

- [6] Гурович В.С., Соловьев Л.С. – ЖЭТФ, 1986, т. 91, в. 4(10), с. 1144.
- [7] Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
- [8] Морозов А.И., Шубин А.П. – Физика плазмы, 1983, т. 9, в. 3, с. 659.
- [9] Мовесьянц Ю.Б. – ЖЭТФ, т. 91, в. 2(8), с. 493.

Институт физики
АН Киргизской ССР,
Фрунзе

Поступило в Редакцию
7 октября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 24 26 декабря 1988 г.

СКАНИРУЮЩИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОСТА ПЛЕНОК

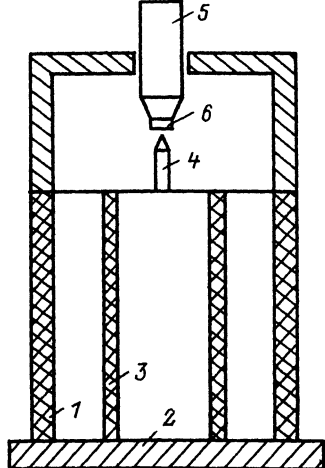
Ю.А. Битюрин, Д.Г. Волгунов,
А.А. Гудков, М.Г. Кузеванов,
В.Л. Миронов, А.А. Петрухин

Сканирующая туннельная микроскопия – один из новых методов анализа поверхности, применение которого возможно в самых различных областях. Одним из важных приложений туннельной микроскопии [1] является исследование процессов, связанных с ростом пленочных структур. В этом случае целесообразно размещение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) непосредственно в вакуумной камере ростовой установки, что позволило бы проводить различного рода анализ растущей пленки и обеспечить необходимую чистоту ее поверхности. В настоящем сообщении кратко описана конструкция СТМ, предусматривающая его совмещение с высоковакуумной напылительной установкой и проиллюстрированы его возможности по исследованию рельефа поверхности пленочных структур.

Микроскоп выполнен из материалов, допускающих его эксплуатацию в условиях высокого вакуума и предназначен для работы в установке УСУ ($P_{\text{ост}} \sim 10^{-10}$ Торр), являющейся одновременной ростовой камерой лазерной напылительной установки [2]. Конструкцией СТМ предусмотрена возможность замены иглы и образца через шлюзовую камеру и приняты дополнительные меры, обеспечивающие уменьшение влияния температуры на работу СТМ, что особенно важно при его совмещении с напылительной установкой.

Основу конструкции составляют две коаксиальные пьезокерамические трубки различного диаметра, закрепленные на общем фланце, являющемся основанием прибора (рис. 1). На свободных торцах внутренней и внешней трубок закреплены соответственно игла и образец. Внутренняя трубка выполняет роль трехкоординатного пье-

Рис. 1. Схематичное изображение конструкции СТМ. 1 - термокомпенсирующая пьезотрубка, являющаяся частью корпуса прибора, 2 - фланец, 3 - трубчатый трехкоординатный пьезообразователь, 4 - игла, 5 - цилиндрический держатель образца, 6 - образец.

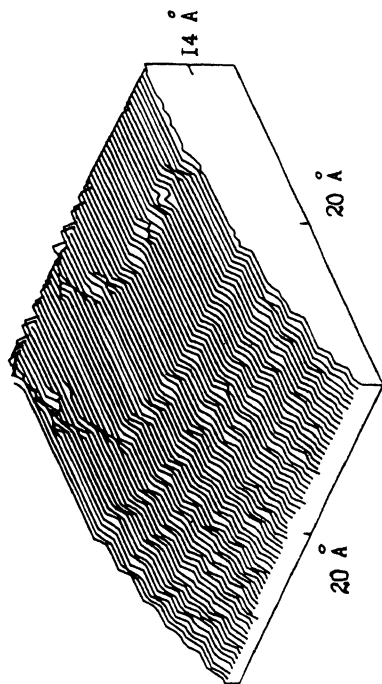
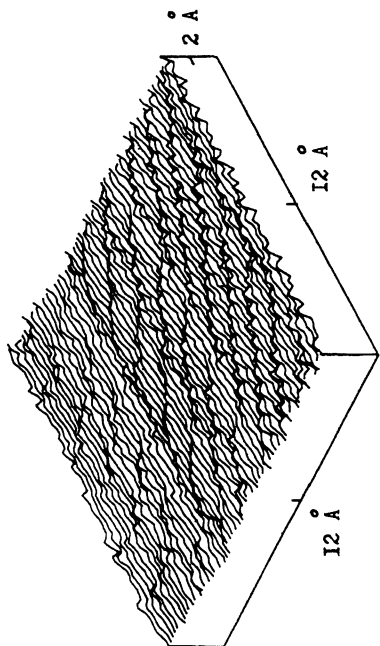
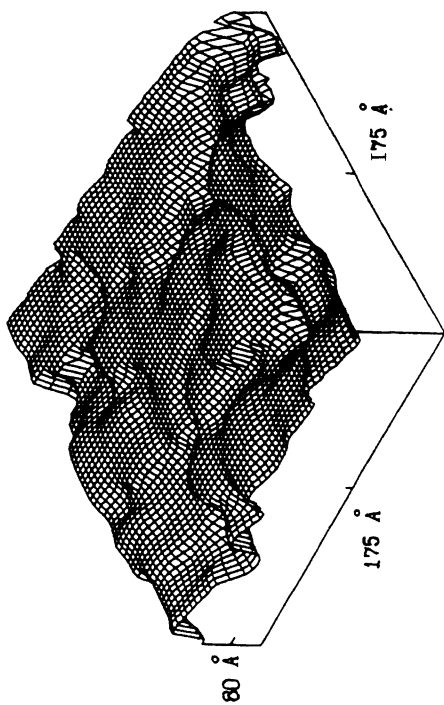
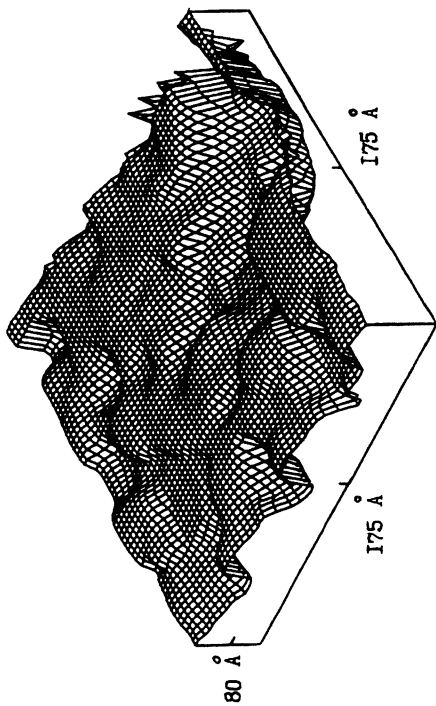


зопреобразователя [3]. С этой целью электрод на ее внешней поверхности разделен на четыре равные секции. При подключении к противоположным секциям противофазного пилообразного напряжения различной полярности происходит изгиб трубки по соответствующим направлениям, т.е. осуществляется сканирование в плоскости образца (x, y). Перемещение иглы в направлении z происходит за счет изменения потенциала на внутреннем электроде. Внешняя трубка является многофункциональной частью конструкции. Во-первых, это корпус прибора, обеспечивающий жесткость конструкции. Во-вторых, внешняя трубка выполняет роль компенсатора термдеформаций внутренней трубки, стабилизируя положение острия в направлении нормали к исследуемой поверхности. В-третьих, она является основной частью устройства грубого сближения иглы и образца, аналогичного используемому авторами работы [4]. И, наконец, при работе прибора эту трубку можно использовать для задания постоянного смещения по любой из координат, подавая на ее электроды соответствующие напряжения. Вся конструкция СТМ обладает аксиальной симметрией, что уменьшает термодрейф положения иглы в плоскости исследуемой поверхности.

В микроскопе использовались зондирующие иглы из W проволоки миллиметрового диаметра. Формирование острий производилось в несколько этапов путем электрохимического перетравливания заготовок. При необходимости возможна доводка игл *in situ*, что делается традиционными способами [5].

Исследуемый образец располагается на специальном цилиндрическом столике, стыкующемся с шлюзовым манипулятором. Игла и столик образца закрепляются в микроскопе с помощью пружинных держателей, что позволяет достаточно просто производить их замену через шлюзовую камеру.

Напыление пленок может производиться как вне микроскопа, так и внутри него через специально предусмотренное окно в корпусе СТМ.



Испытания СТМ проводились в низковакуумной установке ВУП-4 ($P_{\text{ост}} \approx 10^{-6}$ Торр), что связано с более легким доступом к прибору, необходимым на время его отладки. Для защиты от высокочастотных вибраций микроскоп закреплялся на мягком пружинном подвесе (резонансная частота $f_p \approx 1$ Гц), а стабильность туннельного промежутка игла-образец на низких частотах обеспечивалась жесткостью конструкции СТМ. С целью уменьшения добротности подвеса, применен демпфер из SmCo магнита и медной пластины.

Система автоматизации СТМ, необходимая для управления работой микроскопа, регистрации и обработки полученных данных и различного вида их отображения, в нашем случае состоит из микро ЭВМ LSI 11/23 *HYTES*, винчестер-диска емкостью 40 Мбайт и аппаратуры сопряжения в стандарте КАМАК [6]. Применение высокопроизводительной ЭВМ с оперативной памятью 256 Кбайт и наличие накопителя большой емкости обеспечивает возможность проведения исследований с большими скоростями сканирования, быстрый обработки данных и создания обширной библиотеки кадров. Реализована различного рода обработка кадров, включающая в себя фильтрацию шумов, удаление постоянного наклона (тренда) в изображении, определение среднеквадратичного отклонения поверхности относительно среднего уровня (дисперсия), построение функции распределения по размерам шероховатостей, нахождение корреляционных функций и пространственных Фурье спектров. Наличие статистической обработки позволяет проводить исследование топографии пленок в процессе напыления, не заботясь о необходимости снятия информации с одного и того же участка поверхности.

При исследовании механических свойств микроскопа было установлено, что низшая резонансная частота конструкции составляет ≈ 4 кГц. Это позволило реализовать скорость сканирования ~ 1000 точек-с и снимать стандартный кадр из 128×128 элементов за $t \approx 30$ с. Для уменьшения влияния гистерезиса и криппа, присущих пьезокерамическим элементам, при сканировании использовались низковольтные режимы работы, а регистрация полезного сигнала производилась при движении иглы только в одном направлении.

С помощью описанного СТМ были проведены исследования поверхностей пиролитического графита и пленок различных металлов. Предел пространственного разрешения по нормали к поверхности образца определяется в основном шумами в системе и составляет для нашего СТМ ~ 0.1 Å. На рис. 2, а, б приведены результаты

Рис. 2. а). Изображение поверхности пиролитического графита с атомарным разрешением ($I_T = 5$ нА, $V_T = 50$ мВ). б). Моноатомные ступени на поверхности пленки Mo ($I_T = 1$ нА, $V_T = 100$ мВ). в), г) Рельеф участка поверхности пленки Pt на Si размером 350×350 Å, снятый два раза с интервалом в 20 мин ($I_T = 0.1$ нА, $V_T = 200$ мВ). Виден дрейф изображения в направлении от центра в правый нижний угол.

исследований, иллюстрирующие разрешающую способность микроскопа. На поверхности пиролитического графита обнаружены участки с хорошей периодичностью на атомарных масштабах, что позволяет оценить разрешение в плоскости (x, y) в единицы ангстрем. Меры, принятые для уменьшения влияния изменения температуры, обеспечили надежную фиксацию положения острия по отношению к поверхности. Дрейф в направлении z оценивается величиной $0,2 \text{ \AA}/\text{мин}$. Для измерения величины дрейфа в плоскости (x, y) через определенный интервал времени снимался один и тот же участок поверхности пленки *Pt* (рис. 2, в, г). По серии кадров установлено, что дрейф в плоскости не превышает $3 \text{ \AA}/\text{мин}$. Измерения проводились на воздухе в обычном помещении без принятия мер к стабилизации температуры.

Таким образом, эксперименты показали, что описанный микроскоп обладает достаточно высокой разрешающей способностью и термостабильностью. В дальнейшем его использование предполагается в высоковакуумной установке для исследования процессов роста пленок *in situ*.

В заключение авторы выражают благодарность С.В. Гапонову, А.Н. Гинзбургу и Ю.К. Постоенко за постоянный интерес и помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

- [1] Binnig G., Rohrer H. - IBM J. Res. Develop., 1986, v. 30, N 4, p. 335.
- [2] Гапонов С.В., Салашенко Н.Н. - Электронная промышленность, 1976, № 1, с. 11.
- [3] Binnig G., Smith E. - Rev. Sci. Instrum.; 1986, v. 57, N 8, p. 1688.
- [4] Хайкин М.С., Володин А.П., Трояновский А.М., Эдельман В.С. - ПТЭ, 1987, № 4, с. 231.
- [5] Hansma P., Tersoff J. - J. Appl. Phys., 1987, v. 61, N 2, p. R1-R23.
- [6] Битюрин Ю.А., Волгунов Д.Г., Гудков А.А., Каськов И.А., Кузеванов М.Г., Миرونнов В.Л., Петрухин А.А. - Препринт ИПФ АН СССР, 1988, № 197.

Институт прикладной
физики АН СССР,
Горький

Поступило в Редакцию
27 мая 1988 г.