

13. Григорьев А.И., Ширяева С.О. // Тез. докл. Всес. конф. по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. — Обнинск, 1987. — С. 194—195.

14. Шевченко С.И. / Тез. докл. XV Всес. конф. Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем. — Одесса, 1989. — Т. 2. — С. 41.

Рукопись поступила 04.01.90

М.В. Иванов, С.А. Виноградова, А.О. Голубок
(Институт аналитического приборостроения АН СССР,
Ленинград)

ПОЛУЧЕНИЕ СТМ-ИЗОБРАЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТУННЕЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), появившийся в начале 80-х годов [1], находит все более широкое применение в различных областях науки, техники и технологии [2]. Широкая область применения обусловлена многообразием возможных режимов функционирования СТМ, среди которых режимы постоянного туннельного тока, постоянного расстояния, измерения градиента рельефа, локальной работы выхода, локальной спектроскопии и потенциометрии и т.д. Естественно, что при реализации этих режимов возможны различные подходы как к аппаратным, так и к программным средствам.

Обычно режим постоянного расстояния используется при быстром сканировании острием над атомно-гладкими поверхностями, когда частота изменения туннельного тока много больше частоты среза амплитудно-частотной характеристики следящей системы с замкнутой петлей обратной связи. В отличие от режима постоянного тока острие при сканировании не огибает рельеф, а быстро перемещается по прямолинейным траекториям (режим быстрой развертки, БР), отклоняясь от них лишь при обработке следящей системой низкочастотных изменений туннельного тока. Если в режиме постоянного туннельного тока частоты шумовых сигналов лежат в полосе частот полезного сигнала, то в режиме БР они разнесены, что приводит к улучшению отношения сигнал/шум в режиме БР. Это позволяет наблюдать изображение достаточно высокого качества непосредственно без дополнительной обработки на ЭВМ.

Для реализации режима БР был разработан блок (устройство) БР с выводом изображения на экран осциллографа или графопостроитель.

Входным сигналом устройства является напряжение V_z , пропорциональное туннельному току I_T . Блок вырабатывает сигналы строчной и кадровой разверток и сигнал модуляции яркос-

ти. Выходные сигналы разверток используются как для формирования раstra на экране осциллографа, так и для управления сканирующим устройством СТМ.

Блок БР дает возможность наблюдать изображение поверхности на экране осциллографа в двух видах: в виде модулированной по яркости картинки, где более светлому участку изображения соответствует большее значение I_T или в виде квазитрехмерного изображения в координатах X, Y, Z , где амплитуда Z пропорциональна величине I_T . Кроме того, предусмотрена возможность получения квазитрехмерного изображения с помощью графопостроителя.

Блок БР вырабатывает растр с наибольшим числом строк 999 и с наибольшим числом точек в каждой строке 999. Блок БР позволяет сформировать любой фрагмент полного раstra, ограниченный значениями X_n, X_k, Y_n, Y_k , где (X_n, Y_n) и (X_k, Y_k) — координаты начальной и конечной точек фрагмента.

Устройство состоит из следующих основных частей: генератора счетных импульсов и делителя частоты; узлов строчной X и кадровой Y разверток; усилителя модуляции яркости; устройства управления (УУ).

Структурная схема устройства приведена на рис. 1.

Для генерации импульсов строчной и кадровой разверток необходимо предварительно записать с клавиатуры в регистры $Rg(X_n), Rg(X_k), Rg(Y_n), Rg(Y_k)$ значения координат X_n, X_k, Y_n, Y_k . Содержимое регистров отображается знаковыми индикаторами, расположенными на лицевой панели блока БР.

Рассмотрим процесс формирования импульсов строчной развертки. По сигналу „Пуск“ содержимое $Rg(X_n)$ загружается в реверсивный счетчик PC_X . УУ разрешает поступление счетных импульсов на вход прямого счета PC_X . Когда содержимое счетчика сравняется с числом, записанным в $Rg(X_k)$, УУ запретит поступление импульсов на вход прямого счета и переведет PC_X на обратный счет. Как только содержимое счетчика сравняется с кодом числа в $Rg(X_n)$, УУ переключит PC_X на прямой счет и т.д. Содержимое PC_X преобразуется ЦАП $_X$ в сигнал пилообразной формы, который через буферный усилитель поступит на вход строчной развертки осциллографа.

Формирование импульсов кадровой развертки происходит аналогичным образом с той разницей, что счетными импульсами PC_Y при прямом счете являются инвертированные строб-импульсы прямого хода луча строчной развертки.

УУ вырабатывает строб-импульсы прямого и обратного хода строчной и кадровой разверток. Из-за гистерезиса пьезокерамического сканера СТМ-изображения на прямом и обратном ходе

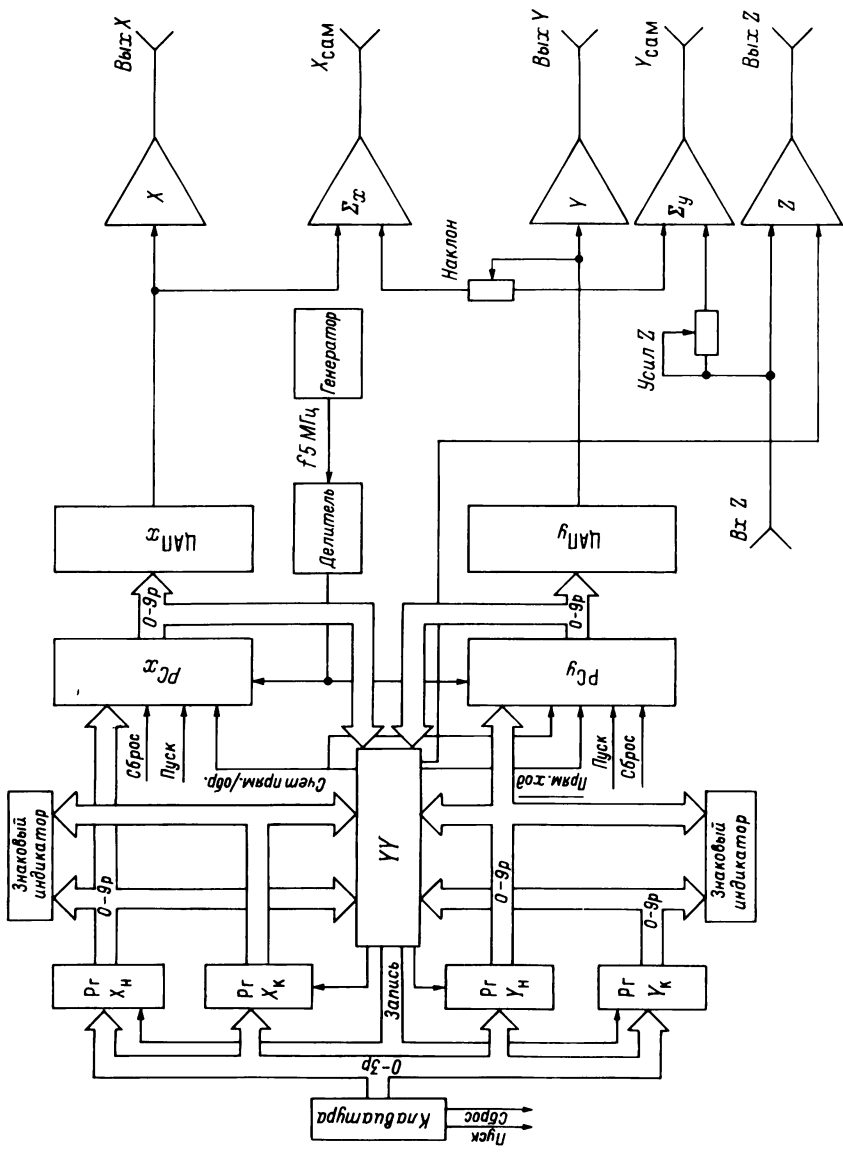


Рис. 1. Структурная схема блока быстрой развертки СТМ

луча могут не совпадать, поэтому УУ выдает сигнал гашения обратного хода луча, который алгебраически складывается с входным сигналом V_z . Сигнал с выхода сумматора подается на вход модуляции яркости осциллографа. Таким образом на экране осциллографа появляется модулированное по яркости СТМ-изображение, обычно называемое „видом сверху“.

Для получения квазитрехмерного изображения в координатах X, Y, Z сигнал от ЦАП _{x} суммируется на Σ_x с сигналом от ЦАП _{y} и далее поступает на вход горизонтальной развертки осциллографа. Регулировка „Наклон“, изменяющая вес сигнала ЦАП _{y} меняет наклон оси Y относительно оси X . Сигнал ЦАП _{y} складывается с сигналом V_z на Σ_y . Напряжение с выхода сумматора Σ_y подается на вход вертикального отклонения луча осциллографа. Регулировка „Усиление Z “ изменяет вес входного сигнала в суммарном сигнале вертикального отклонения луча. Таким образом первая регулировка позволяет как бы изменять угол зрения на СТМ-изображение, а вторая — масштабировать изображение по координате Z .

Скорость развертки должна быть такой, чтобы частота полезного сигнала не превышала первую резонансную частоту узла сканирования. Для того, чтобы иметь возможность подбирать скорость развертки под различные узлы сканирования, сигналы от задающего генератора с частотой $f_{\text{ген}} = 5$ МГц подаются на вход делителя частоты с переменным коэффициентом деления $K_{\text{дел}} \cdot 10^l$. $K_{\text{дел}}$ может принимать значения 1, 2, 5 и 10, l принимает значения 0, 1, 2, 3.

Счетные импульсы с большими периодами следования используются при выводе квазитрехмерного изображения на графопостроитель. Сигнал гашения обратного хода луча является в этом случае сигналом подъема пера. Сигнал „Сброс“ запрещает прохождение счетных импульсов на входы РС, обнуляет регистры и счетчики.

Описанный выше блок БР имеет ряд особенностей. Так, например, в отличие от блока ТВ развертки, описанного в [3], в данном блоке применяется линейная развертка. Это исключает искажения изображения, связанные с неравномерной засветкой экрана. Кроме того, режим квазитрехмерного изображения с возможностью вращения осей и масштабирования по Z (в некотором смысле — выбор „точки наблюдения“) во многих случаях делает СТМ-изображение исследуемой поверхности более наглядным и информативным, а возможность вывода изображения с помощью графопостроителя оказывается удобной для оперативного получения твердой копии СТМ-изображения поверхности.

Как указывалось выше, в режиме БР траектория движения острия не повторяет резкие перепады рельефа поверхности. Поэтому над резкими подъемами рельефа может произойти касание острием исследуемой поверхности в случае, если пере-

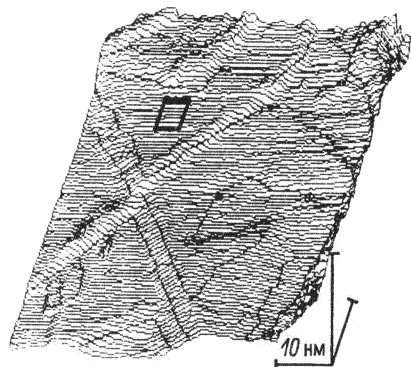


Рис. 2. СТМ-изображение поверхности скола пиролитического графита, полученное в режиме постоянного туннельного тока; $V_T = 10 \text{ мВ}$, $I = 10 \text{ нА}$

пад высот оказывается больше расстояния между острием и образцом в начальной точке сканирования. Вообще говоря, в СТМ-эксперименте происходит регистрация изменения рельефа относительно начальной точки сканирования, а абсолютная величина туннельного расстояния остается неизвестной. Однако из общей теории СТМ следует, что при высоте туннельного барьера $\sim 1 \text{ эВ}$ расстояние между острием и поверхностью образца имеет величину $\sim 1 \text{ нм}$. Высота туннельного барьера может быть и меньше, например, из-за наличия примесей на поверхности острия или образца при экспериментах на воздухе, но и в этом случае можно приблизительно оценить расстояние между острием и образцом и, зная перепад рельефа для

выбранного участка поверхности, можно сделать вывод о применимости режима БР. Поэтому перед началом сканирования в режиме БР производится предварительный просмотр поверхности

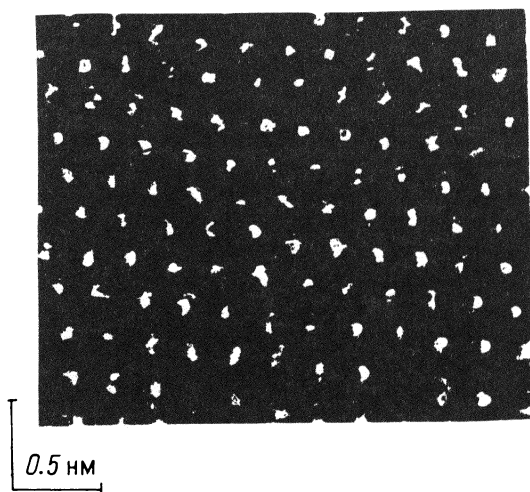


Рис. 3. СТМ-изображение гладкого участка поверхности графита, визуализированное в режиме постоянного среднего расстояния. Частота развертки по оси X — 50 Гц, по оси Y — 0.25 Гц

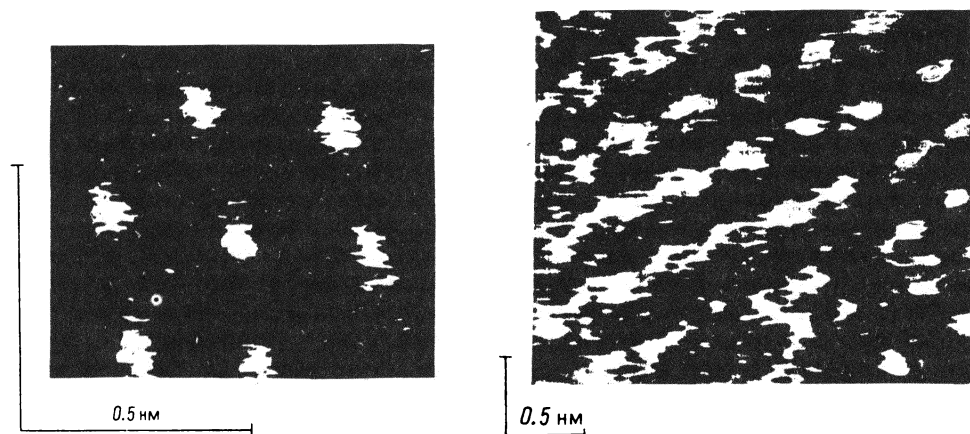


Рис. 4. СТМ-изображение участка поверхности графита площадью 0.7×0.7 нм. Частота развертки по оси X — 50 Гц, по оси Y — 0.25 Гц

Рис. 5. СТМ-изображение пленки Лэнгмюра-Блоджетт глицерил-моноолеата на поверхности графита, полученное в режиме постоянного среднего расстояния. Частота развертки по оси X — 50 Гц, по оси Y — 0.25 Гц

в режиме постоянного тока [4] с параллельной визуализацией изображения на экране управляющего компьютера. Несмотря на большее влияние шумов, разрешение в режиме постоянного тока вполне достаточно для определения гладких участков поверхности на фоне шероховатостей. После визуальной оценки изображения и выбора участка для дальнейшего исследования на СТМ-изображении с помощью экранного маркера указывается точка начала сканирования для следующего кадра, затем по команде от компьютера электронная система переводит сканер в указанную точку и производится визуализация выбранного участка с большим разрешением. Если условие применимости БР выполняется, то сканер возвращается к началу выбранного участка и осуществляется запуск сканирования в режиме БР.

На рис. 2 представлено типичное СТМ-изображение поверхности скола высокоориентированного пиролиитического графита, полученное в режиме постоянного туннельного тока при площади сканирования $\sim 50 \times 50$ нм². Хорошо видны участки поверхности с большим перепадом высот, которые, очевидно, непригодны для исследований в режиме БР. Одновременно наблюдаются гладкие области с малыми перепадами рельефа, подобные участку, заключенному в рамку на рис. 2. На рис. 3 показан отмеченный участок поверхности площадью 4×4 нм², визуализированный в режиме БР в виде яркостно-модулированного изображения, и хорошо видна гексагональная структура, харак-

терная для СТМ-изображений поверхности графита [2, 5, 6]. На рис. 4 приведено изображение поверхности графита площадью $0.7 \times 0.7 \text{ нм}^2$.

Таким образом, применение БР при исследовании атомно-гладких участков поверхности позволяет получать достаточно качественные СТМ-изображения с атомным разрешением без дополнительной фильтрации и при меньших требованиях к уровню шума по сравнению с режимом постоянного тока.

Следует отметить, что преимущества режима БР по сравнению с режимом постоянного тока становятся особенно существенными при исследовании динамических процессов на поверхности твердого тела (например, полимеризации молекул [7, 8], а также при визуализации с высоким разрешением пространственных структур, обладающих определенной подвижностью. В частности, молекулярное разрешение при исследовании пленок Лэнгмюра-Блоджетт удается получить, как правило, лишь в режиме БР [8-11]. Пример молекулярного разрешения, полученного с использованием описанного выше блока БР при исследовании пленки Лэнгмюра-Блоджетт глицирилмоноолеата на поверхности графита, приведен на рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бинниг Г., Рорер Г. // УФН. — 1988. — Т. 154. — С. 261—263.
2. Hansma P.K., Tersoff J. // J. Appl. Phys. — 1987. — V. 61(2). — P.R. — 1.
3. Хайкин М.С., Володин А.П. // Письма в ЖТФ. — Т. 12. — В. 21. — С. 1293—1297.
4. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Тимофеев В.А., Тупицев С.Я. // Научное приборостроение: сб. научн. тр. — Л.: Наука, 1989. — С. 72—77.
5. Эдельман В.С. // ПТЭ. — 1989. — N 5. — С. 25—28.
6. Голубок А.О. и др. // Поверхность. — 1989. — N 3. — С. 146—149.
7. Drake B. etc. // Science. — 1989. — Т. 243. — С. 1586—1587.
8. Albrecht T.R. etc. // J. Appl. Phys. — 1988. — V. 64(3). — P. 1178—1184.
9. Smith D.P.E. etc. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Biophysics. — 1987. — V. 84. — P. 969—972.
10. Coombs J.H., Pethica J.B., Welland M.E. // Thin Solid Films. — 1988. — V. 159. — P. 293—295.
11. Braun H.G., Fushs H., Schrepp W. // Thin Solid Films. — 1988. — V. 159. — P. 301—314.

Рукопись поступила 24.04.90