

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СУБМИКРОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

О.В.Курносиков, кандидат физико-математических наук, доцент, А.И.Банщикова,  
Н.А.Грошенко, кандидат физико-математических наук, профессор, член-корр.  
КАХН, заслуженный изобретатель Украины, профессор, П.Ю.Перов

С момента изобретения Биннингем и Рорером сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) минуло уже более 10 лет [3], однако возможности этого прибора расширяются с каждым годом. Одна из возможностей использования СТМ - в качестве инструмента для формирования заданных структур субмикронного и нанометрового масштаба на поверхности [2]. Это делает СТМ не только прибором для анализа поверхности, но и для синтеза, например, отдельных элементов микроэлектронных схем или их коррекции. Так как величина неоднородности, которую можно создать с помощью СТМ, имеет порядок единиц и десятков нанометров, когда могут проявляться квантово-размерные эффекты, не исключено, что с помощью СТМ можно будет создавать новые функциональные материалы и приборы, в работе которых используются именно эти эффекты. Формированию поверхностных структур посвящен ряд работ [4,6,7]. В бывшем СССР конкретные результаты представлены в [1], на Украине такие исследования авторам не известны.

Нами с помощью СТМ реализована модификация поверхности золота, серебра, никеля, ниобия, хрома, графита. В отличие от других авторов, мы не стремились получать рекордные по величине размеры неоднородности. Это позволило нам исследовать несколько методов формирования поверхностных структур, подвергнуть испытанию ряд широко применяемых материалов и освободило нас от сложных в технологическом смысле процессов получения атомарно-гладких поверхностей.

Все результаты получены с помощью СТМ, работающего при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. Одним из самых ответственных узлов СТМ является узел сканирования, состоящий из пьезокерамического трехкоординатного перемещателя и острейного зонда. Острейный зонд имеет радиус закругления кончика десятки нанометров, так что на самом кончике может быть сформировано микроострие, заканчивающееся одним атомом. Именно с него происходит туннелирование электронов, и этот факт определяет высокое пространственное разрешение СТМ. Острейный зонд изготавливался нами из вольфрама. За основу изготовления его взята методика, описанная в [5], которая была доработана нами. Управление работой СТМ полностью осуществляется от компьютера.

Нами осуществлено два метода формирования поверхностных структур - метод погружения острейного зонда в материал подложки и метод подачи импульсов напряжения на острейный зонд.

Для осуществления внедрения острия в материал подложки в заданной точке производится разрыв цепи обратной связи и подача на пьезоперемещатель "Z" дополнительно увеличивающегося напряжения. Глубина погружения острия задается максимальным значением этого напряжения. После осуществления "укола" острие отводится на исходное положение, восстанавливается обратная связь и производится дальнейшее сканирование. Считывание полученной структуры поверхности производится сразу после окончания процедуры модификации всего кадра СТМ. Время, необходимое на осуществление одного "укола" порядка 100 мс, на считывание одного кадра СТМ - 10...100 с в зависимости от масштаба.

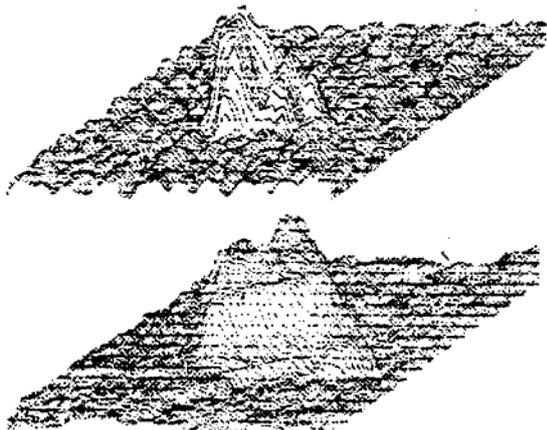
Второй метод - метод подачи импульсов напряжения - работал эффективно, как оказалось, при подаче нескольких импульсов с проверкой результата после каждого импульса. Импульс напряжения может иметь как положительную, так и отрицательную полярность с амплитудой до 10 В, длительностью от 20 мкс до 1 с. После действия импульса регистрируется изменение позиции острия по нормали, что свидетельствует о появлении неоднородности. Если это изменение не обнаруживается, или если оно не превышает некоторого порогового значения, то процесс подачи импульсов повторяется. Такое постепенное выращивание позволяет формировать размер неоднородности, значительно превышающий величину туннельного про-

межутка. Так как последний имеет размер 0.5...2нм, то необходимость такого последовательного процесса очевидна.

Первоначально мы получали результаты методом внедрения острия в материал подложки. Формируемая неоднородность представляла собой ямку, рядом с которой иногда возникал бугорок. После того как мы добились лучшего качества острия с помощью указанной выше методики, размер формируемого углубления составил 50...100нм. Бугорок или отсутствовал, или присутствовал кольцеобразный бруствер.

На площади поверхности 1.5 x 1.5мкм мы сформировали упорядоченные структуры с 6-ю углублениями на серебре, с 12-ю углублениями на ниобии и пленке Fe-Ni. Слои серебра напылялись нами методом термического испарения в вакууме на горячие подложки из слюды и ситалла и имели поликристаллитную структуру. Пленки Fe-Ni получались методом катодного распыления и также обладали кристаллитной структурой. Ниобиевый образец в виде монокристаллической пластины предварительно был подвергнут электрохимической полировке. Если при достаточно глубоком погружении острия в серебро можно было получить размер ямки очень больших размеров, то на пленке Fe-Ni удавалось получать ямки ограниченных размеров. Возможно, это связано с меньшей пластичностью материала. В местах проведенной модификации нами регистрировалось изменение работы выхода материала подложки, причем эта характеристика позволяла идентифицировать сформированную неоднородность, даже если таковая не обнаруживалась при регистрации рельефа поверхности или маскировалась большими исходными неоднородностями поверхности. На поверхности серебра размером 1.4мкм x 1.4мкм мы осуществили запись в виде букв "СГУ", состоящих из отдельных точек. После записи с течением времени происходят изменения на поверхности. За 6 часов между отдельными точками появились перемычки. Разные материалы проявили разную скорость деградации: на золоте созданные углубления заплывали за полчаса - час, на ниобии никаких изменений углублений не было зарегистрировано. Возможно, на скорость деградации оказывает также влияние примесей, поверхностных загрязнений и дефектов, тормозящих процессы поверхностной диффузии. При анализе работы выхода в каждой точке сразу после модификации регистрировалось как повышенное, так и пониженное значение сигнала относительно уровня, определяемого немодифицированной поверхностью. Через 6 часов спустя измерение в этом режиме давало отклонение сигнала только в одну сторону. Это показывает, что наряду с деградацией рельефа поверхности работа выхода также претерпевает изменения. Если считать каждую ямку одним битом информации, то этому изображению соответствует плотность записи  $10^{10}$  бит/см<sup>2</sup>, что на три-четыре порядка превышает плотность при оптической и магнитной записи. При формировании углублений методом погружения острия само острие остается работоспособным. Нами был записан на поверхности серебряной пленки площадью 1.5мкм x 1.5мкм массив из 100 углублений и этим же острием произведено считывание записанного массива. Несомненно, вопрос сохранности острия требует детального исследования, но наш опыт показал, что неглубокие и аккуратные погружения безопасны для острия. Мы наблюдали порчу острия, когда попытались получить более крупные ямки на Fe-Ni путем дальнейшего внедрения острия.

В отличие от метода внедрения острия, методом подачи импульсов напряжения у нас получались бугорки. Для формирования одного бугорка требовалось подавать от 3-х до 30-ти импульсов напряжения.



На рис.1 представлены бугорки, выращенные на золоте и ниобии. Между острием и подложкой прикладывалось напряжение 6...8 В, длительность импульса около 1 мс. Полярность напряжения - плюс на острие, минус на образце. Обратная полярность позволяет на серебре получить бугорки, но меньшие по высоте и большие в поперечнике; на ниобии обратная полярность не вызывала возникновения бугорков, хотя наблюдалось некоторое изменение структуры поверхности в целом. Такая зависимость от полярности указывает на возможность ионного

механизма процесса формирования бугорков. Нами зафиксировано, что бугорки на золоте через некоторое время исчезают; на ниобии такой процесс не выявлен. Существует пороговое значение напряжения, при котором возможно сформировать бугорок. Оно лежит в диапазоне около 2...4 В для разных материалов. На подложках из золота, серебра получить бугорки удавалось практически всегда, разница была лишь в их размерах. На ниобии, графите и алмазоподобной углеродной пленке попадались участки, на которых модификацию получить не удавалось. Эти участки, по-видимому, имеют большие размеры, так как в пределах поля зрения СТМ обычно модификация если удавалась, то удавалась во многих точках.



На рис. 2 представлен созданный массив из 9-ти бугорков на ниобии. Аналогичная запись на золоте происходит с пропаданием части бугорков. На ниобии видно, что все бугорки имеют двойную форму - очевидно, острие имело два микровыступа, участвующих в формировании бугорка. Лишь только один микровыступ образует туннельный промежуток при считывании. Этот результат доказывает, что за

формирование бугорков при приложении импульсов напряжения ответственны физические процессы, не связанные исключительно с туннелированием. Действие импульсов напряжения не приводит к деградации острия; более того, импульсы обратной полярности иногда делали острие работоспособным, если вначале оно таковым не являлось.

Таким образом, нами показана возможность формирования структур на поверхности твердых тел в виде бугорков и ямок с характерным размером менее 100 нм относительно простыми методами. Осуществление такой модификации зависит от материала образца, формы острия и условий эксперимента. Вполне реально объединение описанных методов в одну комбинированную, что позволит создать более сложные объекты на поверхности твердых тел. Необходимы эксперименты с более широким набором материалов и в условиях контролируемого газового окружения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адамчук В.К., Ермаков А.В., Федосеенко С.И. Сканирующий туннельный и силовой микроскопы для сверхплотной записи информации. Возможности практической реализации накопителей информации большой емкости. Электронная промышленность. 1991. N 3. с.14.
2. Becker R.S., Golovchenko J.A., Swartzentruber B.S. Atomic-scale surface modification using a tunneling microscope, Nature. 1987. v.325. N 6103. P.419.
3. Binning G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy, Helv. Phys. Acta. 1982. v.55. P.726.
4. Dagata J.A., Tseng W., Bennett J. et al. Nanolithography on III - V semiconductor surfaces using a scanning tunneling microscope operating in air, J. Appl. Phys. 1991. v.70. N 7. P.3661.
5. Lemke H., Goddenhenrich T., Bochem H.P. et al. Improved microtips for scanning probe microscopy, Rev. Sci. Instrum. 1990. v.61. N 10. P.2538.
6. Naganara L., Lindsay S.M., Thundat T., Knipphig U. Tip-bias induced surface modification on gold surfaces, J. Microsc. 1988. v.152. N 1. P.145.
7. Wiesendanger R. Fabrication of nanometer structures using STM, Appl. Surf. Sci. 1992. v.54. P.271.