

05;11;12

## **Метод контроля формы иглы атомно-силового (туннельного) микроскопа с помощью спектрометрии обратного рассеяния**

© Г.В. Дедков, С.Ш. Рехвиашвили

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик

*Поступило в Редакцию 24 сентября 1996 г.*

Предложен метод контроля формы иглы атомно-силового микроскопа, который позволяет совместить операции ионного травления и контроля формы, осуществляя последний по интенсивности обратного рассеяния ионов этого же или другого пучка. Получены зависимости, использование которых обеспечивает возможность контроля формы иглы по измеренной зависимости интенсивности обратного рассеяния от параметров падающего пучка.

В настоящее время сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия (СТМ и АСМ) являются одними из наиболее эффективных методов исследования в физике поверхностей, нанотехнологии и т. д. [1,2]. Системы сканирования и обработки электрического сигнала в этих приборах, несмотря на продолжающийся поиск новых модификаций, уже достигли высокого уровня совершенства. Наименее контролируемой и технологичной операцией в конструировании СТМ и АСМ является процесс изготовления чувствительного элемента — иглы. Особое значение имеет изготовление игл контролируемой формы с малой кривизной кончика (на уровне нескольких ангстрем или, в идеале, с одним атомом на вершине острия). Реальное измерение радиуса кривизны кончика иглы и ее формы в целом до сих пор вызывает затруднения. В последнее время в качестве перспективного метода, позволяющего заострить иглу, применяется ионно-лучевое травление [3,4], в результате которого поверхность иглы шлифуется пучком ионов. В данной статье предлагается совместить операции ионного травления и контроля формы иглы, осуществляя последний по интенсивности обратного рассеяния ионов этого же пучка или другого. Оба процесса, что очень важно, можно осуществить в одной вакуумной ячейке.

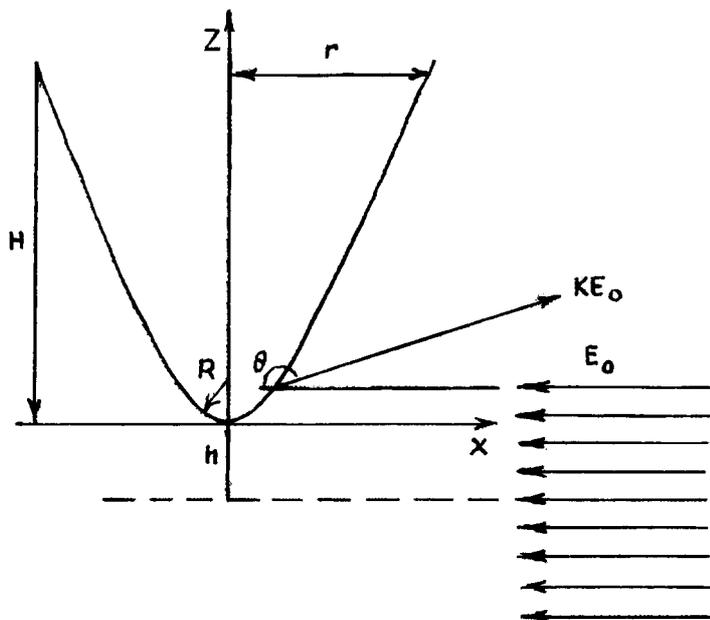
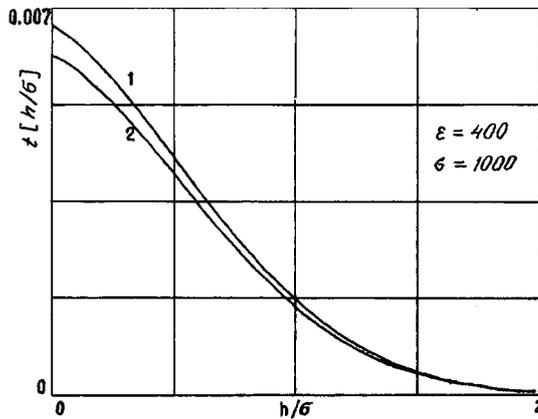


Рис. 1. Схема эксперимента.

Предположим, что игла СТМ (АСМ) имеет параболическую форму с радиусом кривизны  $R$  в нижней части и высотой  $H$ . Хорошо коллимированный ионный пучок круглого сечения с начальной энергией  $E_0$  направляется на иглу так, как показано на рис. 1. Если проекция острия иглы на плоскость, перпендикулярную к пучку, имеет площадь  $F$ , то выход обратного рассеяния при отражении пучка от ее поверхности будет равен

$$Y = IFN\sigma \frac{\delta E}{S(E_0)} \delta\Omega, \quad (1)$$

где использованы стандартные обозначения:  $I$  — плотность потока падающих ионов,  $\sigma$  — дифференциальное сечение рассеяния,  $N$  — плотность атомов иглы,  $\delta E$  и  $\delta\Omega$  — энергетическое и угловое разрешение детектора,  $S(E)_0$  — начальная тормозная способность. Применение формулы (1) предполагает, что регистрируются лишь те ионы, которые



**Рис. 2.** Зависимость относительной интенсивности обратного рассеяния от иглы АСМ при различных расстояниях  $h$  оси пучка относительно кончика иглы. Предполагается, что  $H/R = \epsilon = 400$ ,  $\sigma/R = 1000$ . Кривая 1 отвечает острию параболического типа, а кривая 2 — конического.

испытали обратное рассеяние вблизи поверхности иглы с толщиной соответствующего слоя, определяемой отношением  $\delta E/S(E_0)$ .

Это обстоятельство является существенным, поскольку регистрация выхода обратного рассеяния в более широком интервале энергий нарушает пропорциональность между величиной  $Y$  и площадью поверхности у иглы выпуклой формы.

Предполагая, что ось пучка находится на расстоянии  $h$  от кончика иглы (рис. 1) и что он имеет гауссово распределение интенсивности по сечению (с дисперсией  $\sigma$ ), величину  $IF$  следует находить усреднением по площади проекции иглы на плоскость  $xz$ :

$$\langle IF \rangle = \frac{I_0}{\pi\sigma^2} \iint_s dx dz \exp \left[ -\frac{(z+h)^2 + x^2}{\sigma^2} \right], \quad (2)$$

где  $I_0$  — максимальное значение интенсивности пучка (в его центре). В дальнейшем все линейные размеры и координаты удобно выражать в единицах  $R$ . Формула (2) упрощается после замены переменных  $u = x/\sigma$  и  $\nu = z/\sigma$ ,  $\epsilon = H/R$ . Для иглы с уравнением поверхности

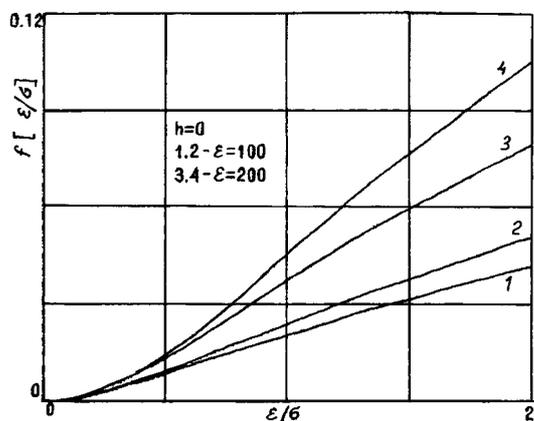
$z = (x^2 + y^2)/2R$  получим:

$$\langle IF \rangle = I_0 R^2 f(\varepsilon, \sigma, n), \quad (3)$$

$$f(\varepsilon, \sigma, h) = 0.5 \operatorname{erf} \left[ \frac{\sqrt{2\varepsilon}}{\sigma} \right] \left\{ \operatorname{erf}(\varepsilon/\sigma + h/\sigma) - \operatorname{erf}(h/\sigma) \right\} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-h^2/\sigma^2) \int_0^{\varepsilon/\sigma} \exp(-t^2) \operatorname{erf}(\sqrt{2t}/\sigma) dt \}, \quad (4)$$

где  $\operatorname{erf}(x)$  — функция ошибок. Сканируя острие иглы по координате  $Z$ , можно получить экспериментальные зависимости выхода  $Y$  и функции  $f(h)$  от условий опыта. Соответствующее перемещение иглы АСМ достигается применением стандартного пьезодвигателя прибора при неподвижной оси пучка.

На рис. 2 показаны теоретические зависимости  $f(\varepsilon, \sigma, h)$  от отношения  $h/\sigma$  при  $\varepsilon = 400$  и  $\sigma = 1000$ , рассчитанные по формуле (4). Кривая 1 соответствует острию с формой параболоида вращения, а



**Рис. 3.** То же, что на рис. 2, при различных значениях  $\varepsilon/\sigma$  и  $h = 0$ . Кривые 1, 3 соответствуют параболическому острию при  $\varepsilon = 100$  и 200, а кривые 2, 4 — коническому.

кривая 2 — конусу, имеющему такую же высоту  $H$  и радиус основания  $r$ . В используемых относительных единицах, очевидно,  $r = \sqrt{2\varepsilon}$ . На рис. 3 приведены аналогичные зависимости при  $h = 0$  и различных значениях  $\varepsilon$  и отношения  $\varepsilon/\sigma$ . Кривые 2, 4 соответствуют параболоиду, а 3, 4 — конусу.

Применение этих результатов обеспечивает возможность надежного контроля формы иглы по измеренной в эксперименте зависимости  $f(\varepsilon, \sigma, h)$ .

Следует отметить, что реальный диаметр диагностирующего пучка (т. е. фактически, величина дисперсии  $\sigma$ ) не обязательно должен быть одного порядка с величиной высоты острия, поскольку достаточно работать лишь на части пучка. Этому способствует также то обстоятельство, что материал иглы, как правило, отличается по составу от материала консоли АСМ, поэтому соответствующие спектры обратного рассеяния от них сдвинуты на энергетической шкале по отношению друг к другу и легко идентифицируются. Тем не менее, конечно, желательно применять пучки субмикронного масштаба и малой плотности тока. В современной пучковой технологии такие параметры уже достигнуты.

Проблема расчета формы иглы в зависимости от времени и интенсивности ионного облучения является более сложной (даже при известной угловой зависимости коэффициента распыления). Этот вопрос предполагается рассмотреть позже.

## Список литературы

- [1] Эдельман В.С. // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 1. С. 24–35.
- [2] Sarid D. // Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces. Oxford U. Press, New York. 1991.
- [3] Vasile M.J. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 62. P. 2167–2171.
- [4] Hopkins L.C. et al. // J. vac. Sci. & Technology. B. 1995. V. 13. P. 335–337.