

Использование сканирующей зондовой литографии для формирования планарных микрочастиц с конфигурационной анизотропией

© Д.А. Бизязев, А.А. Бухараев, А.С. Морозова, Н.И. Нургазизов, А.П. Чукланов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420029 Казань, Россия
e-mail: a_bukharaev@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 4 апреля 2023 г.

Принято к публикации 4 апреля 2023 г.

Представлены экспериментальные результаты формирования полимерных масок для создания планарных микрочастиц заданной формы методами сканирующей зондовой литографии. Рассмотрены проблемы, связанные с нелинейностью перемещения зонда во время процесса формирования маски. Продемонстрирована возможность увеличения времени жизни зонда за счет изменения процедуры формирования маски и (или) изменения температуры образца. Улучшение качества получаемой маски достигнуто за счет использования химического травления.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, полимерные маски, химическое травление.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55745.56-23

Введение

Одним из современных методов создания микро- и наноструктур на поверхности твердого тела является литография [1]. При этом структуры могут формироваться непосредственно из нанесенных на поверхность тонких пленок или путем осаждения определенного количества материала через заранее сформированную на поверхности маску. Для формирования маски обычно используется тонкий слой полимера, который модифицируется в нужных местах при помощи какого-нибудь излучения (светового, ультрафиолетового или рентгеновского). Далее за счет разницы в скоростях травления модифицированного и исходного полимера происходит удаление обработанного полимера, и через сформированную маску осуществляется осаждение материала. После этого маска и лишний материал для формирования структур удаляются при помощи травления, так называемая процедура lift-off. Для локальной модификации поверхности полимеров (и других материалов), кроме излучения можно использовать и механическое воздействие, при условии, что удастся обеспечить его хорошую локализацию. Осуществить такую модификацию можно методами сканирующей зондовой литографии (СЗЛ), когда для локального воздействия на поверхность используется сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) [2,3]. При этом полимер механически удаляется из заранее заданных областей при помощи перемещения СЗМ зонда по определенной траектории. Как показали проведенные исследования, методами СЗЛ (и процедурой lift-off) могут быть созданы структуры с латеральными размерами порядка 1 nm [4]. С помощью СЗМ можно не только формировать маски в полимере,

но и непосредственно модифицировать сформированные структуры или формировать их из сплошных пленок на поверхности. Однако такой подход обычно требует существенно большей силы взаимодействия СЗМ зонда с поверхностью и может приводить к его быстрому затуплению или даже к разрушению. Проблема сохранения остроты СЗМ зонда во время проведения процесса литографии является актуальной и в случае формирования маски в полимере, так как от формы СЗМ зонда зависит качество и повторяемость получаемых структур. Для решения этой проблемы можно либо снизить силу взаимодействия зонда с поверхностью, либо сократить время, необходимое для формирования одной маски.

Еще одной из проблем при создании методами СЗЛ масок для формирования микро- и наночастиц является повторяемость размеров и формы частиц. Данная проблема обычно обусловлена нелинейными свойствами пьезосканера СЗМ [5,6]. Раньше для компенсации такой нелинейности обычно использовались математические алгоритмы, которые могли решить эту проблему с ограниченной точностью. В последнее время для этого начали использовать емкостные датчики, которые позволяют намного лучше компенсировать нелинейность перемещения пьезосканера и более точно контролировать положение СЗМ зонда относительно поверхности исследуемого образца [7]. Очевидно, что СЗЛ не сможет обеспечить точность изготовления масок, которой можно добиться современными методами электронной или рентгеновской литографии, однако за счет своей дешевизны и доступности, СЗЛ может оказаться актуальной при создании объектов на начальных этапах поисковых исследований. Кроме того, с помощью СЗМ методов можно исследовать физические свойства полу-

ченных микро- и наноструктур и при необходимости использовать СЗЛ для коррекции их формы и размеров, что также может оказаться востребованным во время проведения научных исследований [8–10]. Таким образом, совершенствование СЗЛ методик и исследование возможностей использования их для создания различных структур остается актуальной задачей. Настоящая работа посвящена использованию СЗЛ методик для формирования массивов одинаковых ферромагнитных частиц с латеральными размерами порядка $1 \mu\text{m}$ и толщиной около 40 nm . В частности, микрочастиц с конфигурационной анизотропией, которая обусловлена их внешней формой. К ним относятся квадратные и треугольные частицы с осевой симметрией, частицы, близкие по форме к буквам X и Y. Такие микрочастицы представляют интерес в связи с возможностью их использования в устройствах стрейнтроники [9].

1. Формирование масок для создания ферромагнитных микрочастиц методом СЗЛ

1.1. Подготовка образцов и методика проведения исследований

В качестве полимера для формирования масок использовался полиметилметакрилат (ПММА) фирмы Acros Organics, Бельгия. Тонкие пленки на поверхности подложек формировались методом spin-coating. Для этого раствор ПММА в хлороформе (0.55%) наносился на поверхность подложки и включалось ее вращение со скоростью около 6000 rpm продолжительностью около 10 s . После формирования тонкой пленки ПММА образец высушивался в течении 1 h на воздухе при температуре 90°C для удаления из пленки остатков растворителя. Толщина полученных пленок составляла примерно 100 nm . Толщина пленки была критична для проведения дальнейшей СЗЛ литографии, поэтому она дополнительно контролировалась методами сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ), согласно методике, подробно описанной в работе [8]. Среднеквадратичная шероховатость полученных ПММА пленок составляла 0.3 nm и была близка по своим значениям к среднеквадратичной шероховатости используемых подложек.

Для создания масок и последующего исследования микрочастиц использовались СЗМ Ntegra и Solver P47. Для формирования масок использовались кантилеверы D300 (SCDProbes) с зондом в виде алмазного пирамидального монокристалла. Радиус закругления острого зонда составлял $5\text{--}10 \text{ nm}$, угол при вершине 10° . Эти же кантилеверы использовались для контроля качества полученных масок. В качестве подложек для формирования микрочастиц использовались оптически полированные стекло и конгруэнтный ниобат лития, а также монокристаллический атомарно гладкий кремний. Для

удобства обнаружения полученных массивов микрочастиц рядом с каждым массивом создавались метки в виде прямоугольных частиц размерами $5 \times 50 \mu\text{m}^2$, которые были хорошо различимы с помощью системы оптического позиционирования зонда СЗМ.

Для нанесения металла на поверхность подложки со сформированной маской использовался метод распыления твердотельной мишени электронным лучом в условиях сверхвысокого вакуума (СВВ). Напыление никеля проводилось на СВВ установке Omicron Multiprobe P при вакууме 10^{-6} Pa . После напыления излишки металла и ПММА удалялись в ультразвуковой ванне в растворе хлорбензола. Далее образец промывался дистиллированной водой и высушивался.

Для изучения магнитных свойств полученных микрочастиц использовалась магнитно-силовая микроскопия (МСМ). Использовались кантилеверы Multi75M-G (BudgetSensor). При МСМ сканировании регистрировался сигнал пропорциональный разнице фаз между сигналом, вызывающим колебания МСМ зонда на резонансной частоте, и сигналом, характеризующим эти колебания. Регистрируемый сигнал пропорционален градиенту силы взаимодействия зонда с магнитным полем образца в данной точке [11]. Измерения методом МСМ выполнялись по однопроходной методике, когда магнитный зонд перемещается над образцом на заранее заданном расстоянии, для того чтобы уменьшить влияние его магнитного момента на получаемое изображение.

1.2. Использование растровой литографии для формирования маски

При формировании маски СЗМ может работать в двух основных режимах. Рассмотрим первый режим — режим растровой литографии. Как и при АСМ сканировании, в данном режиме вся область, на которой будет проводиться формирование маски, представляется в виде массива точек, расположенных на определенном расстоянии (шаг скана) друг от друга. В графическом редакторе заранее рисуется шаблон в виде растрового рисунка в градациях серого цвета, в идеальном случае совпадающий по количеству точек с областью для формирования маски. При этом цвет точки пропорционален давлению, которое будет оказываться в данной точке при литографии. Для формирования маски за один проход на рисунке должно быть только два цвета: один соответствует отсутствию воздействия в данной точке, второй максимальному давлению, которое должно было позволить продавить слой ПММА до подложки. Формирование маски было выполнено двумя методами: 1-й метод — при включенных емкостных датчиках, когда нелинейность перемещения пьезосканера компенсировалась за счет работы системы обратной связи, и 2-й метод — при выключенных датчиках, когда нелинейность компенсировалась только за счет математического алгоритма. Использовался шаблон, представляющий собой несколько квадратов, имеющих разные размеры. Время создания

маски, скорость и сила давления зонда на поверхность ПММА для обоих режимов было одинаковым (600 min, 3 μ s и 300 nN). Большая сила, прикладываемая к зонду, обусловлена необходимостью продавливания слоя ПММА до подложки за время однократного воздействия на образец в данной точке. Это приводит к тому, что даже при однократной процедуре формирования маски может измениться радиус закругления СЗМ зонда или он может быть поврежден. Поэтому для формирования маски каждым из методов использовался новый зонд. Движение СЗМ зонда при формировании маски происходило слева направо с постепенным перемещением снизу-вверх. Результат создания маски при выключенных емкостных датчиках (второй метод) и сформированных с ее помощью массива микрочастиц Ni представлен на рис. 1, *a, b*. Так как изначально СЗМ зонд расположен в центре скана, то при старте процесса литографии происходит его смещение в левый нижний угол и наибольшие искажения формы получаемой маски и микрочастиц наблюдаются в начале сканирования (рис. 1, *a, b*). Нижние ряды микрочастиц на полученном изображении имеют вытянутую форму вместо заранее заданной квадратной формы — они имеют форму прямоугольника. Согласно полученным данным, форма микрочастиц приближается к заранее заданной квадратной форме примерно к середине поля сканирования (три верхних ряда микрочастиц на рис. 1, *a, b*). При использовании емкостных датчиков (первый метод) искажения в форме получаемой маски и сформированных на ее основе микрочастицах существенно меньше (рис. 1, *d, e*). Небольшие искажения формы наблюдаются только у нижнего ряда полученных микрочастиц. Согласно полученным МСМ изображениям, искажение формы микрочастиц при втором методе формирования маски (без емкостных датчиков) приводит к сокращению расстояния между ними и появлению упорядочивания доменной структуры соседних микрочастиц (нижний ряд на рис. 1, *c*), т.е. можно сделать вывод о магнитном взаимодействии между соседними микрочастицами. Вытянутая в одном направлении форма полученных микрочастиц также приводит к изменению размера магнитных доменов. В случае, когда микрочастица имеет квадратную форму, ее магнитная структура близка к классической четырехдоменной структуре (так называемая структура Ландау), состоящей из треугольных доменов одинакового размера с направлением намагниченности параллельным стороне микрочастицы, у которой они расположены (рис. 1, *c, f*).

Если учесть особенности используемых СЗМ в виде максимального количества точек, на которое может быть разбит один скан (1024 \times 1024) и эффективный латеральный размер зонда около 30 nm (при радиусе закругления зонда около 10 nm), то максимальное поле, на котором может быть сформирована маска за один проход, будет примерно составлять 30 \times 30 μ m². Поле сканирования СЗМ больше и может составлять примерно 100 \times 100 μ m², что делает возможным формирование нескольких масок в пределах одного поля сканирова-

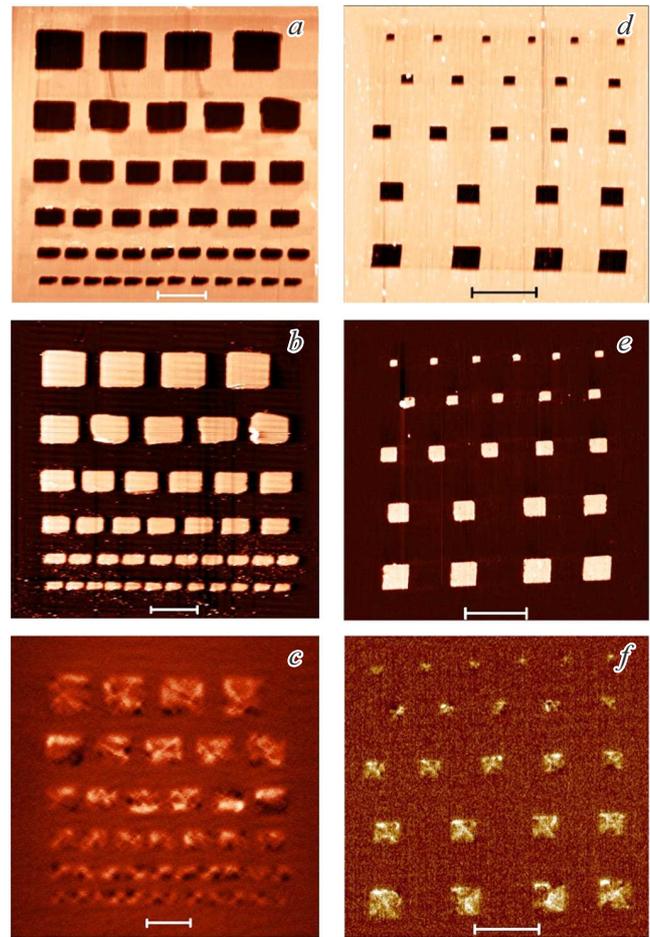


Рис. 1. АСМ изображение маски в ПММА (*a*), полученной на СЗМ Solver P47 в режиме растровой литографии. АСМ (*b*) и МСМ (*c*) изображения сформированных по этой маске Ni частиц. АСМ изображение маски в ПММА (*d*), полученной на СЗМ Ntegra в режиме растровой литографии. АСМ (*e*) и МСМ (*f*) изображения сформированных по этой маске Ni частиц. Высота рельефа на изображении равна 70 (*a*), 40 (*b*), 90 (*c*), 35 nm (*d*). Разность фаз на изображении 0.14° (*e*), 0.8° (*f*). Длина размерного бара 5 μ m.

ния. Поэтому была рассмотрена проблема, связанная с искажением формы получаемых микрочастиц при смещении области формирования маски относительно центра максимально доступного поля сканирования СЗМ. Для этого участок для создания маски выбирался на краю максимально доступной области сканирования. При этом формировались периодически расположенные микрочастицы с конфигурационной анизотропией формы. Латеральные размеры микрочастиц составляли около 1 μ m. На шаблоне, нарисованном для формирования маски, микрочастицы располагались рядами друг над другом. АСМ изображение маски, сформированной во втором режиме (при выключенных емкостных датчиках), представлено на рис. 2, *a*. Из полученного изображения видно, что несимметричное расположение области формирования маски относительно центра

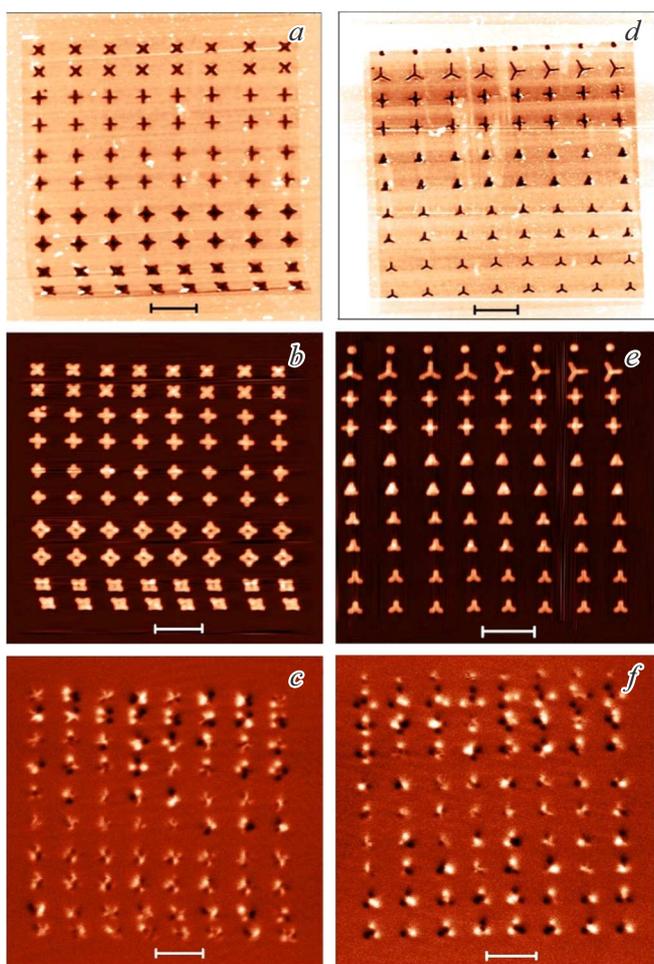


Рис. 2. АСМ изображение маски в ПММА (а), полученной на СЗМ Solver P47 в режиме растровой литографии. АСМ (b) и МСМ (с) изображения сформированных по этой маске Ni частиц. АСМ изображение маски в ПММА (d), полученной на СЗМ Ntegra в режиме растровой литографии. АСМ (e) и МСМ (f) изображения сформированных по этой маске Ni частиц. Высота рельефа на изображении равна 150 (a), 45 (b), 90 (c), 45 нм (d). Разность фаз на изображении 1° (e), $0,6^\circ$ (f). Длина размерного бара 5 μm .

максимального поля сканирования СЗМ приводит к дополнительным искажениям в массиве микрочастиц. В области начала сканирования происходит искажение формы микрочастиц и их смещение относительно других микрочастиц в ряду (рис. 2, a–c). Таким образом, расположение области формирования маски симметрично относительно центра скана позволяет сократить влияние искажений, связанных с нелинейностью перемещения пьезосканера. В этом случае осуществлять перемещение области формирования маски лучше не за счет пьезосканера, а за счет системы позиционирования СЗМ зонда над образцом.

Первый метод формирования маски (с включенными емкостными датчиками) позволяет существенно снизить искажения полученного массива микрочастиц

(рис. 2, d, e). Здесь не наблюдается изменения формы микрочастиц и смещение их расположения в ряду в области начала сканирования. Небольшое смещение каждого последующего ряда сформированных микрочастиц относительно предыдущего может быть обусловлено общим дрейфом образца во время процесса формирования маски. МСМ изображения полученного массива демонстрируют ожидаемую для микрочастиц такого размера квазиоднородную структуру намагниченности (рис. 2, c, f). По полученным МСМ изображениям без проведения дополнительных исследований поведения намагниченности микрочастиц во внешнем магнитном поле нельзя сделать вывод о возможном магнитном взаимодействии между ними.

Подводя итог по формированию масок для изготовления микрочастиц с помощью растровой литографии, следует отметить, что наименьшие искажения в массиве микрочастиц наблюдаются при расположении маски в центре максимально доступного поля сканирования СЗМ и при работе с включенными емкостными датчиками. В этом случае можно сформировать упорядоченный массив из примерно сотни микрочастиц субмикронных размеров.

1.3. Использование векторной литографии для формирования маски

Рассмотрим второй режим — режим векторной литографии. В данном режиме шаблон для формирования маски задается непосредственно в программе управления СЗМ, поэтому с его помощью можно создавать только микрочастицы простой формы (круг, эллипс, линия, прямоугольник). При таком режиме работы зонд СЗМ не сканирует все поле, а перемещается в начальную точку заданной фигуры, вдавливаясь в пленку ПММА с заданной силой и начинает перемещаться по контуру выбранной фигуры. При таком алгоритме перемещения перед СЗМ зондом часто собирается выдавленный полимер, продавить который до подложки при заданной силе взаимодействия зонда с поверхностью становится невозможным. При формировании простой линии это приводит к тому, что она имеет переменную ширину и может прерываться в некоторых местах (рис. 3, a).

На такой простой фигуре как линия сложно установить влияние нелинейности перемещения пьезосканера на получаемую маску, здесь качество в первую очередь определяется жесткостью используемого кантилевера и правильным подбором силы взаимодействия зонда с поверхностью. Поэтому для проведения дальнейших исследований были сформированы маски в виде окружности и квадрата. При формировании маски с выключенными емкостными датчиками часто наблюдалось искажение формы получаемой фигуры, особенно в левом нижнем углу скана, с которого начинается процесс формирования маски (рис. 3, b). Фигуры часто получались незамкнутыми, что может быть связано и с нелинейностью пьезосканера и с недостаточной силой взаимодействия

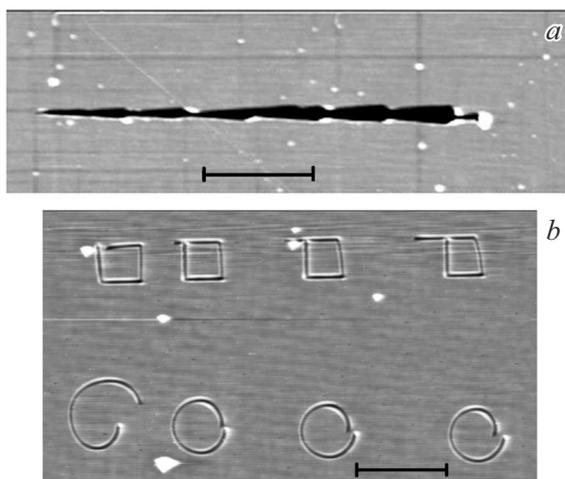


Рис. 3. АСМ изображение маски в ПММА, сформированной в режиме векторной литографии за один проход в виде линии (*a*) и контурных фигур (*b*). Длина размерного бара составляет $5\ \mu\text{m}$. Высота рельефа: *a* — $100\ \text{nm}$, *b* — $25\ \text{nm}$.

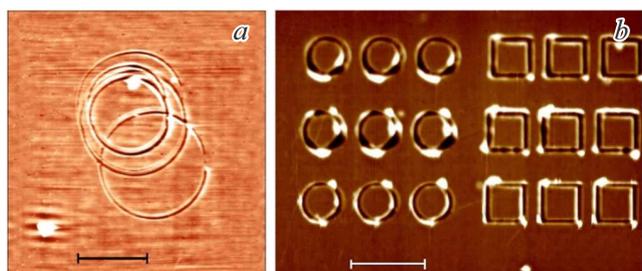


Рис. 4. АСМ изображения маски в ПММА, полученной в режиме векторной литографии, сформированной за несколько проходов при выключенных (*a*) и при включенных (*b*) емкостных датчиках. Длина размерного бара составляет $4\ \mu\text{m}$. Высота рельефа: *a* — $14\ \text{nm}$, *b* — $140\ \text{nm}$.

зонда с образцом, когда он не может продавить собранный перед ним полимер (рис. 3, *b*). Еще одним недостатком такого подхода является проблема быстрого выхода из строя СЗМ зонда, так как в отличие от растровой литографии, когда при перемещении из точки в точку давление на поверхность образца существенно снижается, здесь после начала формирования маски давление остается достаточно большим и постоянным.

Поэтому при векторной литографии наиболее оптимальным видится подход, когда маска формируется не за один, а несколько проходов. В этом случае можно снизить силу взаимодействия СЗМ зонда с образцом. Это приведет к тому, что за один проход будет вытесняться небольшое количество полимера, а проходы будут повторяться до тех пор, пока зонд не достигнет поверхности подложки. Основной проблемой при этом будет точное повторение траектории перемещения зонда на всех проходах. Как показали эксперименты, при отключенных емкостных датчиках траектория движения

СЗМ зонда от прохода к проходу повторяется плохо (рис. 4, *a*). Кроме того, часто СЗМ зонд не возвращается в исходную точку, и фигура остается незамкнутой. Это в первую очередь обусловлено наличием крипа в перемещении пьезосканера и некорректной работой математического алгоритма компенсации его нелинейности. Включение емкостных датчиков при проведении векторной литографии приводит к тому, что траектория движения зонда от прохода к проходу перестает сильно изменяться и выдавливание полимера происходит в одном и том же месте (рис. 4, *b*). При этом в конце прохода зонд возвращается в ту же точку, и фигура получается замкнутой.

Таким образом, режим векторной литографии может оказаться более перспективным по сравнению с растровой литографией в первую очередь за счет увеличения скорости формирования маски. Ограничениями данного метода является необходимость использования достаточно совершенной системы компенсации нелинейных искажений при перемещении пьезосканера (в нашем случае она основана на емкостных датчиках) и наличие шаблона для формирования необходимой фигуры в программном обеспечении СЗМ. Использование нескольких проходов при создании маски для формирования микрочастиц позволяет снизить силу взаимодействия СЗМ зонда с образцом. Низкая сила взаимодействия необходима в момент, когда полимер полностью выдавливается из нужной области и СЗМ зонд начинает взаимодействовать с твердой подложкой, что может привести к разрушению его кончика.

2. Внешние факторы и их влияние на процесс формирования маски

2.1. Влияние температуры образца на процесс формирования маски

Процедура подготовки пленки ПММА к формированию в ней маски включает процедуру сушки полученной пленки при температуре 90°C . Во время этого процесса происходит увеличение твердости пленки ПММА, поэтому было принято решение о проведении процедуры сушки после процесса формирования маски с помощью зондовой литографии. Это должно было снизить силу взаимодействия СЗМ зонда с образцом, необходимую для продавливания ПММА до подложки. Как показали проведенные эксперименты, для работы с невысушенной пленкой было достаточно силы взаимодействия $100\ \text{nN}$, что примерно в 3 раза меньше чем сила, которая использовалась для продавливания стандартной ПММА пленки ($300\ \text{nN}$). Качество маски, получаемое на невысушенной ПММА пленке, было достаточно хорошим (рис. 5, *a*), однако после сушки пленки при 90°C изменялись форма и размеры сформированной маски и ухудшалось ее качество (рис. 5, *b, c*). Под изменением качества здесь подразумевается изменение угла наклона стенок

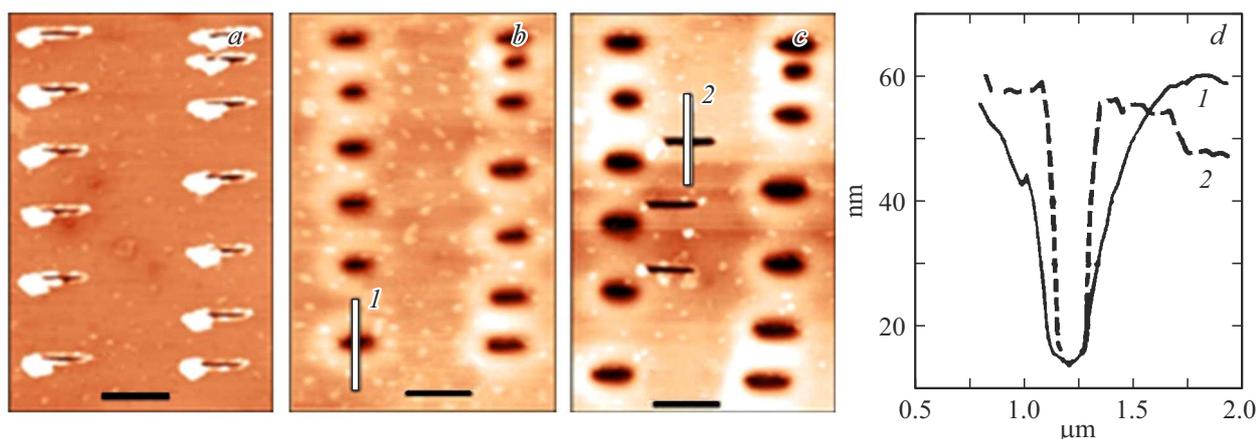


Рис. 5. АСМ изображения: *a* — маска в ПММА, изготовленная при комнатной температуре до сушки ПММА, высота рельефа на изображении (Δh) = 250 нм; *b* — та же маска после нагревания до 90°С (температура сушки ПММА), (Δh) = 70 нм; *c* — та же маска после прорезания трех новых канавок после сушки, (Δh) = 140 нм; *d* — профили высот, полученные вдоль линий 1 и 2 (сплошная и пунктирная кривые соответственно). Длина размерного бара 1.5 μm .

сформированной маски. Стенки сформированной маски во время процедуры сушки оплывают. Для успешного проведения процедуры lift-off угол между поверхностью подложки в маске и ее стенками должен быть не больше 90°. За счет этого при напылении образуются отдельно лежащие островки металла в маске и пленка металла на поверхности ПММА. При значениях угла больших 90° пленка металла, напыляемого на образец с маской, может стать сплошной и ее будет трудно удалить во время процедуры lift-off. Чтобы убедиться, что изменение качества маски (оплывание краев) произошло во время сушки и не связано, например, с изменением радиуса закругления СЗМ зонда, после процедуры сушки тем же самым зондом в полимере была сформирована дополнительная маска для создания микрочастиц и получено ее АСМ изображение (рис. 5, *c*). Это позволило убедиться, что изменение угла наклона стенок происходит именно во время сушки полимера при высокой температуре (рис. 5, *d*). Таким образом, изменение технологии подготовки полимерной пленки для создания маски не является целесообразным.

Снизить твердость пленки можно не только за счет изменения технологии ее приготовления. Известно, что нагрев ПММА также приводит к его размягчению [1]. Соответственно можно ожидать, что увеличение температуры образца позволит уменьшить силу, необходимую для продавливания ПММА пленки СЗМ зондом. Для проверки этого предположения был проделан следующий эксперимент. Методом векторной литографии формировалась маска в виде сплошного квадрата. Сила давления зонда на поверхность была постоянной (45 нН). Сначала квадрат был сформирован при комнатной температуре (27°С), затем образец был нагрет до 55°С, и рядом с первым квадратом сформирован второй. Большого увеличения температуры не производилось, так как, согласно данным производителя зондов D300,

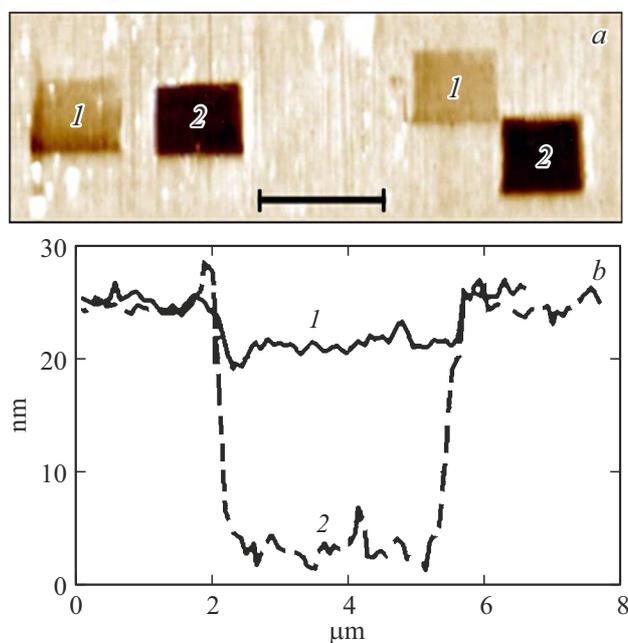


Рис. 6. *a* — АСМ изображение поверхности ПММА после воздействия на нее в определенных участках с одной и той же силой давления на поверхность при температурах образца 27°С (квадраты с цифрой 1) и 55°С (квадраты с цифрой 2). *b* — профили высот для квадратов 1 (сплошная кривая) и 2 (пунктирная кривая). Все квадраты формировались последовательно друг за другом при соответствующей температуре. Длина размерного бара составляет 5 μm .

алмазный кристалл приклеен к кантилеверу клеем с максимально допустимой температурой нагрева 70°С. Затем образец был охлажден до комнатной температуры и сформирован новый квадрат. Потом образец снова нагревался до 55°С и формировался новый квадрат. АСМ изображение полученного образца приведено на рис. 6.

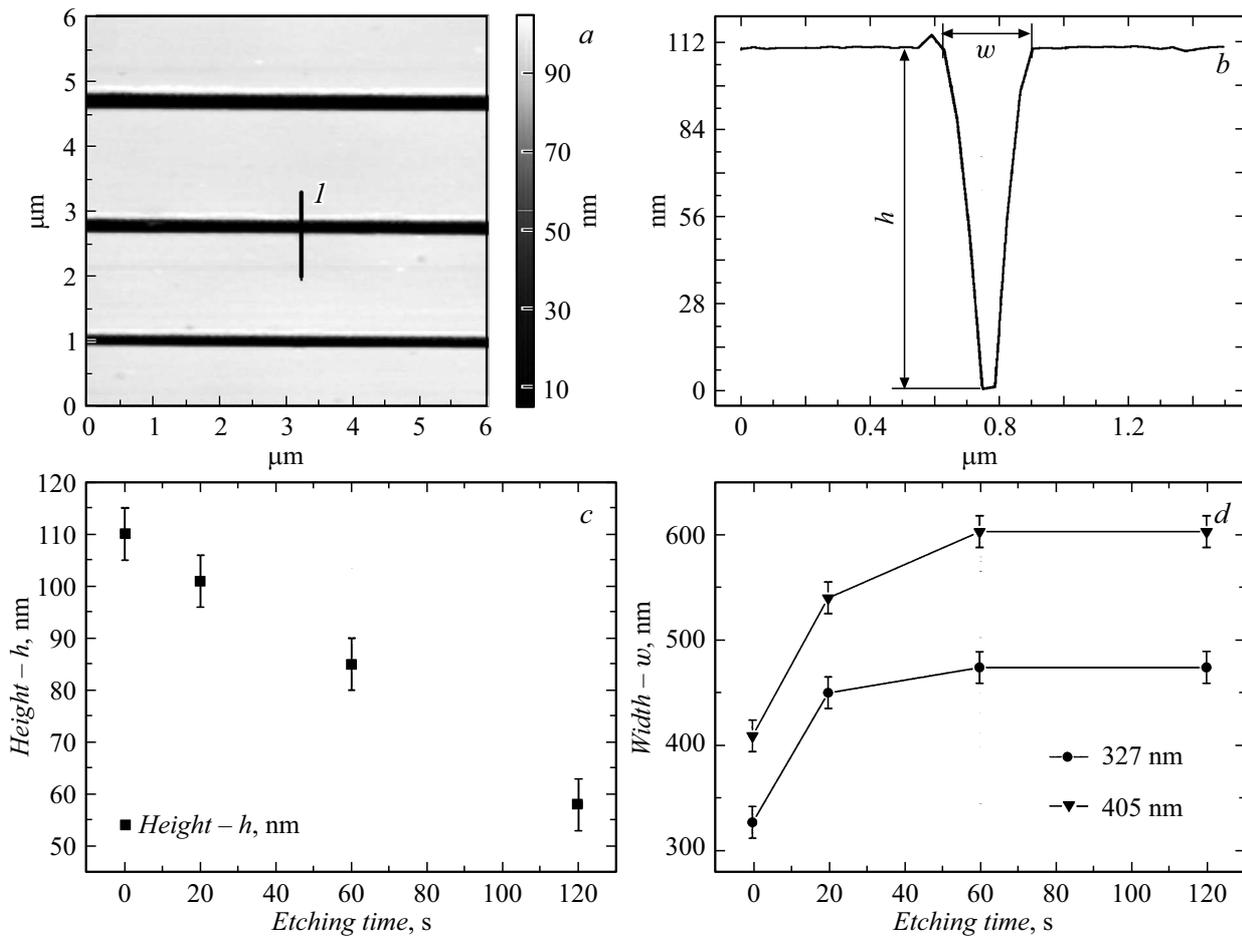


Рис. 7. АСМ изображение маски в ПММА (а) и профиль вдоль линии I (b), иллюстрирующий параметры, характеризующие растворение ПММА (ширина сформированной канавки w и толщина пленки ПММА h). Зависимость толщины ПММА от времени травления проявителем (c) и ширины двух канавок, сформированных в ПММА (d) с начальной шириной 405 и 327 nm.

Согласно полученным данным, увеличение температуры образца на 28°C во время литографии приводит к приблизительно четырехкратному увеличению глубины проникновения СЗМ зонда в ПММА при одинаковой силе давления (рис. 6, b). Соответственно увеличение температуры образца на время проведения литографии позволяет существенно снизить силу взаимодействия СЗМ зонда с поверхностью, не теряя при этом скорость изготовления маски. Это позволяет продлить время наработки на отказ СЗМ зонда, и, как следствие, улучшить повторяемость формы получаемой маски.

2.2. Влияние химического травления на процесс формирования маски

При СЗЛ полимер вытесняется из определенных областей поверхности, что должно приводить к разрыву его цепочек и предположению о том, что в этих областях он может иметь измененную структуру. Это позволило предположить, что для улучшения качества получаемой маски можно использовать стандартные процедуры химического травления ПММА. Стандартным проявите-

лем для ПММА является раствор метилизобутилкетона в изопропиловом спирте в соотношении 1:3 [1], который и был использован при проведении экспериментов. Было проведено исследование влияния времени растворения на размеры получаемой маски, сформированной в ПММА методом СЗЛ. Геометрические размеры сформированной маски исследовались методом АСМ, и далее производилось ее травление. Для этого готовая маска погружалась в проявитель на 20 s, потом промывалась в изопропиловом спирте, высушивалась при комнатной температуре и исследовалась АСМ методом. Затем данная процедура повторялась.

Было установлено, что уменьшение толщины пленки ПММА происходит монотонно (рис. 7, c). В то же время ширина сформированной канавки сначала резко увеличивается после первых 20 s в проявителе, после чего дальнейшее увеличение происходит существенно медленнее и сопоставимо со скоростью уменьшения толщины (рис. 7, d). Анализ полученных данных позволяет предположить, что ускоренное растворение ПММА связано с тем, что под действием СЗМ зонда при литографии цепочки полимера разрываются, и скорость

его растворения существенно возрастает. За счет этого также быстро удаляется и полимер, который был выдавлен из области формирования маски. Часть выдавленного полимера может также смываться и механически при погружении образца в проявитель. Таким образом, использование химического травления позволяет улучшить качество получаемой маски. Однако при этом необходимо учитывать тот факт, что происходит увеличение латеральных размеров областей, из которых был удален ПММА.

Заключение

Проведенные исследования показали, что сканирующая зондовая литография может эффективно использоваться для создания структур с латеральными размерами в микронном диапазоне, например, микрочастиц с конфигурационной анизотропией.

Корректно работающая система компенсации нелинейных искажений перемещения пьезосканера (основанная в нашем случае на встроенных емкостных датчиках) позволяет существенно улучшить повторяемость получаемых структур. Также эта система позволяет создавать маски за несколько проходов, уменьшив силу взаимодействия СЗМ зонда и полимера, в котором формируется маска. Такой подход позволяет увеличить время жизни СЗМ зонда.

Было показано, что наиболее оптимальным режимом для создания масок, имеющих сложную геометрическую форму, является растровая литография, хотя такой подход и приводит к увеличению времени формирования маски. При создании масок для формирования простых микрочастиц целесообразно использовать векторную литографию. Было показано, что за счет небольшого нагрева образца на время создания маски в ПММА можно снизить давление СЗМ зонда, что позволяет существенно увеличить время наработки зонда на отказ. Либо можно существенно сократить время, необходимое для формирования маски, за счет сокращения количества проходов, так как при такой же силе давления, как и при комнатной температуре, зонд проникает в ПММА на глубину, примерно в 4 раза большую.

Было показано, что с помощью химического травления можно убрать со сформированной маски вытесненный полимер, и, таким образом, улучшить ее качество. Однако при этом необходимо учитывать, что травление приводит к увеличению размеров сформированной маски.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00085).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] У. Моро. *Микролитография. Принципы, методы, материалы* (Мир, М., 1990)
- [2] Q. Tang, S.Q. Shi, L. Zhou J. Nanosci. Nanotech., **4**, 948 (2004). DOI: 10.1166/jnn.2004.131
- [3] R. Garcia, A.W. Knoll, E. Riedo. Nat. Nanotechnol., **9**, 577 (2014). DOI: 10.1038/nnano.2014.157
- [4] B. Klehn, U. Kunze. J. Appl. Phys., **85**, 3897 (1999). DOI: 10.1063/1.369761
- [5] А.О. Голубок, О.М. Горбенко, А.В. Дворецких, В.В. Котов, И.Д. Сапожников, М.Л. Фельштын. Научное приборостроение, **19** (2), 3 (2009).
- [6] В.Л. Миронов. *Основы сканирующей зондовой микроскопии* (Ин-т физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 2004)
- [7] Р.Г. Джексон. *Новейшие датчики* (Техносфера, М., 2007)
- [8] Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, С.А. Зиганшина, Н.И. Нургазизов, Т.Ф. Ханипов, А.П. Чукланов. Микроэлектроника, **44** (6), 437 (2015). DOI: 10.7868/S054412691505004X
- [9] А.А. Bukharaev, D.A. Bizyaev, N.I. Nurgazizov, A.P. Chuklanov, N.Kh. Useinov. J. Magn. Magn. Mater., **500**, 166315 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166315
- [10] A. Temiryazev. Diam. Relat. Mater., **48**, 60 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.07.001>
- [11] U. Hartmann. Ann. Rev. Mater. Sci., **29**, 53 (1999). DOI: 10.1146/annurev.matsci.29.1.53