

щественно зависит от значений  $x_0$ ,  $x_1$  процесса в начале воздействия. На рис. 3 показано поле решений уравнения эволюции состояния одного из реальных объектов в катастрофическом состоянии [3]. При фактических начальных значениях  $x_0 = 1,736$ ,  $x_1 = 1,724$  и коэффициентах  $a = 1,509602$ ,  $b = -1,279645$ ,  $c = 0,065652$ ,  $d = 0,378055$  в (1) стабилизации не удалось достичь ни с одним из рассмотренных видов воздействий. Однако при замене начальных значений на  $x_0 = 0,736$ ,  $x_1 = 0,724$  стабилизация состоялась при фиксированном воздействии ( $y_0 = 1$ ,  $g = 0,3$ ). В реальных условиях постоянного контроля измеренных значений процесса такого результата можно было бы добиться выбором момента начала воздействия, поскольку на любом шаге  $k$  два соседних значения последовательности  $x_k$ ,  $x_{k+1}$  можно рассматривать как начальные для последующих шагов.

В заключение отметим, что, как показали эксперименты, одни и те же виды воздействий могут привести не только к стабилизации, но и дестабилизации в зависимости от состояния объекта и значения коэффициента воздействия. Предлагаемый метод позволяет решать задачи математического анализа динамических объектов, описываемых неоднородными нелинейными уравнениями, которые до сих пор не имеют аналитических методов решения.

## Литература

1. **Новоселов О. Н.** Идентификация состояния динамических объектов по измеряемым параметрам: от теории к практике // Измерительная техника. 2010. № 2. С. 20—24; **Novoselov O. N.** Identification of The State of Dynamic Objects From Measured Parameters. From Theory to Application // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 2. P. 142—148.
2. **Гусев Г. А., Гуфельд И. Л.** Сейсмический процесс в предельно энергонасыщенной геологической среде и прогноз землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 71—78.
3. **Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N.** Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2. Iss. 4. P. 378—415.
4. **Новоселов О. Н.** Идентификация и анализ динамических систем: монография. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса. 2010.
5. **Свид-во** об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2012614516 «AnDynSys» / А. В. Афанасьев, В. В. Афанасьева, О. Н. Новоселов (RU) // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2012. № 3 (80). С. 341.

Дата принятия 22.10.2012 г.

## НАНОМЕТРОЛОГИЯ

538.911

# Особенности применения упорядоченных пленок молекул фуллеренов для калибровки сканирующих туннельных микроскопов при измерении геометрических параметров объектов

**А. Ю. КУЗИН\*, П. А. ТОДУА\*, В. И. ПАНОВ\*\*, А. И. ОРЕШКИН\*\***

\* Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

\*\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: spm@spmlab.phys.msu.ru

*Продемонстрирована возможность использования упорядоченных пленок молекул фуллеренов в качестве эталонных объектов для калибровки сканирующих туннельных микроскопов.*

**Ключевые слова:** сканирующий туннельный микроскоп, фуллерен, калибровка, реконструкция кремния.

*The possibility of application of ordered films of fullerene molecules as reference samples for scanning tunnel microscope calibration has been demonstrated.*

**Key words:** scanning tunnel microscope, fullerene, calibration, silicon reconstruction.

Прогресс в развитии нанотехнологий требует обеспечения единства измерений в нанометровом диапазоне, а также разработки новых и усовершенствования существующих методов измерения характеристик материалов и диагнос-

тики процессов в низкоразмерных системах. Методы диагностики процессов, учитывающие специфику объектов нанометровой геометрии, являются неотъемлемой частью нанотехнологий. В этой связи представляется крайне важ-

ным получение информации о нанорельефе и локальных физико-химических свойствах нанообъектов с разрешением вплоть до атомного. Одним из наиболее современных методов, позволяющих выполнять подобные измерения, является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), которая включает, в частности, сканирующие туннельные микроскопию и спектроскопию [1], различные варианты сканирующей силовой микроскопии, например атомно-силовую микроскопию [2] и сканирующую оптическую микроскопию ближнего поля [3, 4]. Несмотря на то, что методы СЗМ интенсивно развиваются в последние годы, многие возможности этих методов до сих пор раскрыты не полностью. Нанотехнологии ставят новые измерительные задачи, направленные на углубление понимания процессов, лежащих в основе СЗМ, и их дальнейшее усовершенствование для диагностики наноструктур и метрологического обеспечения измерений в нанометровом диапазоне. Среди средств измерений СЗМ наилучшим разрешением обладают сканирующие туннельные микроскопы (СТМ), особенно эксплуатируемые в условиях сверхвысокого вакуума (СВВ) или при низких температурах. Первые СВВ СТМ занимают особое место, поскольку позволяют измерять как геометрические параметры поверхности объектов, так и их локальную туннельную проводимость, характеризующую распределение плотности электронных состояний  $\rho(x, y)$ . Однако при измерении геометрических параметров объектов с помощью СТМ, особенно в диапазоне от единиц до долей нанометра, возникают значительные погрешности вследствие зависимости туннельного тока микроскопа от локальной плотности состояний  $\rho(x, y)$  и ее изменений в области туннельного контакта за счет различных туннельных эффектов, а также из-за отсутствия эталонных мер для этого диапазона измерений. По этим причинам для калибровки СТМ в условиях СВВ или низких температур часто используют двумерные поверхностные структуры различных кристаллов, обладающих достаточной проводимостью для получения туннельного тока. Такие структуры обеспечивают высокую стабильность геометрических параметров на поверхности при получении изображений с применением СТМ (далее — СТМ-изображения) и могут служить для калибровки при измерении геометрических параметров объектов нанометровой геометрии. В [5] была рассмотрена возможность применения реконструированной поверхности кремния для калибровки СТМ при измерении геометрических параметров объектов [5]. Было показано, что реконструированная поверхность  $7 \times 7$ -Si(111) может использоваться в качестве эталонной меры для калибровки СВВ СТМ, поскольку ее параметры хорошо изучены различными методами, а изображение данной поверхности, полученное с применением этого микроскопа, в наименьшей степени зависит от параметров туннельного перехода. Вместе с тем имеются и другие возможности создания эталонных мер на основе поверхностных структур, с помощью которых можно осуществлять калибровку широкого спектра приборов зондовой микроскопии, включая СВВ СТМ. К таким поверхностным структурам относятся упорядоченные пленки фуллеренов и их модификаций [6–8], которые широко исследуют и в последние годы пытаются применять в молекулярной электронике. Вызвано это несколькими причинами. С одной стороны, фуллерены и их модификации являются

многообещающими кандидатами на пути создания электроактивных устройств в приложениях нанотехнологии и могут быть рассмотрены как конструктивные элементы этих устройств. С другой — фуллерены могут служить в качестве временных электронных акцепторов, эффективно расщепляющих экситоны и генерирующих носители заряда, а фторированные фуллерены могут применяться при создании новых материалов, обладающих свойствами широкозонных полупроводников и диэлектриков. Такой интерес к фуллеренам позволил развить методики приготовления пленок фуллеренов и их модификаций с надежно контролируемой упорядоченной поверхностной структурой. Такие структуры обладают высокой упорядоченностью и стабильностью геометрических параметров и могут быть использованы для создания эталонных мер в диапазоне от сотни единиц до десятых долей нанометра.

По этим причинам в настоящей работе рассмотрена возможность использования пленок фуллеренов с упорядоченной поверхностной структурой для целей калибровки СВВ СТМ при измерении геометрических параметров объектов нанометровой геометрии.

**Условия эксперимента.** В качестве образцов были взяты эпитаксиальные пленки молекул фуллеренов  $C_{60}$  на поверхности  $Vi(0001)$ - $(7 \times 7)$ - $Si(111)$  и молекулярные пленки молекул фторированных фуллеренов  $C_{60}F_{18}$  на поверхности  $(2 \times 1)$ - $Si(100)$ . В основу методики приготовления образцов на основе  $C_{60}$  положено создание сплошных однородных упорядоченных структур фуллеренов  $C_{60}$  на поверхности  $Vi(0001)$ - $(7 \times 7)$ - $Si(111)$ . Кристаллографический порядок в пленке фуллерена определяется балансом внутримолекулярного взаимодействия и взаимодействия между фуллереном и подложкой. Как правило, взаимодействие между поверхностью полупроводника и адсорбированной молекулой фуллерена значительно сильнее из-за высокой концентрации оборванных связей вблизи поверхности и может оказывать значительное влияние на морфологию тонких кристаллических пленок  $C_{60}$ . В случае использования металлических подложек электронное взаимодействие приводит к перемешиванию электронных состояний подложки с низшими незаполненными молекулярными орбиталями фуллеренов и тем самым к изменению электронной структуры монослоя  $C_{60}$ , а это, в свою очередь, приведет к упорядоченной поверхностной структуре. Одной из наилучших поверхностей для получения пленок  $C_{60}$  является структура

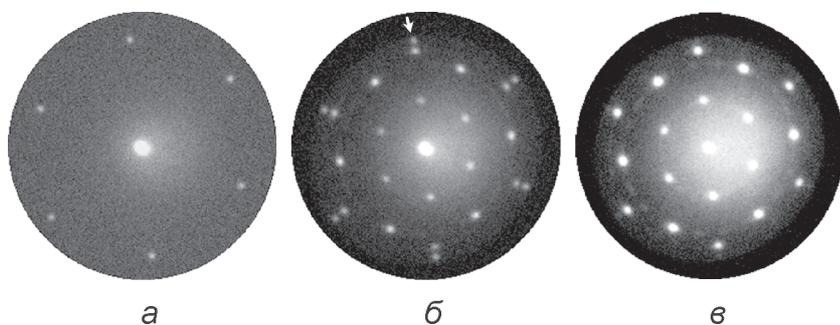


Рис. 1. Изображения, полученные при помощи дифрактометра медленных электронов в процессе роста  $C_{60}$  на поверхности  $Vi(0001)$  при 400 К и  $E = 14$  эВ:

а — чистая поверхность  $Vi$  перед нанесением  $C_{60}$ ; б, в — поверхность  $Vi$  после нанесения  $C_{60}$  толщиной 0,4 и 1,0 монослоя, соответственно; стрелкой показаны пятна, характеризующие структуру поверхности  $Vi$

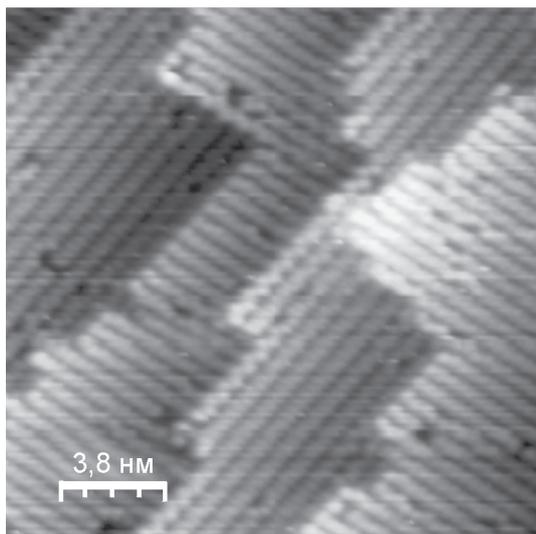


Рис. 2. Изображение чистой поверхности Si(100)-(2×1), полученное с использованием сканирующего туннельного микроскопа

Bi(0001)/Si(111), на которой может быть осуществлен рост высокоупорядоченных эпитаксиальных пленок C<sub>60</sub>. Процесс приготовления образцов таких пленок содержит три этапа. Первоначально на поверхности Si(111) формируется реконструкция 7×7-Si(111), подробно методика этого процесса описана в [5]. Вторым этапом является нанесение Bi на подготовленную поверхность 7×7-Si(111) с использованием ячейки Кнудсена, изготовленной из BN. Морфология поверхностной структуры изменяется при нанесении на поверхность 7×7-Si(111) слоя Bi. При покрытии порядка 7—8 монослоев начинается переход пленки из квазикубической {012} в гексагональную форму. Морфология полученной многослойной пленки улучшается после отжига образца при температуре 120 °С, на ней формируется поверхность Bi(0001). Последний этап состоит в нанесении пленок C<sub>60</sub> на подготовленную поверхность Bi(0001)-(7×7)-Si(111), при этом C<sub>60</sub> осаждается из ячеек, выполненных из Ta, при температуре подлож-

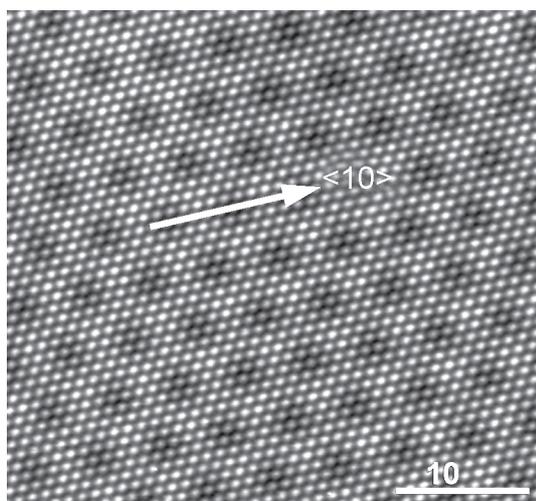


Рис. 3. Изображение монослоя C<sub>60</sub>, выращенного на поверхности Bi(0001), полученное при помощи сканирующего туннельного микроскопа

ки 400 К и давлении  $1,3 \cdot 10^{-8}$  Па ( $10^{-10}$  Торр). Скорость нанесения C<sub>60</sub> на поверхность составляет 0,05—0,10 монослоя в минуту. На STM-изображениях одного монослоя C<sub>60</sub> можно видеть высокую степень упорядоченности и однородности покрытия на масштабах в несколько сотен нанометров. Дополнительная модуляционная картина на этом изображении происходит от перекрытия кристаллических решеток Bi(0001) и C<sub>60</sub> и указывает на эпитаксиальное соотношение параметров элементарных ячеек Bi и C<sub>60</sub>, определяемых векторами  $\mathbf{a}_{C_{60}}$  и  $\mathbf{a}_{Bi}$ . Эксперименты с использованием СТМ и дифракции медленных электронов показывают, что  $5|\mathbf{a}_{C_{60}}| = 11|\mathbf{a}_{Bi}|$ . При этом вектор  $\mathbf{a}_{C_{60}}$  может быть направлен вдоль одного из трех эквивалентных направлений <10>, <01> и <-1-1> тригональной решетки Bi. Из дифракционной картины (рис. 1) субмонослойного покрытия C<sub>60</sub> следует, что направления векторов обратной решетки для решеток C<sub>60</sub> и Bi(0001) одинаковые. Этот факт свидетельствует, что монослой C<sub>60</sub> имеет эпитаксиальное соотношение с поверхностью Bi(0001). Видимые рефлексы, ответственные за дифракцию на C<sub>60</sub> и Bi, позволяют определить параметры элементарной ячейки C<sub>60</sub> в плоскости [7, 8], которые и используются для калибровки СТМ.

Методика приготовления образцов на основе молекулярных пленок фторированных фуллеренов C<sub>60</sub>F<sub>18</sub> на первом этапе заключается в создании поверхности (2×1)-Si(100). В качестве исходных образцов служат стандартные пассивированные SiO<sub>2</sub> пластины кремния. Для изготовления калибровочных мер использовали поверхность (100), которая должна иметь отклонение от плоскости не больше 0,5°. Лабораторные образцы размером 20×4×0,5 мм<sup>3</sup> вырезают из кремниевой пластины (100), допированной фосфором концентрацией  $8 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, толщиной 0,3—0,5 мм. При применении метода прогрева прямым током концентрация допирующих примесей должна быть в диапазоне  $10^{16} - 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

Инструмент, используемый при обращении с образцом, не должен содержать примеси Ni. Держатели образца и все элементы креплений изготавливаются из Mo или Ta и тщательно отжигаются в условиях СВВ до 900 °С перед установкой в них образца. Образец, закрепленный на держателе из молибдена, загружается в СВВ-систему СТМ через шлюзовую камеру. Первоначальную дегазацию образца и его держателя в манипуляторе точных перемещений СТМ внутри СВВ-камеры проводят методом резистивного прогрева ниже температуры свечения в течение нескольких часов. Окончание дегазации образца происходит при стабилизации давления в системе на уровне  $5 \cdot 10^{-8}$  Па. После этого образец прогревается в течение 12 ч методом прямого пропускания тока при температуре, достаточно низкой для удаления естественного природного оксида кремния (<600 °С). Давление в системе при этом должно быть не более  $2 \cdot 10^{-10}$  Па. При очень длительном времени дегазации и (или) высокой концентрации допирующих примесей на поверхности вероятно сегрегация допирующих атомов, что может приводить к разрушению поверхностных реконструкций. В этом случае следует сократить время этой процедуры до необходимого минимума. На следующем этапе осуществляют импульсный нагрев образца до 1250 °С кратковременным пропусканием через него тока. В процессе импульсного нагрева давление в системе не должно превышать  $1 \cdot 10^{-7}$  Па. При приближении давления к этому значению надо остановить протекание тока через образец, дождаться полного восстановления давления в системе и повторить процедуру. Альтерна-

тивный путь предполагает уменьшение силы тока с применением коротких импульсов до момента, когда станет возможным поддерживать температуру образца 1250 °С в течение 3 с. Последующее быстрое снижение температуры до 800 °С и затем равномерное снижение до комнатной температуры со скоростью порядка 2 °С/с приводит к появлению на поверхности Si реконструкции 2×1-Si(100), показанной на рис. 2.

Нанесение пленок C<sub>60</sub>F<sub>18</sub> на поверхность (2×1)-Si(100) проводится из ячеек, изготовленных из Ta при комнатной температуре и давлении 1,3 · 10<sup>-8</sup> Па. Скорость нанесения C<sub>60</sub> на поверхность 0,05—0,10 монослоя в минуту. Адсорбированная на поверхность (2×1)-Si(100) молекула C<sub>60</sub>F<sub>18</sub> расположена точно между двумя рядами димеров. Таким образом, можно утверждать, что участок поверхности между четырьмя димерами поверхности (2×1)-Si(100) является центром молекулярной адсорбции. В кристаллической решетке C<sub>60</sub>F<sub>18</sub> планарное верхнее кольцо ароматического углерода за счет сил Ван-дер-Ваальсового взаимодействия связано с нижней полусферой фуллера соседней цепочки с минимальным расстоянием между молекулами 9,4 Å, что приводит к устойчивости упорядоченной структуры. Даже при субмонослойном покрытии адсорбированные молекулы имеют явную тенденцию к спариванию. Кластеры спаренных молекул отчетливо разрешимы на СТМ-изображении, что позволяет использовать эти структуры, как и упорядоченные пленки молекул фуллеренов C<sub>60</sub>, для калибровки СТМ. Следовательно, эпитаксиальные пленки молекул фуллеренов являются примером упорядоченных поверхностных структур, для которых СТМ-изображения обеспечивают получение стабильной геометрической информации о расположении молекул и которые могут использоваться в качестве эталонных мер для калибровки СЗМ в нано- и субнанометровом диапазоне.

Измерения проводили на СВВ СТМ типа Omicron STM 1, предназначенных для измерения линейных размеров нанорельефа поверхности и туннельной проводимости ρ(x, y) твердотельных проводящих структур.

Основные технические характеристики измерительной системы микроскопа Omicron STM 1

Область сканирования манипулятора (в плоскости) . . . 1, 3×1,3 мкм  
 Диапазон измерений по вертикали . . . . . 0,7 мкм  
 Разрешение в плоскости . . . . . 0,01 нм  
 Вертикальное разрешение . . . . . 0,001 нм  
 Диапазоны  
 измеряемого туннельного тока . . . . . 10 пА — 10 нА  
 задаваемого напряжения смещения . . . . . 1 мВ — 4 В.

Важной составляющей СТМ-измерений является наличие проводящих зондирующих острий (электродов) малого радиуса (вплоть до одного атома) на конце, при помощи которых осуществляется сканирование поверхности образца. Для этого проводящие острия изготавливают из вольфрамовой проволоки диаметром около 0,2—0,3 мм путем электролитического травления с последующим отжигом в СВВ-камере СТМ при температуре порядка 2000 °С. Перед отжигом форма острий контролируется с применением электронного микроскопа. Такая процедура позволяет получить острия с радиусом конца атомного размера при отсутствии оксидного слоя, мешающего достигать атомного разреше-

ния СТМ. После приготовления образцов и острий выполняется рекомендованный в руководстве пользователя микроскопа подбор параметров туннельного перехода (значения силы постоянного туннельного тока и туннельного напряжения), а также скорости и размера поля сканирования и значения коэффициента усиления в цепи обратной связи, в зависимости от особенностей измеряемого образца. На следующем этапе оператор задает количество точек вдоль осей X, Y, в которых происходит регистрация сигнала (количество строк и столбцов в матрице топографических данных), количество измерений в каждой точке, по которым осуществляется усреднение, и значение шага сканирования, определяющее размер области сканирования. После чего проводится съемка микрорельефа поверхности в топографическом режиме работы СТМ.

**Результаты экспериментов.** При измерениях геометрических параметров поверхности при помощи СТМ использовали специальное программное обеспечение. Для обработки результатов измерений служили программы, предназначенные для обработки изображений, получаемых методами СЗМ. Одним из применяемых и калибруемых приборов являлся микроскоп Omicron STM 1 на базе СВВ аналитической системы MULTIPROBES. При этом СТМ-изображения получены в режиме постоянного туннельного тока при 10—20 пА и напряжениях смещения на туннельном контакте 1,5—2,5 В.

Результаты измерений модуляционной картины, видимой на СТМ-изображении монослоя фуллера C<sub>60</sub>, выращенного на поверхности Vi(0001)-(7×7)-Si(111), показаны на рис. 3. Здесь СТМ-изображение представляет бездефектный участок атомно-гладкой поверхности с периодически повторяющейся молекулярной структурой (светлые пятна). На фоне этой структуры хорошо заметна модуляционная картина, имеющая вид периодически расположенных темных пятен с ярко выраженным ромбическим порядком. Измерение периода модуляционной картины дает возможность с высокой точностью определить характерные расстояния в молекулярной пленке фуллеренов, что позволяет использовать ее в качестве эталонной меры при калибровке СТМ в плоскости XY. Результаты серии измерений периода модуляционной картины, видимой на СТМ-изображении монослоя фуллера C<sub>60</sub>, выращенного на поверхности Vi(0001)-(7×7)-Si(111), для удобства представлены в табличной форме (табл. 1).

Оценка математического ожидания периода модуляционной картины поверхности монослоя фуллера C<sub>60</sub> определяется ее средним арифметическим

$$\bar{l} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} l_i = 4,81 \text{ нм,}$$

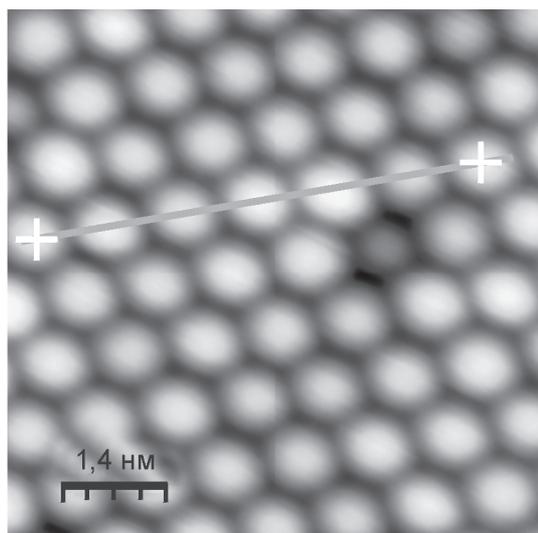
а точечная оценка среднего квадратического отклонения (СКО) результатов наблюдений будет

$$s_t = \sqrt{\frac{1}{20-1} \sum_{i=1}^{20} (l_i - \bar{l})^2} = 0,06 \text{ нм.}$$

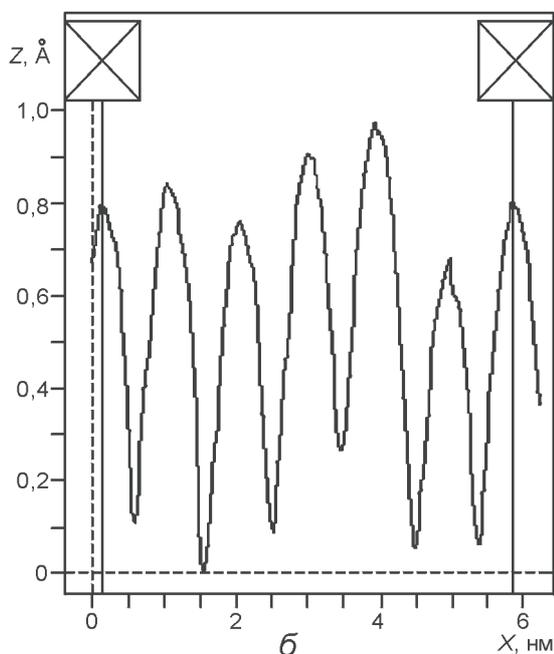
Таблица 1

Результаты серии измерений периода модуляционной картины на СТМ-изображении монослоя C<sub>60</sub>

l <sub>p</sub> , нм			
4,81	4,91	4,88	4,85
4,89	4,73	4,75	4,89
4,78	4,80	4,81	4,78
4,79	4,81	4,73	4,72
4,91	4,87	4,75	4,73



а



б

Рис. 4. Изображение высокого разрешения молекулярной пленки  $C_{60}F_{18}$  на поверхности  $(2 \times 1)$ -Si(100), полученное с использованием сканирующего туннельного микроскопа (а), и рельеф этого изображения вдоль линии (б); X, Z — координаты вдоль поверхности образца и перпендикулярно ей

При уровне доверительной вероятности  $P = 0,95$  по таблице Стьюдента для двадцати измерений находим  $t = 2,09$ . Абсолютная погрешность оценки периода модуляционной картины на поверхности  $C_{60}$ -Bi(0001)-(7×7)-Si(111) составляет  $\Delta l = s_t \cdot t = 0,13$  нм. Таким образом, истинное значение периода модуляционной картины с вероятностью 0,95 лежит в интервале 4,68—4,94 нм, а доверительная относительная погрешность не превышает 3 %.

Результаты СТМ-измерений параметров молекулярной пленки  $C_{60}F_{18}$  на поверхности  $(2 \times 1)$ -Si(100), которую также можно применять для калибровки СЗМ в латеральном направлении, показаны на рис. 4. Светлые пятна соответ-

ствуют молекулам  $C_{60}F_{18}$ , которые образуют плотную гексагональную упаковку на поверхности Si. Такое изображение рельефа поверхности вдоль выбранного направления позволяет определить период структуры молекулярной пленки  $C_{60}F_{18}$ . Результаты СТМ-измерений периода молекулярной пленки  $C_{60}F_{18}$ , выращенной на поверхности  $(2 \times 1)$ -Si(100), представлены в табл. 2.

Оценка математического ожидания межмолекулярного расстояния  $x_i$  в пленке  $C_{60}F_{18}$  на поверхности  $(2 \times 1)$ -Si(100) определяется средним арифметическим

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 0,94 \text{ нм,}$$

где  $N$  — число измерений.

Точечную оценку СКО результатов наблюдений находят как

$$s_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = 0,014 \text{ нм.}$$

Как указано выше, при  $P = 0,95$  имеем  $t = 2,09$  и абсолютную погрешность оценки межмолекулярного расстояния в пленке фторированного фуллерена  $C_{60}F_{18}$  на поверхности  $(2 \times 1)$ -Si(100)  $\Delta l = 0,03$  нм. Таким образом, истинное значение искомого межмолекулярного расстояния с вероятностью 0,95 лежит в интервале 0,91—0,97 нм, а доверительная относительная погрешность не превышает 3 %.

**Выводы.** Представленные в настоящей работе результаты исследований упорядоченных молекулярных пленок фуллеренов показали возможность их использования для калибровки сканирующих зондовых микроскопов высокого разрешения, применяемых при измерениях геометрических параметров объектов нано- и субнанометровых размеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.523.12.3005) с применением оборудования Центров коллективного пользования МГУ им. М. В. Ломоносова и НИЦПВ.

#### Литература

1. **Binnig G., Rohrer H.** Scanning tunneling microscopy // *Helv. Phys. Acta.* 1982. V. 55. N 6. P. 726—735.
2. **Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch.** Atomic force microscope // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. N 9. P. 930—933.
3. **Lewis A. e. a.** Scanning optical microscopy with 500 Å spatial resolution // *Biophys. J.* 1983. V. 41. P. 405a.
4. **Pohl D. W., Denk W., Lanz M.** Optical stethoscopy: image recording with resolution  $\lambda/20$  // *Appl. Phys. Lett.* 1984. V. 44. N 7. P. 651—653.
5. **Кузин А. Ю. и др.** Применение реконструированной поверхности кремния для калибровки сканирующих туннельных микроскопов // *Измерительная техника.* 2012. № 7. С. 26—29; **А. Ю. Кузин е. а.** Reconstructed silicon surfaces for calibration of scanning tunnel microscopes // *Measurement Techniques.* 2012. V. 55. N 7. P. 773—779.

Таблица 2

Значения периода молекулярной пленки  $C_{60}F_{18}$ , полученные при СТМ-измерениях

$l_p$ , нм			
0,94	0,93	0,93	0,96
0,97	0,95	0,95	0,93
0,93	0,93	0,94	0,93
0,96	0,95	0,95	0,92
0,95	0,93	0,94	0,96

6. **Sadowski J. T. e. a.** Stability of the quasicubic phase in the initial stage of the growth of bismuth films on Si(111)-7×7// J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 014904.

7. **Sadowski J. T. e. a.** Epitaxial C<sub>60</sub> thin films on Bi(0001) // Surface Sci. 2007. V. 601. P. L136—L139.

8. **Oreshkin A. I. e. a.** Formation of highly crystalline C<sub>60</sub> molecular films on Bi(0001)/Si(111) surface// JETP Lett. 2007. V. 86. N 8. P. 522—525.

9. **Oreshkin A. I. e. a.** STM/STS study of C<sub>60</sub>F<sub>36</sub> molecules adsorption on 7×7-Si(111) // JETP Lett. 2007. V. 85. N 1. P. 40—45.

Дата принятия 05.07.2012 г.

## ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.92.02:681.518.5

### **Оптико-механическая измерительная система контроля позиционных отклонений осей отверстий деталей**

**О. С. ЛОМОВА, С. М. ЛОМОВ**

Омский государственный технический университет, Омск, Россия, e-mail: 190567@mail.ru

*Рассмотрена оптико-механическая измерительная система контроля позиционных отклонений осей отверстий деталей малого диаметра, расположенных на цилиндрической поверхности. Система позволяет с высокими точностью и производительностью управлять процессом обработки отверстий.*

**Ключевые слова:** точность обработки, оптико-механическая измерительная система, контроль отклонения осей.

*The measuring system of the control of position deviation of the axes holes of small diameter details located on cylindrical surface is described. The optical-mechanical measuring system allows to control the processing of holes with high precision and productivity.*

**Key words:** processing accuracy, optical-mechanical measuring system, axes deviation control.

Современные машины и аппараты оснащены разнообразным оборудованием, при помощи которого осуществляются сложные технологические процессы. Заданный режим работы аппаратов достигается соблюдением характеристик, предписанных техническими условиями, путем обеспечения точности изготовления деталей и узлов механизмов и, как следствие, точности измерений размеров детали [1, 2].

В России выпускаются разнообразные гидроцилиндры, детали которых должны быть подвергнуты высокоточной обработке с соблюдением размеров, формы, а также расположения и малой шероховатости поверхностей. Для повышения качества продукции отечественные производители стремятся изготавливать основные детали (гильзы, золотники, корпус, поршни и т. д.) по 8-му качеству точности с полями допусков *H8* и *f8* [3].

В процессе обработки деталь измеряют несколько раз, поэтому производительность труда значительно зависит от времени, затрачиваемого на контроль. Если контроль диаметров наружных поверхностей деталей обычно не вызывает серьезных трудностей даже при использовании универсальных средств измерений (СИ), то диаметры отвер-

стий контролировать значительно сложнее — требуется более высокая квалификация обслуживающего персонала. При этом погрешности измерений внутренних поверхностей выше, чем наружных.

Детали устройств гидроагрегатов, как правило, на цилиндрических поверхностях имеют много пазов и отверстий небольшого диаметра. Точность размеров и расположения этих поверхностей ограничивается довольно жесткими позиционными допусками и допусками на линейные размеры. Поворот одной детали (гильзы или золотника) в корпусе гидроузла изменяет выходные характеристики всего устройства, поэтому от расположения перепускных каналов и отверстий зависит качество и работоспособность всего узла. В то же время контроль расположения отверстий малого диаметра и пазов этих деталей — сложный и трудоемкий [4].

Применение универсальных и простейших специализированных средств контроля не обеспечивает требуемой точности, а использование сложных СИ, таких как координатные измерительные машины, экономически невыгодно из-за необходимости создания специального программного обеспечения для выполнения измерений. При этом квали-