности метода очистки, был проведен эксперимент по ультразвуковой очистке их поверхности. Согласно методике, удаленные частицы из-за низкой адгезии должны были «слететь» с подложки под действием высоких УЗВ частот. Для реализации эксперимента образец был помещен в чашку Петри, частично находящуюся в УЗВ ванне. При использовании больших мощностей оборудования происходило нарушение ранее сформированной топологии: из-за смещения сфер, расположенных по контуру структуры, ведущее к увеличению геометрических размеров (рис. 2). В то же время понижение частоты не обеспечило эффективного удаления загрязнений.

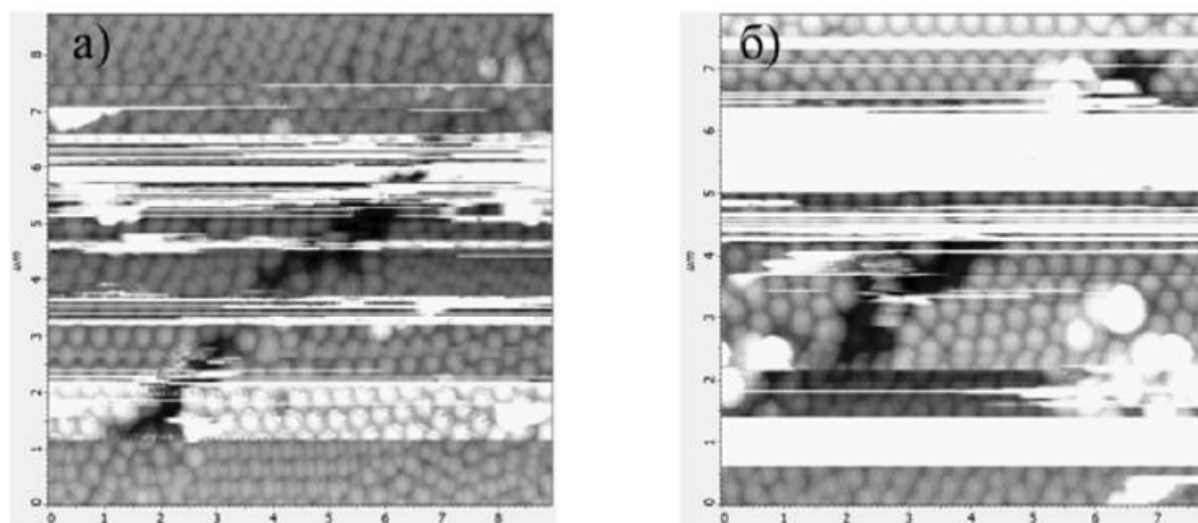


Рис. 2. АСМ изображение структуры до проведения УЗВ очистки (а) и после (б)

В связи с этим был предложен способ очистки поверхности, заключающийся в отбрасывании частиц зондом атомно-силового микроскопа. Зонд перемещался по поверхности образца по заранее заданной траектории с высокой скоростью (Rate) и минимальной силой прижима к поверхности образца (Action). При этом игла играла роль «метлы»: отбрасывала частицы, лежащие на поверхности, за счет механического воздействия на них. Использование малых значений силы прижима является достаточным для воздействия на частицы, в то время как высокие значения приводят к деформации ранее сформированной топологии. Было выявлено, что оптимальными значениями являются: сила воздействия составляла 0,2 нА, скорость перемещения зонда — 1 msec/Pnt (рис. 3).

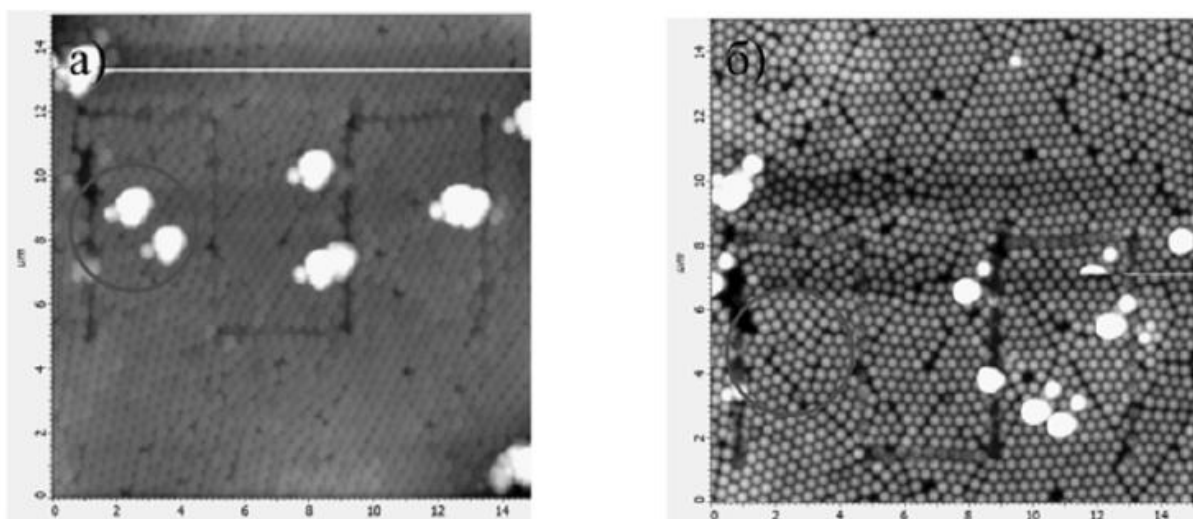


Рис. 3. АСМ изображение структуры до (а) механической очистки и после (б)

Обсуждение. Результаты исследований показали, что наиболее эффективным методом очистки поверхности после проведения СЗЛ является механическая очистка АСМ зондом. Рекомендуется проводить процесс обработки при высоких значениях скорости перемещения иглы (1msec/Pnt) для преодоления сил адгезии и низких значениях усилия, действующего со стороны зонда на образец (0,2 нА), во избежание деформации структуры.

Заключение. Описываемая методика очистки повышает качество изделий, изготовленных методом силовой зондовой литографии, что расширяет его функциональность. Это открывает возможность применения СЗЛ для создания разнообразных устройств, например, формирование волноводов различной конфигурации на КФК структурах, которые могут служить основой для производства высокочувствительных сенсоров, резонаторов и др.

Список литературы

- [1] Fan P. et al. Scanning Probe Lithography: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Micromachines*, 2022, vol. 13, art. no. 228. <https://doi.org/10.3390/mi13020228>
- [2] Кошелева М.А. Применение зондовой атомно-силовой литографии для формирования топологии наноструктур. *Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. Всерос. науч.-техн. конф.: матер.*, Москва, ООО «КванторФорм», 2025. URL: studvesna.ru?go=articles&id=4422 (дата обращения 15.08.2025).
- [3] Кошелева М.А. Исследование структурных особенностей поверхности фотонно-кристаллической пленки методом атомно-силовой микроскопии. *Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. Всерос. науч.-техн. конф.: матер.*, Москва, ООО «КванторФорм», 2024. URL: studvesna.ru?go=articles&id=3912 (дата обращения 20.08.2025).
- [4] Panfilova E.V., Syritskii A.B., Ibragimov A.R. Optimization of the photonic crystal colloidal films deposition by means of atomic force microscopy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, vol. 699, no. 1, art. no. 012034.
- [5] Медведева О.М. и др. Технология получения ФК коллоидных пленок методом центрифугирования. *Вакуумная наука и техника. XXX Междунар. науч.-техн. конф.: тез. докл.* Махачкала, Электровакуумные технологии конференция, 2023, с. 10–14.