

УДК 621.385.833

О возможности использования шумов СТМ-изображения при исследовании поверхностных неоднородностей/ С.А.Виноградова, А.О.Голубок, Н.А.Тарасов, В.А.Тимофеев// Научное приборостроение. — 1991. — Т. 1. — № 3. — С. 3-8.

Проведен анализ зависимости шумов СТМ-изображения, получаемого с помощью сканирующего туннельного микроскопа, от геометрических и электронных свойств исследуемой поверхности. Показано, что шумы СТМ-изображения возрастают для областей поверхности, характеризующихся меньшими значениями локальной работы выхода, и уменьшаются при ее увеличении. Кроме того, шумы возрастают в тех областях, где СТМ-изображение демонстрирует изменение рельефа. Предлагается использовать данные по топографической зависимости шумов СТМ-изображения для идентификации областей поверхности с различными электронными свойствами и для "окоптуривания" границ поверхностных неоднородностей. Проведено сравнение с экспериментальными данными и подтверждены указанные корреляции. Библ. — 4 назв. Ил. — 3.

С.А. Виноградова, А.О. Голубок, Н.А. Тарасов, В.А. Тимофеев
(Институт аналитического приборостроения АН СССР, С.-Петербург)

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШУМОВ СТМ-ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) в настоящее время находит все более широкое применение в различных областях исследований, например, физике поверхности, нанолитографии, молекулярной электронике, биологии [1]. Это стало возможным благодаря развитию разнообразных методов, основанных на использовании СТМ.

Статья посвящена анализу корреляции между шумами СТМ-изображения и геометрическими и электронными свойствами поверхностных неоднородностей (например, кластеров, биологических молекул и т.п.). Заметим, что традиционное применение СТМ связано с различными способами подавления шумов [2,3]. При этом используются механические системы подавления вибраций в области высоких частот, подавление шумов с помощью следящей системы и системы электрических фильтров и различные методы математической обработки полученных СТМ-изображений (например, фильтрация, сглаживание).

Естественно, что если шумы СТМ-изображения превышают характерные масштабы исследуемого объекта, то результаты не являются пригодными для анализа. Однако при разумном уровне шумов оказывается, что они содержат дополнительную к СТМ-изображению информацию.

Чтобы проиллюстрировать это, напомним основной принцип работы СТМ. Туннельный ток I в простейшей модели СТМ определяется величиной туннельного промежутка Z (координата Z перпендикулярна плоскости сканирования X) и величиной туннельного барьера или работой выхода Φ :

$$I \sim \exp(-2kZ), \quad (1)$$

где $k = (2m\Phi)^{1/2} / \hbar$. Обычно СТМ-изображение поверхности $Z_{im}(X)$ получается при сканировании острием над исследуемой поверхностью в режиме постоянного тока $I(Z_{im}, X) = \text{const}$, когда туннельный контакт включен в петлю обратной связи следящей системы, поддерживающей постоянной величину туннельного тока. При этом измеряется электрическое напряжение $V_Z(X) \sim Z$, подаваемое на исполнительный элемент следящей системы (пьезодвижитель острия в направлении Z). Этот сигнал и считается СТМ-изображением поверхности $Z_{im}(X)$. Изменение туннельного тока I и, следовательно, $Z_{im}(X)$ определяется как полезным сигналом, связанным с изменением релье-

фа поверхности или работы выхода $Z_{im}^{\circ}(X)$, так и шумами, обусловленными, в частности, флуктуациями тока электронной системы управления СТМ $\Delta I_e(t)$ и вибрациями в системе острие — образец $\Delta S(t)$.

Остановимся подробнее на механизмах появления шумов в СТМ-изображении. Проанализируем сначала влияние собственных флуктуаций тока в электронном тракте на характеристики СТМ-изображения. Пусть эти флуктуации характеризуются зависимостью от времени $\Delta I_e(t)$. Следящая система, управляющая работой СТМ, сглаживает высокочастотную компоненту зависимости $\Delta I_e(t)$, а низкочастотная компонента $\overline{\Delta I_e(t)}$ системой обратной связи преобразуется в сигнал, который приводит к перемещению острия относительно поверхности образца на величину $\Delta Z_e(t)$. СТМ-изображение получается в результате сканирования во времени в плоскости X по закону $X(t)$. При этом на СТМ-изображении кроме сигнала, связанного с изменением свойств исследуемой поверхности $Z_{im}^{\circ}(X)$, появляется компонента $\Delta Z_e(X)$, которая и является в данном случае шумом СТМ-изображения. В силу экспоненциальной зависимости туннельного тока от расстояния (1) уровень шумов ΔZ_e связан с шумами в токе соотношением

$$\Delta Z_e = - (2k)^{-1} \overline{\Delta I_e} / I. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что если на поверхности имеются объекты с различной работой выхода Φ_1 и Φ_2 или, соответственно, с различными значениями k_1 и k_2 , то это приведет к различным уровням шумов ΔZ_{e1} и ΔZ_{e2} , причем $\Delta Z_{e1} / \Delta Z_{e2} = k_2 / k_1$. Таким образом, анализ шумов, в частности, изменения их амплитуды, позволяет проводить сравнительный анализ электронных свойств различных участков поверхности без дополнительных спектроскопических исследований.

Кроме того, флуктуации тока ΔI_e приводят к шумам СТМ-изображения, которые зависят не только от электронных, но и от топографических особенностей поверхности. Оказывается, что эти шумы возрастают вблизи границ поверхностных неоднородностей. Это обусловлено тем, что, как показано в работе [4], вблизи границ топографических неоднородностей эффективная величина локальной работы выхода $\Phi_{эфф}$ и, соответственно, $k_{эфф}$, определяющая величину туннельного тока в выражении (1), испытывает заметное уменьшение (т.е. $k_{эфф} < k$), что должно приводить к увеличению шумов:

$$\Delta Z_e' = k_{эфф} / k \Delta Z_e.$$

Рассмотрим механизм формирования шумов СТМ-изображения, обусловленных вибрациями в системе острие-образец, которые представим в виде двух компонент: перпендикулярной плоскости сканирования ΔSz и параллельной этой плоскости ΔSx . Такое представление удобно, так как для однородного участка поверхности вибрации в направлении X не будут приводить к флуктуациям туннельного тока в силу зависимости (1). В этом случае, т.е. для однородного участка поверхности, вибрации $\Delta Sz(t)$ приводят к изменению туннельного тока:

$$\Delta I_z(t) = - 2k \Delta Sz(t) I.$$

Следящая система, управляющая работой СТМ, характеризуется передаточной функцией, зависящей от частоты f :

$$g(f) = -2kIW(f)/[1 + 2kIW(f)],$$

где $W(f)$ - коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи. Передаточная функция $g(f)$ устанавливает связь между сигналом на входе следящей системы, которым является изменение расстояния между острием и поверхностью ΔS , с управляющим сигналом, вызывающим перемещение острия ΔZ вдоль направления Z . Если $\Delta S(f)$ и $\Delta Z(f)$ являются Фурье-образами перемещений $\Delta S(t)$ и $\Delta Z(t)$, соответственно, то $\Delta Z(f) = g(f)\Delta S(f)$. В области рабочих частот СТМ ($f < 10^3 - 10^4$ Гц) и при значениях работы выхода, когда может быть обеспечено нормальное функционирование СТМ ($\Phi \gg k_B T$ или $\Phi > 0.1$ эВ при $T \sim 300$ К), оказывается, что $2kIW(f) \gg 1$ и $g(f)$ не зависит от работы выхода Φ . Таким образом, следящая система обрабатывает изменение тока, связанное с вибрациями ΔS_Z , а на СТМ-изображении появляются дополнительные шумы ΔZ_Z , характеризующие перемещение острия вдоль направления Z , вызванное вибрациями в направлении Z , причём

$$\Delta Z_Z = \Delta S_Z,$$

т.е. в этом случае отсутствует зависимость амплитуды шумов от величины работы выхода Φ . Строго говоря, при уменьшении величины k на порядок (т.е. работы выхода Φ в 100 раз) возможен выход за пределы рабочей полосы частот следящей системы, что приведет к ее самовозбуждению и резкому увеличению шумов СТМ-изображения. Однако в таких условиях нормальное функционирование СТМ становится невозможным.

Таким образом, вибрации в направлении, перпендикулярном плоскости сканирования, приводят к шумам СТМ-изображения, амплитуда которых не изменяется при изменении электронных свойств исследуемой поверхности, в отличие от рассмотренных выше шумов, связанных с флуктуациями тока ΔI_e .

Что касается вибраций в направлении, параллельном плоскости сканирования ΔS_X , то они начинают проявляться вблизи границ различных поверхностных неоднородностей. Изменение туннельного тока в зависимости от координаты X обусловлено изменением рельефа поверхности и пространственными изменениями электронных свойств, что проявляется как изменение рельефа поверхности и пространственными изменениями электронных свойств, что проявляется как изменение рельефа на СТМ-изображении $Z_{im}(X)$, и поэтому они связаны соотношением

$$|dI/dX|/I = 2k|dZ_{im}/dX|.$$

При возрастании dI/dx появляется флуктуирующая компонента туннельного тока $\Delta I_X = \Delta S_X dI/dx$, которая вынуждает следящую систему СТМ реагировать путем изменения координаты Z .

В результате для шумов СТМ-изображения, связанных с вибрациями, можно приближенно записать:

$$\Delta Z_V = \Delta Z_Z + |dZ_{im}^0(X)/dX| \Delta Z_X.$$

Величина перемещения острия ΔZ_X вдоль направления Z , вызванного вибрациями в направлении X , формируется следящей системой из вибраций ΔS_X аналогично формированию перемещения ΔZ_Z из ΔS_Z .

Итак, можно сделать вывод, что шумы СТМ-изображения возрастают вблизи границ поверхностных неоднородностей, причем это относится к шумам, связанным как с вибрациями, так и с флуктуациями туннельного тока.

Заметим, что вблизи неоднородностей исследуемой поверхности из-за более резкого характера зависимости туннельного тока от переменных X и Z и, соответственно, от времени, при перерегулировании следящей системы может возникнуть возбуждение в цепи обратной связи. На СТМ-изображении это также проявится, как увеличение шумов вблизи границ поверхностных неоднородностей.

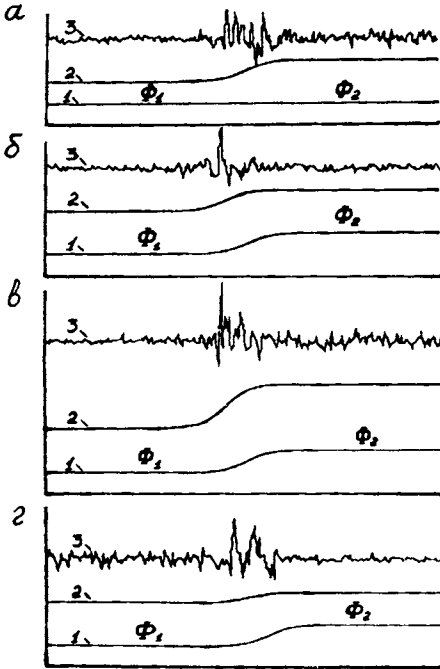


Рис. 1. Качественная зависимость шумов СТМ-изображения от характеристик поверхности: $a - \Phi_1 > \Phi_2$; $б - \Phi_1 = \Phi_2$; $в - \Phi_1 > \Phi_2$; $г - \Phi_1 < \Phi_2$. 1 — рельеф поверхности; 2 — СТМ-изображение $Z_{im}(X)$; 3 — шумы СТМ-изображения $\Delta Z(X)$

ефа поверхности или связаны также и с изменением величины локальной работы выхода (см. рис. 1, $в$, $г$). Заметим, что эта информация может быть получена при анализе шумов без привлечения дополнительных спектроскопических измерений.

Прежде чем перейти к анализу экспериментальных данных, обсудим метод построения пространственной характеристики (карты) шумов СТМ-изображения. Строго говоря, если регистрировать зависимость $Z(t)$ в каждой пространственной точке, то можно было бы точно построить величину шумов:

Для полноты картины следует отметить, что изменение характеристик шумов СТМ-изображения может быть вызвано и другими свойствами исследуемой поверхности. Так, например, если какой-либо участок поверхности содержит большое количество примесей, то здесь могут усилиться шумы СТМ-изображения, обусловленные шумами туннельного тока. Качественно это можно объяснить, если, например, предположить, что хаотическое распределение примесей на поверхности эквивалентно хаотическому характеру распределения локальной работы выхода.

Результаты проведенного анализа качественно можно сформулировать следующим образом (рис. 1). Вблизи границ поверхностных неоднородностей, связанных с изменением как рельефа, так и спектроскопических характеристик поверхности наблюдается увеличение шумов СТМ-изображения, что позволяет более четко "оконтурить", т.е. определить границы этих неоднородностей. Сопоставление СТМ-изображения и соответствующей ему пространственной зависимости амплитуды шумов позволяет определить, обусловлены ли перепады высот, наблюдаемые на СТМ-изображении, изменением рельефа

$$\Delta Z(t) = Z(t) - \bar{Z}(t),$$

и, соответственно, $\Delta Z(X)$. Однако экспериментальные данные представляются в виде СТМ-изображения $Z_{im}(X)$. В зависимости от времени измерения, частоты сканирования и частотной характеристики шумов временные шумы $\Delta Z(t)$ могут по-разному проявляться на пространственной зависимости $Z_{im}(X)$. Тем не менее обсуждаемые нами особенности поведения шумов в зависимости от спектроскопических и топографических характеристик поверхности сохраняются, если использовать метод построения карты шумов СТМ-изображения путем математической процедуры пространственного усреднения исходных данных эксперимента $Z_{im}(X)$:

$$\Delta Z(X) = |Z_{im}(X) - \bar{Z}_{im}(X)|,$$

где $\bar{Z}_{im}(X)$ — сглаженное СТМ-изображение. В этом случае вблизи областей сильного изменения $Z_{im}^{\circ}(X)$ возникает искажение

$$\delta Z = |d^2 Z_{im}^{\circ}(X) / dX^2| (\delta X)^2,$$

где δX - шаг измерения СТМ-изображения в X -плоскости. Такой способ можно использовать для оконтуривания топографических неоднородностей и при отсутствии шумов. Однако следует отметить, что амплитуда шумов СТМ-изображения вблизи границ неоднородностей пропорциональна первой производной изменения рельефа $|dZ_{im}^{\circ}/dx|$, что обеспечивает более высокую чувствительность этого механизма оконтуривания, особенно в случае слабого изменения рельефа. В целом можно заключить, что такая процедура позволяет более точно идентифицировать области, где имеются топографические неоднородности, с целью их детальной визуализации. Из рис. 2 видно, что такой метод действительно дает четкое оконтуривание границ кластеров, причем видны даже границы тех объектов, которые непосредственно на СТМ-изображении в стандартном представлении трудно обнаружить. Площадь сканирования $3000 \times 3000 \text{ \AA}$, изменение рельефа СТМ-изображения $Z_{im}(X)$ в пределах $0-33.6 \text{ \AA}$ (а, б), изменение амплитуды шумов $\Delta Z(X)$ в пределах $0-1.1 \text{ \AA}$ (в), шкала линейная, более светлым областям соответствуют большие значения величин.

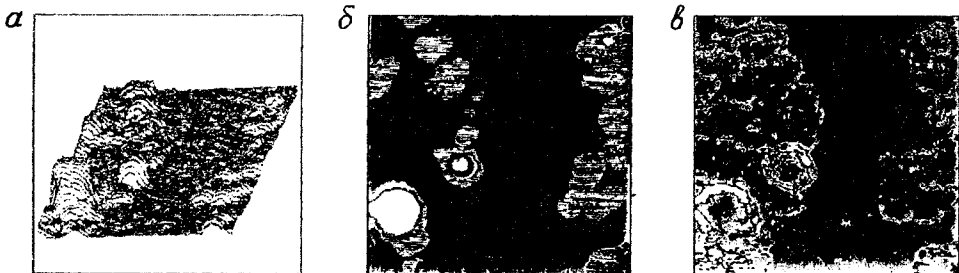


Рис. 2. СТМ-изображение кластеров Au на поверхности графита (а, б) и карта шумов этого изображения (в)

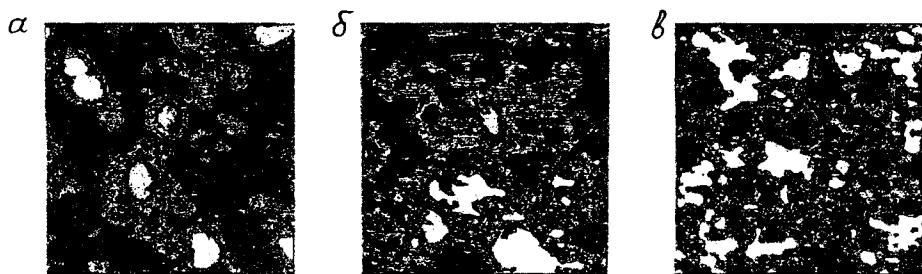


Рис.3. СТМ-изображение кластеров Si на поверхности GaAs (а), пространственное распределение локальной работы выхода для того же участка поверхности (б) и карта шумов СТМ-изображения (в)

Сравним теперь данные по измерению локальной работы выхода с картой шумов СТМ-изображения (рис. 3). Площадь сканирования $1000 \times 1000 \text{ \AA}$, изменение рельефа СТМ-изображения $Z_{im}(X)$ в пределах $0-48 \text{ \AA}$ (а), изменение значений работы выхода в пределах $0.06-0.30 \text{ эВ}$ (б), изменение амплитуды шумов $\Delta Z_{im}(X)$ в пределах $0-4.6 \text{ \AA}$ (в), шкала линейная, более светлым областям соответствуют большие значения величин. Видно, что имеется корреляция между этими данными: областям с низкими значениями работы выхода (им соответствует черный цвет на рис. 3, б) соответствуют области с более высоким уровнем шумов (белого или серого цвета на рис. 3, в), а областям с большими значениями Φ (белого цвета на рис. 3, б) соответствуют области с более низким уровнем шумов (черный или серый цвет на рис. 3, в). Заметим, что практически полностью отсутствует совпадение областей черного и белого цвета на рис. 3, б с областями того же цвета на рис. 3, в.

Таким образом; можно сделать вывод, что представленные на рис. 2, 3 данные подтверждают результаты проведенного анализа (см. рис. 1).

В заключение отметим, что использование рассмотренного в статье метода является простым, эффективным и надежным способом первичного анализа данных СТМ-эксперимента. Он может быть применен как в процессе эксперимента, так и при последующем анализе данных.

Авторы выражают благодарность Давыдову Д.Н. за помощь при проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hansma P., Tersoff J. // J. Appl. Phys. - 1987. - V.61, No 2. - P. R1.
2. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Тимофеев В.А., Тупицев С.Я. // Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. - 1989. - С. 72
3. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Нахабцев Д.В. // Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. - 1989. - С. 77
4. Голубок А.О., Тарасов Н.А. // Письма в ЖТФ. - 1990. - Т.16. - В.11. - С. 41.