

- [6] Савинов Е.Н., Саидханов С.С., Пармон В.Н., Замараев К.И. – Докл. АН СССР, 1983, т. 272, в. 4, с. 916–919.
- [7] Betz G., Tributsch H., Marchand R. – J. Appl. Electrochem., 1984, v. 14, N 3, p. 315–322.

Научно-исследовательский
физико-химический институт
им. Л.Я. Карпова, Москва

Поступило в Редакцию
8 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 3

12 февраля 1988 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

В.К. Адамчук, В.М. Александров,
А.В. Ермаков, И.В. Любинецкий

Развитие метода сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) позволяет в настоящее время получать микрофотографические изображения поверхностей металлов и полупроводников с разрешением порядка атомных размеров, причем не только в условиях вакуума, но и в жидкостях и газах [1–3]. Физической основой СТМ является туннелирование электронов между образцом и металлическим острием малого радиуса. Острием сканируют над исследуемым участком поверхности с помощью пьезоэлектрических двигателей (по X и по Y), третий пьезодвигатель (по Z) обеспечивает неизменное расстояние между образцом и острием при сканировании, поддерживая постоянной величину туннельного тока [1]. Регистрация напряжений, управляющих пьезодвигателями, позволяет получить изображение топографии поверхности в трех измерениях.

В данном сообщении приведены результаты изучения с помощью сканирующего туннельного микроскопа топографии металлизированных оптических поверхностей. Обычно применяемое для исследований оптических поверхностей механическое профилирование алмазной иглой имеет ограниченное разрешение вдоль скана ~ 0.1 мкм [4], а вследствие механического контакта исследуемая поверхность может быть повреждена. Методы электронной микроскопии позволяют достигнуть разрешение ≤ 1 нм. Однако, принимая во внимание высокие энергии электронов, зондирование с помощью электронного пучка может быть разрушающим, а, кроме того, требует наличия высокого вакуума. Преимущества СТМ заключаются, во-первых, в возможности проведения топографического анализа с разрешением ≤ 1 нм и в обычных атмосферных условиях, во-вторых, в неразрушающем

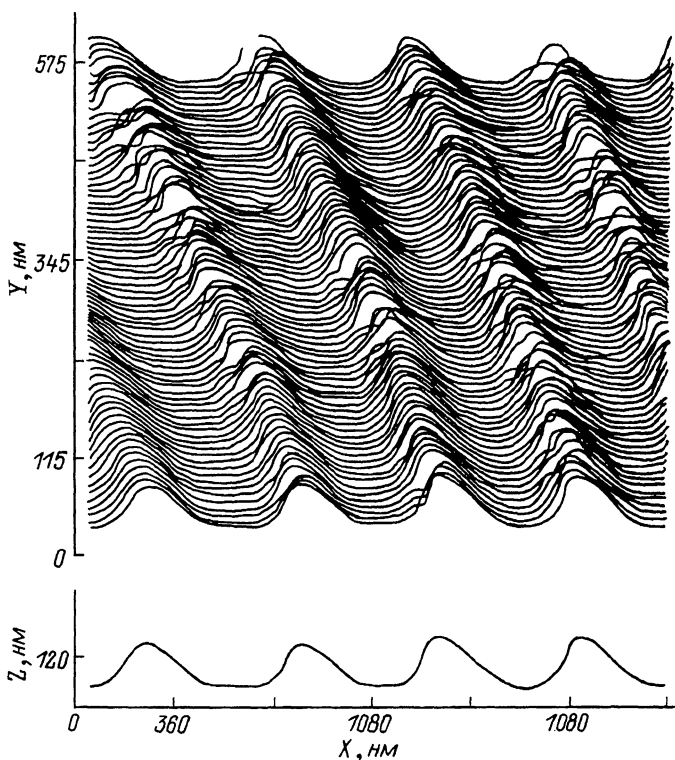


Рис. 1. Топографическое изображение участка дифракционной решетки размером 2.2 мкм.0.6 мкм.

характере, что обусловлено отсутствием механического контакта с изучаемой поверхностью и низкими энергиями электронов, лежащими в интервале от нескольких мэВ до нескольких эВ [4, 5].

Особенности конструкции созданного нами сканирующего туннельного микроскопа позволяют проводить топографические исследования относительно больших областей (~ 10 мкм x 10 мкм) поверхностей образцов с геометрическими размерами до нескольких сантиметров и более на воздухе, а также обеспечивают легкую и быструю смену исследуемого участка поверхности или образца. Приближение острия к образцу осуществляется механически с расстояний нескольких миллиметров с точностью ~ 50 нм (одному обороту регулировочного винта соответствует перемещение острия на ~ 2 мкм). Манипулятор, обеспечивающий сканирование острия и поддержание постоянного туннельного зазора, состоит из трех взаимоперпендикулярных пьезоэлектрических преобразователей, изготовленных из пьезокерамики ПКР-7М или ПКР-6 [6]. Чувствительность пьезодвигателей Δ ,

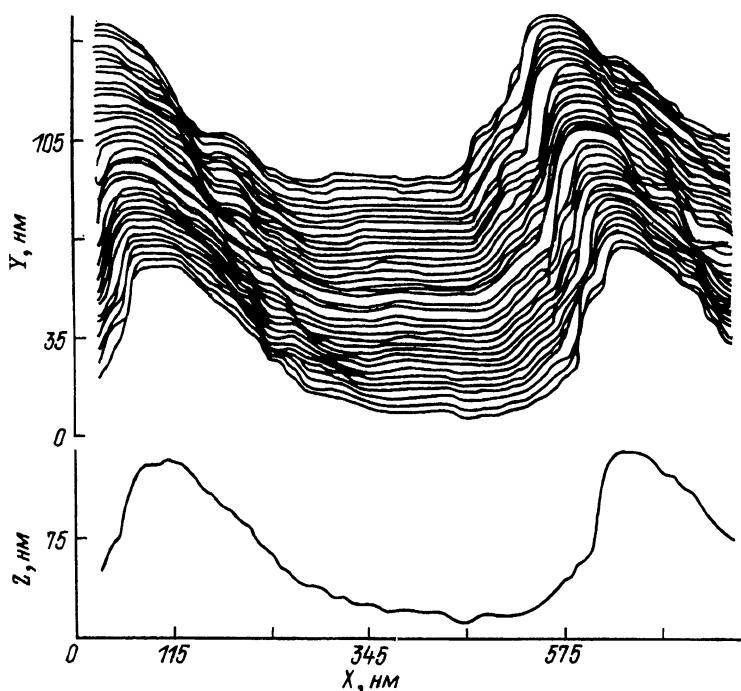


Рис. 2. Топографическое изображение участка дифракционной решетки размером $0.75 \text{ мкм} \cdot 0.14 \text{ мкм}$.

определенная согласно пьезомодулям керамики [6], составила $\Delta X(Y) \sim 18 \text{ нм/В}$, $\Delta Z \sim 3 \text{ нм/В}$, что при управляющем напряжении 500 В соответствует перемещениям на 9 и 1.5 мкм соответственно. Виброизоляция прибора обеспечивается жесткостью конструкции, а также использованием одноступенчатой пневморазвязки с собственной частотой $\sim 2 \text{ Гц}$. Электронная схема управления микроскопа позволяет поддерживать заданную величину туннельного тока в диапазоне $50 \text{ нА} - 0.05 \text{ нА}$ при напряжениях между острием и образцом от -5 В до $+5 \text{ В}$ и при ширине полосы пропускания до 5 кГц . Изображения структуры поверхностей записываются в реальном времени непосредственно на двухкоординатный самописец без какой-либо предварительной обработки (фильтрации шумов, накопления и усреднения и т. п.). Время записи одного скана (по X) составляет $\geq 3 \text{ с}$. Для уменьшения влияния гистерезиса пьезокерамики, который составляет несколько процентов от длины скана, запись производится лишь при одном направлении сканирования. Острие изготавливается из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мкм путем электрохимического травления. Разрешение микроскопа по оси Z ограничивается в основном внешними вибрациями и резонансом пневморазвязки и составляет $\sim 0.5 \text{ нм}$, разрешение по $X(Y) \sim 2 \text{ нм}$.

На рис. 1 приведено полученное на СТМ микрофотографическое изображение участка дифракционной решетки размером $2.2 \text{ мкм} \cdot 0.6 \text{ мкм}$, а также показан отдельный скан по X . Дифракционная решетка имеет 2400 штрихов/мм. Изображение записано за 8 мин при туннельном токе 0.5 нА, напряжении 10 мВ. Сканирование осуществлялось под углом $\sim 45^\circ$ к направлению штрихов решетки. Изображение хорошо воспроизводилось при повторной записи. Из рисунка можно видеть наличие характерной регулярной структуры параллельных штрихов, образуемых „зубцами“ и „впадинами“. Период решетки, определенный согласно полученному изображению, составил $\sim 380 \text{ нм}$, средняя глубина „впадин“ $\sim 100 \text{ нм}$. На рис. 2 представлено изображение одного периода решетки, записанного с большим увеличением при идентичных параметрах. Величина неперIODических поверхностных неровностей (относительно средней линии скана) составляет $\sim 5\text{--}10 \text{ нм}$. На оптически полированных металлизированных поверхностях были зафиксированы минимальные неровности порядка 1–3 нм.

Таким образом, в данной работе показано, что исследования оптических поверхностей на воздухе с помощью сканирующего туннельного микроскопа могут давать детальную информацию о микроструктуре поверхности, в частности легко может быть зарегистрирован микрорельеф в диапазоне 1–10 нм. Исследования с высоким пространственным разрешением важны для лучшего понимания процесса изготовления и, возможно, для контроля производства оптических металлизированных поверхностей высокого качества.

Л и т е р а т у р а

- [1] B i n n i g G., R o h r e r H. – IBM J. Res. Develop., 1986, v. 30, N 4, p. 335.
- [2] Х а й к и н М.С., Т р о я н о в с к и й А.М. – Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, в. 20, с. 1236.
- [3] В а с и л ь е в С.М., Л е о н о в В.Б., П а н о в В.И. – Письма в ЖТФ, 1986, т. 13, в. 15, с. 937.
- [4] G a r c i a N., V a r o A.M., M i r a n d a R., R o h n e r H., G e r b e r Ch., G a r c i a C a n t u R., P e n a J.L. – Metrologia, 1985, v. 21, N3, p. 135.
- [5] D r a g o s e t R.A., Y o u n g R.D., L a y e r H.P., M i e l c z a r e k S.R., T e a g u e E.C., C e l o t t a R.J. – Optics Lett., 1986, v. 11, N 9. p. 560.
- [6] Ф е с е н к о Е.Г., Д а н ц и г е р А.Д., Р а з у м о в с к а я О.Н. Новые пьезокерамические материалы, Ростов-на-Дону, 1983.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики Ленинградского
государственного университета
им. А.А. Жданова

Поступило в Редакцию
27 ноября 1987 г.