

# ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПОРЯДОЧЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР НА СКАНИРУЮЩЕМ ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

Р.В.Лапшин, В.Н.Рябокоть, А.В.Денисов

## 1. Введение

Являясь на сегодняшний день наиболее совершенным инструментом исследования поверхности вещества в атомном масштабе, сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) тем не менее обладает определенными ограничениями, к которым, прежде всего, следует отнести различные виды искажений, присутствующие в получаемых данных.

К основным источникам таких искажений можно отнести: термодрейф механической и электронной частей микроскопа [1,2], неизвестные коэффициенты чувствительности пьезокерамики [2,3], гистерезис [1,4,5], явление ползучести пьезоманипуляторов [1,6], их взаимная неортогональность [2,4,7] и паразитное влияние друг на друга во время работы, установочный наклон образца и локальный наклон на поверхности [2], несовершенная геометрия иглы [4,8], некоторые нежелательные эффекты ее взаимодействия с поверхностью [4], а также процессы деградации пьезокерамики во времени и изменение ее свойств в зависимости от условий работы, что требует периодической перекалибровки микроскопа.

Наличие искажений снижает степень достоверности получаемых данных и нередко является причиной появления артефактов, а также ограничивает точность проводимых измерений. Все это приводит к неправильной интерпретации результатов эксперимента и сужает область применения микроскопа.

Предметом рассмотрения данной работы является неортогональность между X и Y пьезоманипуляторами СТМ и связанные с ней вопросы исправления изображения и калибровки микроскопа.

Идея предлагаемого метода заключается в поиске параметров для линейной трансформации искаженного изображения с априорно известной структурой, например, высоко ориентированного пиролитического графита (ВОПГ), приводящей к получению правильного изображения. Используя затем найденные параметры, производятся те же манипуляции, но уже над изображениями, структура которых заранее неизвестна. Таким образом, в описываемом методе атомы на поверхности ВОПГ и образуемая ими геометрическая структура выступают в качестве пространственно-геометрического эталона.

## 2. Описание метода

### 2.1. Определение угла косости и калибровочных коэффициентов

Прежде чем начать описание метода, следует отметить то, что рассматриваемый нами тип искажений изображения (ни углы, ни расстояния не сохраняются) возникает в момент вывода исходного неискаженного изображения, полученного сканированием в косоугольной системе координат хоу, связанной с пьезоманипуляторами X и Y СТМ, на экран монитора, где система координат хоу - прямоугольная. Другими словами, мы строим изображение без каких-

либо преобразований так, как будто оси этих систем координат совпадают, но на самом деле они отличаются друг от друга на величину угла косости, в результате чего и появляются искажения.

Для определения трех неизвестных величин - коэффициентов

усиления  $\bar{K}_x$ ,  $\bar{K}_y$  по осям X, Y манипуляторов микроскопа и угла косости  $\alpha$  необходимо построить систему из трех уравнений, для чего в общем случае достаточно знать латеральные координаты шести атомов калибровочной поверхности, образующих три различных отрезка (длины отрезков кратны периодам решетки).

Перед тем, как приступить к составлению уравнений, необходимо отметить, что теорема Пифагора в косоугольной системе координат  $\bar{x}_0\bar{y}_0$  не выполняется. Поэтому для дальнейших построений будем использовать следующие преобразования координат из косоугольной системы в экранную прямоугольную

$$x = \bar{x} + \bar{y} \sin \alpha, \quad (1)$$

$$y = \bar{y} \cos \alpha.$$

С учетом калибровочных коэффициентов  $\bar{K}_x$ ,  $\bar{K}_y$  манипуляторов преобразование (1) принимает вид

$$x = \bar{K}_x \bar{x} + \bar{K}_y \bar{y} \sin \alpha, \quad (2)$$

$$y = \bar{K}_y \bar{y} \cos \alpha$$

Для любых трех отрезков  $[A_0B_0]$ ,  $[C_0D_0]$ ,  $[E_0F_0]$ , образованных атомами калибровочной поверхности, можно записать следующие равенства

$$\begin{aligned} (x_{A_0} - x_{B_0})^2 + (y_{A_0} - y_{B_0})^2 &= (k_1 \alpha_1)^2 \\ (x_{C_0} - x_{D_0})^2 + (y_{C_0} - y_{D_0})^2 &= (k_2 \alpha_2)^2 \\ (x_{E_0} - x_{F_0})^2 + (y_{E_0} - y_{F_0})^2 &= (k_3 \alpha_3)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - периоды решетки;  $k_1, k_2, k_3$  - коэффициенты кратности.

Подставляя выражения (2), записанные для точек  $A_0, B_0, \dots, F_0$  в уравнения (3), после несложных преобразований получаем

$$\begin{aligned} \bar{K}_x^2 \bar{x}_{A_0 B_0}^2 + 2 \bar{K}_x \bar{K}_y \bar{x}_{A_0 B_0} \bar{y}_{A_0 B_0} \sin \alpha + \bar{K}_y^2 \bar{y}_{A_0 B_0}^2 &= k_1^2 \alpha_1^2, \\ \bar{K}_x^2 \bar{x}_{C_0 D_0}^2 + 2 \bar{K}_x \bar{K}_y \bar{x}_{C_0 D_0} \bar{y}_{C_0 D_0} \sin \alpha + \bar{K}_y^2 \bar{y}_{C_0 D_0}^2 &= k_2^2 \alpha_2^2, \\ \bar{K}_x^2 \bar{x}_{E_0 F_0}^2 + 2 \bar{K}_x \bar{K}_y \bar{x}_{E_0 F_0} \bar{y}_{E_0 F_0} \sin \alpha + \bar{K}_y^2 \bar{y}_{E_0 F_0}^2 &= k_3^2 \alpha_3^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где запись, например,  $\bar{x}_{A_0B_0}$  означает разность  $\bar{x}_{A_0} - \bar{x}_{B_0}$ , а  $\bar{y}_{A_0B_0} = \bar{y}_{A_0} - \bar{y}_{B_0}$  (то же и для других пар точек). Поскольку координаты  $\bar{x}_A = \bar{x}_{A_0}$ , а  $\bar{y}_A = \bar{y}_{A_0}$  (для остальных точек аналогично), то, заменив в (4)

обозначения координат  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  точек  $A_0, B_0, \dots, F_0$  на соответствующие обозначения координат  $x, y$  точек  $A, B, \dots, F$ , которые являются исходными данными в задаче отыскания угла косости, решаем систему из трех

трансцендентных уравнений с тремя неизвестными  $\bar{K}_x, \bar{K}_y, \alpha$  (для этого следует выразить  $\sin \alpha$  из любого уравнения и подставить его в оставшиеся; в результате образуется линейная система неоднородных

уравнений относительно переменных  $\bar{K}_{x2}, \bar{K}_{y2}$ , которая легко решается матричным способом), получаем

$$\bar{K}_x = \sqrt{G/H}, \quad (5)$$

$$\bar{K}_y = \sqrt{I/H}, \quad (6)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{k_1^2 \alpha_1^2 |H| - J^2 |G| - K^2 |I|}{2JK\sqrt{GI}} \quad (7)$$

где

$$G = k_1^2 \alpha_1^2 y_{CD} y_{EF} (x_{CD} y_{EF} - x_{EF} y_{CD}) - k_2^2 \alpha_2^2 y_{AB} y_{EF} (x_{AB} y_{EF} - x_{EF} y_{AB}) + k_3^2 \alpha_3^2 y_{AB} y_{CD} (x_{AB} y_{CD} - x_{CD} y_{AB});$$

$$H = (x_{CD} y_{EF} - x_{EF} y_{CD})(x_{AB} y_{EF} - x_{EF} y_{AB})(x_{AB} y_{CD} - x_{CD} y_{AB});$$

$$I = k_1^2 a_1^2 x_{CD} x_{EF} (x_{CD} y_{EF} - x_{EF} y_{CD}) - k_2^2 a_2^2 x_{AB} x_{EF} (x_{AB} y_{EF} - x_{EF} y_{AB}) + k_3^2 a_3^2 x_{AB} x_{CD} (x_{AB} y_{CD} - x_{CD} y_{AB});$$

$$J = x_{AB}; \quad K = y_{AB}.$$

Отметим, что коэффициенты  $\bar{K}_x, \bar{K}_y$  и угол косости  $\alpha$  полностью выражаются через экранные координаты, вернее, через их разности. Анализ действий, приведших к этим формулам, показывает, что косость манипуляторов и калибровочные коэффициенты - это величины, связанные друг с другом, и, следовательно, измерения, проводимые на микроскопах, в которых косость присутствует, но никак не учитывается, содержат погрешности, а сами микроскопы возможно откалиброваны с ошибкой.

Так, в практике измерений упорядоченных поверхностных структур, проводимых по СТМ изображениям, наиболее часто приходится определять постоянные решетки и углы между направлениями. Поэтому, если в качестве характерного элемента изображения выбрать отрезок, то его искажения, вызванные неортогональностью сканера, можно подразделить на искажения, связанные с изменением его длины в ориентации.

Анализируя эти искажения, можно сделать вывод о том, что их характер таков, что отрезки, расположенные параллельно осям манипуляторов или осям координат на экране, не претерпевают искажения длины. Поэтому, обычно используемый способ калибровки микроскопа [2,3] ориентированием отрезка меры параллельно осям работает и дает правильные результаты, хотя, практически, не очень удобен, так как требует поворота образца. Следует иметь ввиду, что отрезки, ориентированные в других направлениях, искажены, причем, степень искажения зависит от самого направления.

Далее в качестве калибровочной поверхности будем использовать поверхности ВОПГ, для которой расстояния между  $\beta$ -атомами [9] одинаковы  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha$  и равны  $2.46\text{\AA}$ . Для определенности, частный случай, когда  $k_1=k_2=k_3=k=2,4,8,\dots$ , а сами отрезки мер расположены так, что их середины пересекаются в одной точке, а концы образуют правильный шестиугольник, будем называть схемой “звезда”, для которой формулы (5)-(7) принимают вид

$$\bar{K}_x = k\alpha\sqrt{G/H}, \quad (8)$$

$$\bar{K}_y = k\alpha\sqrt{I/H}, \quad (9)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{|H|-J^2|G|-K^2|I|}{2JK\sqrt{GI}}, \quad (10)$$

где  $G=y_{CD}y_{EF}(x_{CD}y_{EF}-x_{EF}y_{CD})-y_{AB}y_{EF}(x_{AB}y_{EF}-x_{EF}y_{AB})+y_{AB}y_{CD}(x_{AB}y_{CD}-x_{CD}y_{AB})$ ;  
 $I=x_{CD}x_{EF}(x_{CD}y_{EF}-x_{EF}y_{CD})-x_{AB}x_{EF}(x_{AB}y_{EF}-x_{EF}y_{AB})+x_{AB}x_{CD}(x_{AB}y_{CD}-x_{CD}y_{AB})$ .

Покажем теперь, что для определения угла косости можно обойтись и без меры  $\alpha$ , используя свойство равенства лучей звезды, то есть

$$x_{A_0B_0}^2 + y_{A_0B_0}^2 = x_{C_0D_0}^2 + y_{C_0D_0}^2 = x_{E_0F_0}^2 + y_{E_0F_0}^2 \quad (11)$$

Из равенств (11) можно составить только два независимых уравнения, например

$$x_{A_0B_0}^2 + y_{A_0B_0}^2 = x_{C_0D_0}^2 + y_{C_0D_0}^2, \quad (12)$$

$$x_{A_0B_0}^2 + y_{A_0B_0}^2 = x_{E_0F_0}^2 + y_{E_0F_0}^2$$

Но переменных у нас три. Если разделить уравнение (6) на (5), то величины  $\alpha$  в обоих коэффициентах сокращаются, и отношение  $\bar{K}_y / \bar{K}_x$  уже не зависит от  $\alpha$ . Следовательно, вводя вместо коэффициентов

$\bar{K}_x, \bar{K}_y$  приведенные коэффициенты  $\bar{K}_x^*, \bar{K}_y^*$ , определяемые как

$$\bar{K}_x^* = \bar{K}_x / \bar{K}_x = 1, \quad (13)$$

$$\bar{K}_y^* = \bar{K}_y / \bar{K}_x,$$

преобразования (2) можно записать в виде

$$x = x + \bar{K}_y^* y \sin\alpha, \quad (14)$$

$$y = \bar{K}_y^* y \cos\alpha.$$

Далее подставляя выражения (14) в выражения (12) и решая

систему относительно переменных  $\bar{K}_y^*, \alpha$ , получаем

$$\bar{K}_y^* = \sqrt{I/G}, \quad (15)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{L|G|+M|I|}{2N\sqrt{GI}} \quad (16)$$

где  $L=x_{AB}^2 - x_{CD}^2$ ;  $M=y_{AB}^2 - y_{CD}^2$ ;  $N=x_{CD}y_{CD} - x_{AB}y_{AB}$ .

Таким образом, при использовании приведенных калибровочных коэффициентов достаточно выполнить калибровку одного из манипуляторов микроскопа обычным способом, а калибровочный коэффициент для другого определить по формулам (13), предварительно вычислив значение приведенного коэффициента по формуле (15).

Рассмотрим теперь еще один частный случай, когда исходная калибровочная структура представляет собой равносторонний треугольник  $A_0B_0C_0$  ( $k=1,2,3,\dots$ ). Легко видеть, что формулы для вычисления калибровочных коэффициентов и угла косости по схеме "треугольник" имеют такой же вид, что и (8)-(10), (15), (16), выведенные ранее для звезды, в которых вместо прежних индексов CD, EF следует использовать индексы BC, AC, соответственно.

*2.2. Чувствительность угла косости и калибровочных коэффициентов к погрешностям в координатах исходных данных. Сравнение схем треугольника и звезды*

Определим чувствительность метода к погрешностям, с которыми измерены положения атомов, являющиеся исходными данными для схем треугольника и звезды. Поскольку калибровочные коэффициенты  $K_x, K_y$  и угол косости  $\alpha$  определяются не в ходе измерений, а вычисляются по формулам, то для оценки содержащейся в них погрешности  $\Delta K_x, \Delta K_y$  и  $\Delta \alpha$ , соответственно, следует вычислить (приблизительно) полные дифференциалы этих функций, то есть

$$\Delta \bar{K}_x = \frac{\partial \bar{K}_x}{\partial x_A} \Delta x_A + \frac{\partial \bar{K}_x}{\partial x_B} \Delta x_B + \dots + \frac{\partial \bar{K}_x}{\partial x_F} \Delta x_F + \frac{\partial \bar{K}_x}{\partial y_A} \Delta y_A + \frac{\partial \bar{K}_x}{\partial y_B} \Delta y_B + \dots + \frac{\partial \bar{K}_x}{\partial y_F} \Delta y_F, \quad (17)$$

$$\Delta \bar{K}_y = \frac{\partial \bar{K}_y}{\partial x_A} \Delta x_A + \frac{\partial \bar{K}_y}{\partial x_B} \Delta x_B + \dots + \frac{\partial \bar{K}_y}{\partial x_F} \Delta x_F + \frac{\partial \bar{K}_y}{\partial y_A} \Delta y_A + \frac{\partial \bar{K}_y}{\partial y_B} \Delta y_B + \dots + \frac{\partial \bar{K}_y}{\partial y_F} \Delta y_F, \quad (18)$$

$$\Delta \alpha = \frac{\partial \alpha}{\partial x_A} \Delta x_A + \frac{\partial \alpha}{\partial x_B} \Delta x_B + \dots + \frac{\partial \alpha}{\partial x_F} \Delta x_F + \frac{\partial \alpha}{\partial y_A} \Delta y_A + \frac{\partial \alpha}{\partial y_B} \Delta y_B + \dots + \frac{\partial \alpha}{\partial y_F} \Delta y_F, \quad (19)$$

где в качестве переменных выступают координаты центров атомов  $x_A, \dots, x_F, y_A, \dots, y_F$ , измеренные с погрешностями  $\Delta x_A, \dots, \Delta x_F, \Delta y_A, \dots, \Delta y_F$ , соответственно. Формулы (17)-(19) предназначены для вычисления методических погрешностей схемы звезда, отбросив члены, имеющие

индексы D, E, F, и, используя соответствующие выражения для  $\bar{K}_x, \bar{K}_y$  и  $\alpha$ , можно получить формулы для определения погрешностей схемы треугольник.

Для простоты, положим, что все погрешности в координатах центров атомов равны  $\Delta$  по абсолютной величине. Для численных оценок примем величину  $\Delta$ , по крайней мере, на порядок [1] меньшую, чем латеральное разрешение микроскопа, которое составляет  $\sim 1\text{\AA}$ , что соответствует максимальной относительной погрешности измерения длины используемой нами постоянной решетки графита в  $\approx 8\%$ .

Анализ формул (17)-(19) показывает, что калибровочные коэффициенты и угол косости, определенные по схеме треугольник, имеют меньшую методическую погрешность, чем те, что получены по схеме звезда.

При величине погрешности  $\Delta=0.1\text{\AA}$  ( $k=2$ ,  $-15^\circ \leq \alpha \leq +15^\circ$ ) методическая погрешность  $\Delta\alpha$ , оцениваемая для наихудшего случая, лежит в диапазоне  $4.8^\circ$ - $5.2^\circ$ . Поэтому предложенный метод не позволяет точно определять малые углы косости, если уровень шумов в микроскопе высок. Так, например, при погрешности определения центра атома  $\Delta$  порядка  $0.01\text{\AA}$  относительная погрешность измерения линейного отрезка не превышает 1%, а погрешность угла косости -  $1^\circ$ .

### 2.3. Процедура исправления косости изображения

Для того чтобы исправить перекошенное изображение, данные, полученные в ходе сканирования поверхности, следует подвергнуть преобразованию (2). Поскольку это преобразование является линейным, то преобразование, обратное к нему также, является линейным. А это значит, что искажения изображения, вызванные остаточной неортогональностью сканера, относятся к классу линейных искажений.

Так как после выполнения коррекции, исправленное изображение представляет собой параллелограмм со сторонами  $\bar{K}_x \bar{x}_{img}$ ,  $\bar{K}_y \bar{y}_{img}$  ( $\bar{x}_{img}$ ,  $\bar{y}_{img}$  - число точек в изображении по соответствующим осям), то для получения привычной прямоугольной картинки его приходится обрезать. Таким образом, процедура исправления фактически сводится к сдвигу каждой строки исходного изображения на величину

$\bar{K}_y (\bar{y}_{img} - \bar{y}) \sin \alpha$  влево (задвигаемые значения теряются), отбрасыванию части строки справа так, чтобы длина оставшейся части равнялась

$\bar{K}_x \bar{x}_{img} - \bar{K}_y \bar{y}_{img} \sin \alpha$ , а также вычислению новой координаты к строки по

формуле  $\bar{K}_y \bar{y} \cos \alpha$ .

Следует обратить внимание на то, что в результате вычисления угла косости  $\alpha$  по формулам (7), (10) или (16) могут быть получены как положительные, так и отрицательные значения, показывающие, что он тупой. Поэтому в зависимости от знака угла косости процедуры исправления изображения для манипуляторов с острым и тупым координатным углом будут отличаться друг от друга направлением сдвига данных в строке.



### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Исправление косости изображения на примере графита

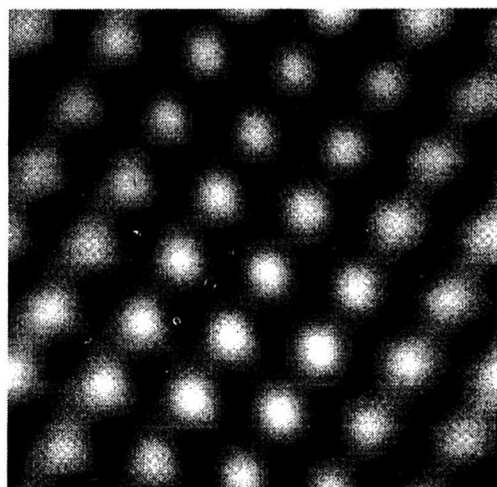
На рис.1а показано изображение поверхности ВОПГ с удаленным трендом, подвергнутое Фурье-фильтрации, по которому, используя схему треугольник, вычислены усредненные калибровочные коэффициенты

$\bar{K}_x=1.081$ ,  $\bar{K}_y=1.160$  и усредненный угол косости  $\alpha=-14.385^\circ$  (усреднение проведено по пяти треугольникам). На рис.1б показано исправленное изображение.

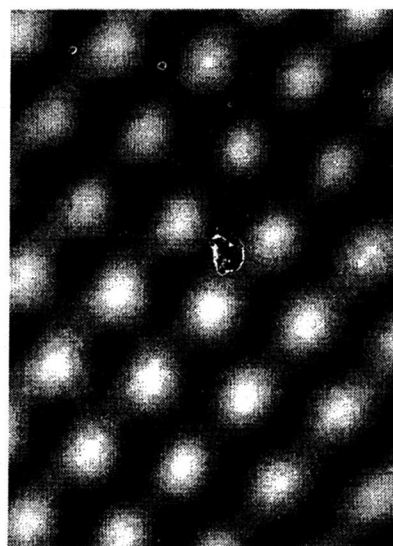
В настоящее время проводятся эксперименты (на воздухе) по изучению свойств атомарно-гладких пленок \*)  $\text{MePhSiCl}_2$ ,  $\text{VOCl}_3$ ,  $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{PCl}_3$ ,  $\text{TiCl}_4$  и др., осажденных на графите и представляющих собой упорядоченные структуры, изготовленные методом молекулярного наслаивания [10-12]. Поскольку в отсутствии вакуума невозможно получение надежных спектроскопических данных, то для анализа исследуемых структур особое значение приобретает “правильность” топографии поверхности. Поэтому большое внимание уделяется выявлению и компенсации систематических погрешностей, а также поиску надежных процедур калибровки инструмента. Одной из частей этой работы является метод, предложенный в настоящей публикации.

#### 4. Заключение

Неортогональность манипуляторов СТМ приводит к систематическим искажениям изображения и может быть отнесена к группе статических искажающих факторов [2,7]. Неортогональность является уникальной для каждого конкретного манипулятора.



а)



б)

Рис.1 а) Исходное “перекошенное” изображение поверхности графита (128x128 пикселей). Измерения проведены в режиме постоянной высоты при  $U_{\text{тун}}=50\text{мВ}$ ,  $I_{\text{тун}}=160\text{пА}$ . б) Изображение поверхности после исправления.

\*) Часть образцов изготовлена в Санкт-Петербургском технологическом институте.

Одним из путей уменьшения величины неортогональности является путь совершенствования технологии изготовления пьезоманипуляторов СТМ, что отражается на стоимости последнего. В связи с этим предложенный метод позволяет избавиться от искажений, связанных с неортогональностью, не увеличивая стоимости микроскопа. Правда, при этом ему свойственна некоторая неэффективность, возникающая из-за того, что при выполнении коррекции часть просканированного изображения приходится отбрасывать.

Оказалось, что в смысле уменьшения методической ошибки схема треугольник является более предпочтительной, чем схема звезда, вдобавок для ее реализации требуется в два раза меньше исходных данных. Конечно, необходимо принять во внимание то, что вычисляемые значения калибровочных коэффициентов и угла косости чувствительны к шумам. Это обстоятельство ограничивает достигаемую методом точность определения этих величин.

Если изображение поверхности подвергается действию совокупности искажающих факторов систематического характера, то с помощью описанного метода возможно определение калибровочных коэффициентов и угла косости некоего гипотетического сканера. Тогда, используя процедуру исправления косости, можно частично откорректировать изображение, удалив из него линейные части искажений от всех этих факторов.

Авторы выражают благодарность С.Ю.Васильеву, А.В.Емельянову за советы и замечания, высказанные по статье.

#### Литература

1. Pohl D.W. Some design criteria in scanning tunneling microscopy, IBM Journal of Research and Development Vol.30, 1986, P.417
2. Yurov V.Yu., Klimov A.N. Scanning tunneling microscope calibration and reconstruction of real image: Drift and slope elimination, Review of Scientific Instruments Vol.65, 1994, P.1551
3. Poirier G.E., White J.M. Diffraction grating calibration of scanning tunneling microscope piezoscanners, Review of Scientific Instruments Vol.61, 1990, P.3917
4. Griffith J.E., Grigg D.A. Dimensional metrology with scanning probe microscopes, Journal Applied Physics Vol.74, 1993, P.83
5. Lapshin R.V. Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope, Review of Scientific Instruments Vol.66, 1995 P.4718
6. Stoll E.P. Restoration of STM images distorted by time - dependent piezo driver aftereffects, Ultramicroscopy Vol.42-44, 1992, P.1585
7. Carrara S., Facci P., Nicolini C. More information on the calibration of scanning stylus microscopes by two-dimensional fast Fourier-transform analysis, Review of Scientific Instruments Vol.65, 1994, P.2860
8. Snyder E.J., Eklund E.A., and Williams R.S. Effects of tip size and asymmetry on scanning tunneling microscope topographs, Surface Science Letters Vol.239, 1990, P.487
9. Tomnek D., Louie S.G., Mamin H.J., Abraham D.W., Thomson R.E., Ganz E., and Clarke J. Theory and observation of highly asymmetric atomic structure in scanning tunneling microscopy images of graphite, Physical Review Vol.B35,



1987, P.7790

10. Емельянов А.В., Егоркин В.В. О природе упорядоченных структур на поверхности кремния. Поверхность. Физика, химия, механика №1, 1988, С.94

11. Bashkin M.O., Bepalov V.A., Emelyanov A.V., Inkin V.N., Portnov S.M., Zimin A.V., Kharkevich S.L., Menshikov O.D. Surface modification of organic films deposited on graphite by the scanning tunneling microscope, Ultramicroscopy Vol.42-44, 1992, P.977

12. Дубровенский С.Д., Емельянов А.В., Зимин А.В., Инкин В.Н., Малков А.А., Малыгин А.А., Портнов С.М. Формирование поверхностных структур на графите в реакциях с галогенидами ванадия, титана, фосфора и хрома. Журнал прикладной химии Vol.65, 1992, С.2259

## **СИНТЕЗ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ТЕСТОВ ВНУТРИСХЕМНОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МИНИМУМА СИММЕТРИИ**

Г. В. Петрухнова

### **Введение**

Тестирование цифровых интегральных схем (ЦИС) - актуальная практическая и теоретическая задача. В настоящий момент отсутствует единый методологический подход к оценке качества тестов, отличающихся функциональным назначением и способом синтеза. Это не позволяет проводить формальную сравнительную оценку тестов и их взаимные преобразования с целью сокращения временных и материальных затрат на тестирование. Разработка единого методологического подхода открывает перспективу для систематизации и каталогизации уже существующих и вновь создаваемых тестов ЦИС.

В настоящее время наметилась тенденция оценки качества тестов функционального контроля на основе статистических данных о покрытии тестом константных неисправностей и коротких замыканий [1]. В статье предпринята попытка синтеза и анализа тестов, обнаруживающих эти неисправности. Данная задача актуальна на этапе серийного производства модулей средств вычислительной техники. Формализация базируется на элементах теорий классификации [2] и симметрии [3]. Такой выбор теоретического базиса основан на следующих утверждениях.

Утверждение 1. Сравнительный анализ эффективности различных тестов предполагает наличие некоторого обобщенного критерия качества и ранжирования тестов в порядке их предпочтительности. Это, в конечном счете, эквивалентно классификации тестов по количественному значению обобщенного критерия качества.

Утверждение 2. "Симметрия - это категория, обозначающая сохранение признаков "П" объекта "О" относительно изменений "И"[3]. Применительно к тестированию ЦИС можно утверждать, что оптимальная совокупность тестовых входных наборов на фиксированном временном интервале (или при фиксированном количестве тестовых