

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНЧИКА АСМ-ИГЛЫ С ПОМОЩЬЮ ДЕКОНВОЛЮЦИИ

Д.В.Овчинников А.А.Бухараев, П.А.Бородин

Казанский физико-технический институт КНЦ РАН

Форма и локальные особенности кончика иглы сканирующего силового микроскопа оказывают существенное влияние на формирование изображений в самых разных режимах работы микроскопа. Форма кончика иглы определяет характер и величину искажений, вносимых иглой в экспериментальные АСМ-изображения [1,2]. Для дальнедействующих режимов работы микроскопа, например, для магнитной силовой микроскопии, проблема, связанная с влиянием формы кончика иглы микроскопа становится еще более актуальной. Корректная интерпретация самих АСМ-изображений часто возможна только при знании геометрии кончика иглы [3]. Поэтому экспериментальное определение геометрии кончика иглы является важной задачей и может помочь в интерпретации экспериментальных данных, полученных методами сканирующей зондовой микроскопией.

Наиболее распространенный тип ССМ-зонда состоит из гибкой консоли-кантилевера с прикрепленной на ее конце иглой. Сама игла обычно имеет микронные размеры, однако ее "рабочая" часть - кончик, находящийся в контакте с исследуемой поверхностью, - обычно не превышает нескольких сотен нанометров. Методом растровой электронной микроскопией (РЭМ) можно получить изображение иглы с хорошим разрешением.

Однако, для более оперативного контроля качества иглы можно использовать тестовые образцы, содержащие на поверхности структуры с заранее известными геометрическими параметрами. Экспериментальные АСМ-изображения таких тестовых образцов будут содержать как информацию о геометрии самого образца, так и информацию о форме кончика используемой иглы. Для извлечения требуемых данных о кончике иглы можно применять метод деконволюции [1]. В этом случае роль иглы будет играть сама тестовая структура. Выбор тестового образца обуславливает полноту извлекаемой информации об игле [4]. Связано это с тем, какая часть поверхности иглы была в контакте с тестовым образцом. Из принципа алгоритма конволюции/деконволюции, разработанного в Казанском физико-техническом институте КНЦ РАН [5] следует, что АСМ-изображение содержит информацию как о поверхности так и о форме кончика иглы. Таким образом, зная геометрию реальной поверхности и имея ее АСМ-изображение, с помощью процедуры деконволюции можно получить форму кончика иглы.

В настоящей работе представлены результаты компьютерного эксперимента по извлечению информации о геометрии кончика АСМ-иглы по АСМ-изображениям различных тестовых образцов.

Для исследования влияния геометрии тестового образца на полноту получаемой информации о кончике иглы микроскопа был проделан следующий компьютерный эксперимент. Игла была смоделирована в виде конуса с углом схождения 50° с закругленной вершиной с радиусом закругления 50 nm. Для задания "мелких" деталей геометрии кончика иглы к описанной форме была прибавлена функция, образованная произведением двух синусов. Смоделированное изображение кончика такой иглы представлено на рис. 1.

В качестве виртуальных тестовых образцов были взяты отдельно лежащие шарики разных размеров (рис. 2 а и 2 б), а также δ -образный выступ в виде конуса с

закругленной вершиной (рис. 2 *c*). Для каждой тестовой структуры были смоделированы АСМ-изображения с учетом эффекта конволюции (рис. 2 *d, f, g*). Затем над полученными изображениями была проведена процедура деконволюции, когда в качестве иглы использовались сами тестовые структуры. Полученные изображения (рис. 2 *h, i, j*) отражают форму кончика используемой иглы

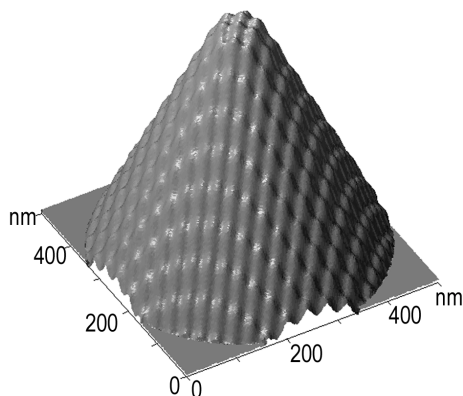


Рис. 1. Изображение кончика АСМ-иглы, смоделированного в виде наложения конуса с закругленной вершиной и произведения двух синусов.

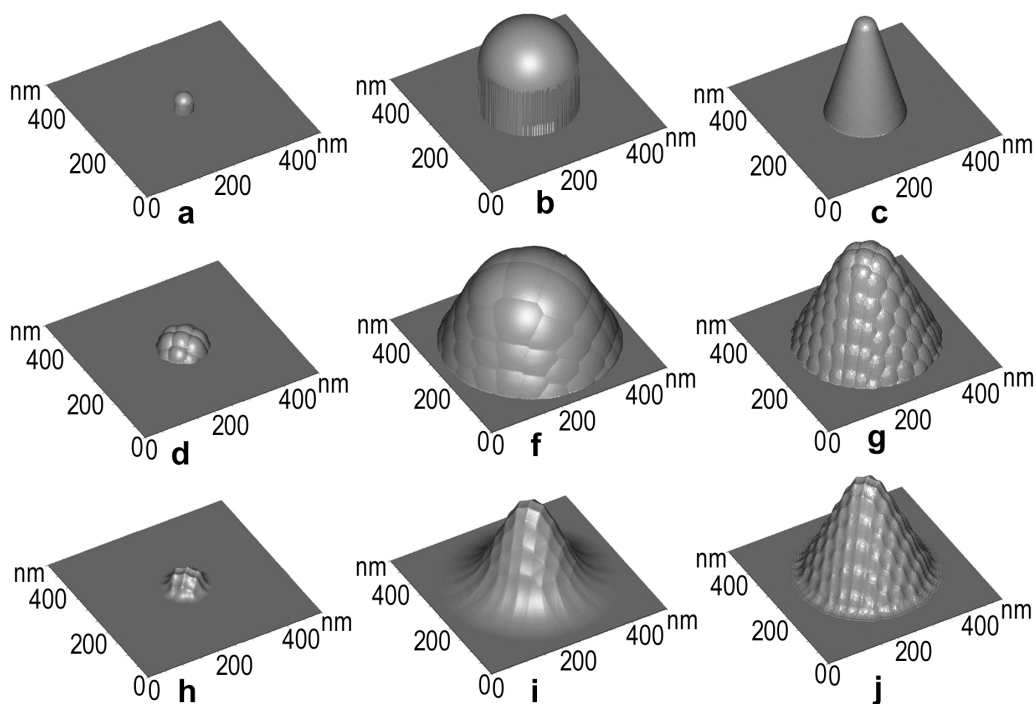


Рис. 2. Извлечение формы кончика АСМ-иглы с использованием различных тестовых образцов. *a* – модель тестовой поверхности со сферической частицей диаметром 50 nm; *b* – модель тестовой поверхности со сферической частицей диаметром 250 nm; *c* – модель тестовой поверхности с одиночным пиком конусообразной формы с углом схождения 30° и радиусом закругления при вершине 30 nm; *d, f, g* – соответствующие АСМ-изображения, смоделированные с учетом эффекта свертки с иглой (рис. 1); *h, i, j* – соответствующие изображения кончика иглы, полученные из смоделированных АСМ-изображений с помощью процедуры деконволюции с учетом реальной формы тестовой частицы.

Если используется частица с размерами соизмеримыми или меньшими, чем радиус закругления кончика иглы (рис. 2 *a*), то только небольшая часть поверхности иглы находилась в контакте с тестовой частицей. Поэтому в этом случае с помощью метода деконволюции можно получить информацию только геометрии вершины кончика иглы, а определение параметров общей формы иглы, таких как радиус закругления вершины, угол схождения и т.д., не представляется возможным. Однако, благодаря малому размеру частицы, можно получить информацию о малых неоднородностях иглы (рис. 2 *h*), но в целом такие тестовые образцы имеют малую практическую значимость для задачи данной работы.

Когда в качестве тестового образца используется относительно большая частица, размер которой существенно больше радиуса закругления, тогда в процессе получения АСМ-изображения участвует не только сама вершина иглы, но также и ее боковые стороны (рис. 2 *b, f*). Следовательно, анализируя изображение иглы, полученное после применения описанной процедуры деконволюции, можно определить общую форму иглы, например, угол схождения, геометрический тип формы иглы, а также оценить радиус закругления ее кончика. Но в этом случае информация о мелких неровностях иглы может быть получена искаженной по причине того, что очень многие участки поверхности иглы, относящиеся к таким локальным неровностям, не участвовали в процессе получения АСМ-изображения тестового образца (рис. 2 *i*).

Как показал компьютерный эксперимент, АСМ-изображения структур, имеющих форму близкую к δ -функции (рис. 2 *c*), уже сами по себе достаточно близки к форме используемой иглы (рис. 2 *g*). Дополнительное применение процедуры деконволюции позволяет получать наиболее точную геометрию кончика иглы (рис. 2 *j*), а именно: информацию как о форме иглы в целом, так и о мелких неровностях иглы, в том числе и геометрию ее вершины. Поэтому подобные образцы являются наиболее перспективными для тестирования игл сканирующих силовых микроскопов.

Для тестирования АСМ-игл в реальных экспериментах хорошо подходит так называемая TGT структура фирмы Нанотехнология-MDT (Зеленоград, Россия), представляющая собой отдельно расположенные конусообразные пики (рис. 3 *a*). Типичные параметры каждого пика: угол схождения 22° и радиус закругления вершины около 10 nm. Как уже было сказано выше, АСМ-изображения структур, имеющих форму близкую к δ -функции, очень близки к трехмерным изображениям игл, используемых для их получения. Поэтому АСМ-изображение TGT структуры будет сильно зависеть от формы кончика используемой иглы и практически повторять геометрию самого кончика. На рис. 3 *b* и 3 *c* представлены АСМ-изображения небольших участков поверхности TGT-структуры, полученные с помощью игл, имеющих существенно разные геометрические параметры кончиков. Форма пика тестовой TGT-структуры позволила визуализировать мелкие неровности кончиков обеих игл. Дополнительно проведенная процедура деконволюции с учетом реальной формы отдельного пика TGT структуры позволила уточнить реальные формы кончиков используемых игл (рис. 3 *d* и 3 *e*). Игла, использованная в первом случае (рис. 3 *c*), имеет существенно меньший радиус закругления своего кончика (около 200 nm). Этот же параметр для более тупой иглы (рис. 3 *d*) составляет не менее 500 nm (для наиболее острой части кончика иглы). Найденные значения углов схождения примерно равны соответственно 100° и 67° . Кроме того, видно, что боковая поверхность первой иглы имеет явно выраженные грани, которые практически не наблюдаются у второй иглы.

Другой тип тестовых образцов, которые также применяются для тестирования качества АСМ-игл, представляет собой латексные шарики, откалиброванные по диаметру. Такие образцы применяются как калибровочные в электронной микроскопии. Мы использовали латексные шарики с диаметром 200 nm, осажденные на

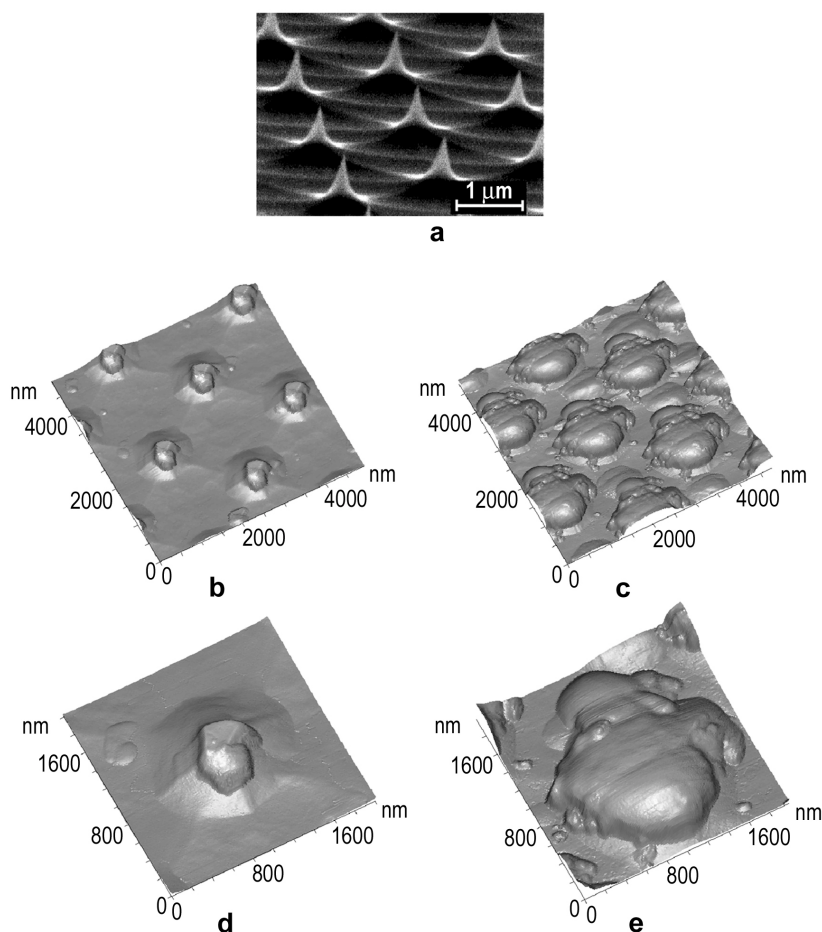


Рис. 3. Использование структуры в виде отдельно расположенных пиков для извлечения формы кончика АСМ-иглы. *a* – изображение структуры TGT (NT-MDT) с отдельно расположенными пиками с углом схождения 22° и радиусом закругления при вершине около 10 nm, полученное методом электронной микроскопии; *b* и *c* – АСМ-изображения TGT структуры, полученные разными иглами; *d* и *e* – соответствующие трехмерные изображения кончиков использованных игл, полученные с помощью метода численной деконволюции.

слюду. Для увеличения сцепления частиц с поверхностью слюды поверхность образца была подпылена золотом толщиной до 20 nm. Латексные частицы располагаются по поверхности образца как отдельно друг от друга так и в виде небольших скоплений (рис. 4 *a, b*). Каждый выступ на поверхности такого тестового образца можно аппроксимировать сферой с диаметром, равным высоте выступа, и таким образом, зная реальную форму тестовой структуры, можно извлечь информацию об используемой игле на основании экспериментальных АСМ-изображений, используя метод численной деконволюции. На рис. 4 *c* и 4 *d* приведены трехмерные изображения кончиков двух игл, полученные из АСМ-изображений латексных шариков, причем иглы были те же, что и в случае с TGT-структурой. Сравнение данных, полученных с помощью разных тестовых образцов, показывает, что результаты компьютерного анализа по извлечению геометрии иглы по АСМ-изображениям латексных шариков практически повторяют данные, полученные с помощью TGT-структуры, что говорит о корректности метода. Однако информация о форме иглы, полученная с помощью TGT-структуры является более полной.

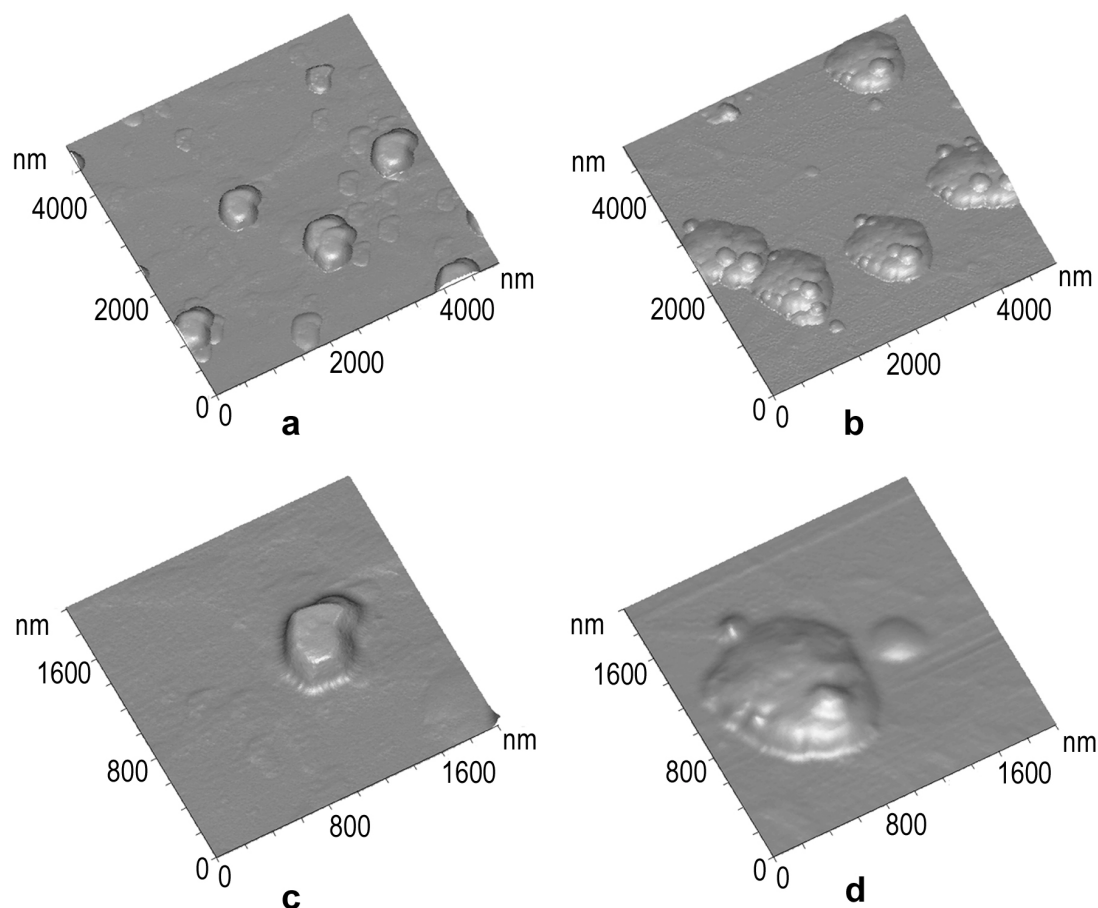


Рис. 4. Использование тестового образца с калиброванными латексными шариками для извлечения формы кончика АСМ-иглы. *a* и *b* – АСМ-изображения поверхности тестового образца с латексными шариками; *c* и *d* – соответствующие трехмерные изображения кончиков использованных игл, полученные с помощью метода численной деконволюции.

В данной работе разработана методика определения геометрии кончика иглы сканирующего силового микроскопа по экспериментальным АСМ-изображениям тестовых образцов, основанная на алгоритме деконволюции. Показано, что полнота извлекаемой информации о кончике иглы зависит от форм и размеров тестовых структур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 02-02-16686) и программы CRDF "Фундаментальные исследования и высшее образование" (REC 007).

Литература:

- [1] Бухараев А.А., Бердунов Н.В., Овчинников Д.В., Салихов К.М. *Микроэлектроника*, **26** (1997), С.163-175.
- [2] Бухараев А.А., Куковицкий Е.Ф., Саинов Н.А., Нургазизов Н.И. *ФТТ*, **39** (1997), С.2065-2072.
- [3] Овчинников Д.В., Бухараев А.А. *ЖТФ*, **71** (2001), С.85-91.
- [4] Markiewicz P., Cohen S.R., Efimov A., Ovchinnikov D.V., Bukharaev A.A. *Probe Microscopy*, **1** (1999), P.355-364.
- [5] Патент Российской Федерации № 1778820