

Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Г.Н. Елманов, Б.А. Логинов, О.Н. Севрюков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ
МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ
МИКРОСКОПИИ**

Лабораторный практикум

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2011

УДК 620.179.118(076.5)

ББК 32.85я7

Е52

Елманов Г.Н., Логинов Б.А., Севрюков О.Н. Исследование топологии поверхности методом сканирующей атомно-силовой микроскопии. Лабораторный практикум: *Учебное пособие*. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 64 с.

Даны общие принципы работы атомно-силовых микроскопов, их устройство и основные конструктивные элементы. Приведено описание устройства, программного обеспечения сканирующего зондового мультимикроскопа СММ-2000 модификации 2000 г. и порядка работы на нем в режиме контактной атомно-силовой микроскопии. Подробно изложена методика запуска и пошаговой настройки микроскопа, а также получения и оптимизации изображений. Рассмотрены методы математической обработки (медианная, фурье-фильтрация и др.) и статистического анализа изображений поверхности (вычисление шероховатости, фрактальный и морфологический анализы). Даны порядок выполнения лабораторной работы, требования к оформлению отчета, а также контрольные вопросы.

Предназначено для студентов НИЯУ МИФИ, обучающихся по специальности «Физика металлов». Используется в дисциплинах «Получение и обработка металлов и соединений: наноматериалы и нанотехнологии» и «Кристаллография, рентгенография и микроскопия: электронная микроскопия».

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук В.Л. Якушин (НИЯУ МИФИ);
д-р физ.-мат. наук К.Н. Ельцов (ЦЕНИ ИОФРАН)

ISBN 978-5-7262-1581-5

© Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВЫ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	4
1.1. Основные принципы сканирующей зондовой микроскопии	4
1.2. Устройство и режимы работы атомно-силового микроскопа	6
1.3. Факторы, влияющие на качество и достоверность АСМ-изображения	10
2. КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСКОПА СММ-2000	15
3. ПОРЯДОК РАБОТЫ НА МИКРОСКОПЕ В АСМ-РЕЖИМЕ	17
3.1. Установка кантилевера в АСМ-столик	17
3.2. Установка образца для АСМ-режима	20
3.3. Установка и настройка АСМ-столика	23
3.4. Включение и настройка АСМ-режима	27
3.5. Выбор области сканирования	30
3.6. Подвод иглы к образцу	32
3.7. Сканирование кадра и настройка параметров сканирования	33
3.8. Выход из режима сканирования и выключение микроскопа	36
4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	37
4.1. Медианная фильтрация	39
4.2. Фурье-фильтрация	40
5. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ	44
5.1. Измерение шероховатости по профилю и поверхности	44
5.2. Фрактальный анализ поверхности и профиля сечения	45
5.3. Морфологический анализ объектов	50
6. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	56
6.1. Лабораторная работа «Математическая обработка и статистический анализ изображения поверхности»	56
6.2. Лабораторная работа «Исследование топологии поверхности методом АСМ»	60
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	63

1. ОСНОВЫ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

1.1. Основные принципы сканирующей зондовой микроскопии

В основе сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), наиболее распространенными разновидностями которой являются *туннельная сканирующая микроскопия* (СТМ) и *атомно-силовая микроскопия* (АСМ), лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью образца. Характерное расстояние между зондом и образцом составляет 0,1-10 нм. Контроль этого расстояния осуществляется при помощи системы обратной связи (ОС), приведенной на рис. 1.

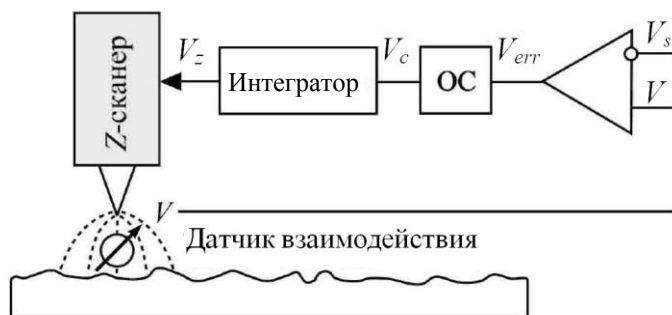


Рис. 1. Схема работы обратной связи СЗМ

Для реализации ОС необходима резкая и взаимно-однозначная зависимость характеристики взаимодействия зонда с поверхностью от расстояния зонд-образец $V(z)$. Для сканирующего зондового микроскопа в СТМ-режиме такой характеристикой является *ток туннелирования*, а в АСМ-режиме – *величина изгиба балки кантилевера* (силы отталкивания или притягивания иглы к поверхности).

В процессе работы система ОС поддерживает постоянным значение V , равным величине V_s , задаваемой оператором. При изменении расстояния зонд-образец (вследствие изменения рельефа поверхности образца под зондом в результате перемещения зонда в плоскости XY) происходит соответствующее изменение V . В системе ОС формируется сигнал V_c , определяемый величиной ошибки $V_{err} = V - V_s$, используемый для коррекции сигнала V_z , управляющего Z-сканером (функциональным элементом СЗМ, отвечающим за прецизионное Z-позиционирование зонда над образцом), кото-

рый приближает зонд к поверхности или отодвигает его до тех пор, пока V_{err} не станет равным нулю. В существующих СЗМ расстояние зонд-образец удается поддерживать с высокой точностью – 0,001 нм. Таким образом, система ОС обрабатывает изменения параметра V , обусловленные рельефом поверхности при перемещении зонда в плоскости XU (сканировании), при этом сигнал V_z , управляющий Z-сканером, используется для компьютерной реконструкции рельефа поверхности образца.

Для получения СЗМ-изображения зонд движется над поверхностью образца, осуществляя строчную и кадровую развертку, а величина сигнала, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Такое перемещение зонда относительно поверхности образца осуществляется при помощи специального устройства – *XU-сканера*, управляемого сигналами развертки с компьютера, причем в различных конструкциях перемещается либо зонд, либо образец. Компьютерная обработка полученного сигнала позволяет получить СЗМ-изображение рельефа поверхности $z(x, y)$, которое строится с помощью средств компьютерной графики.

Качество изображения и его адекватность реальной поверхности во многом определяется характеристиками ОС, а именно соотношением между пропорциональной, интегральной и дифференциальной компонентами. Их несбалансированность может приводить к осцилляциям при исследовании шероховатых поверхностей, сглаживанию резких деталей рельефа, недостаточной проработке резких черт топографии и т.п. Параметры ОС задаются опосредованно такими параметрами сканирования, как скорость сканирования, задержка перед точкой измерения, быстродействие системы поддержания заданного сигнала и шаг зонда.

Наряду с исследованием рельефа поверхности, различные модификации СЗМ позволяют изучать и другие свойства поверхности: электрические, магнитные, механические и оптические.

1.2. Устройство и режимы работы атомно-силового микроскопа

В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль или *кантилевер* (cantilever) с острым зондом на конце. Сила межатомного взаимодействия, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу кантилевера. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Методы получения информации о рельефе и свойствах поверхности с помощью АСМ можно разбить на три большие группы. В случае *контактного квазистатического режима* работы АСМ зонд находится в непосредственной близости от поверхности образца, фактически касаясь его и таким образом испытывая значительные силы отталкивания. Это позволяет получать достаточно значительные измеряемые сигналы, пропорциональные изгибу кантилевера. Однако при работе в контактном режиме существует опасность возникновения нарушений структуры поверхности образца и быстрого износа или даже поломки зонда.

В случае же *бесконтактного колебательного* режима измерения производятся в условиях относительно слабого притяжения между зондом и поверхностью образца, при этом регистрируются параметры колебаний кантилевера.

В *прерывисто-контактном* («*полуконтактном*») режиме зонд периодически касается поверхности, находясь попеременно как в области притяжения, так и в области отталкивания.

Так как микроскоп СММ-2000 модификации 2000 г. работает только в контактном режиме, то другие режимы силовой микроскопии далее не рассматриваются. Получение изображения рельефа поверхности в контактном режиме связано с регистрацией малых изгибов кантилевера. Для этого используется оптический датчик смещений, состоящий из полупроводникового лазера и четырехсекционного (квадрантного) фотодетектора (рис. 2).

Лазер фокусируется на кантилевере, а отраженный пучок через систему зеркал попадает в центр фотодетектора. Разностные значения фототока с различных секций фотодетектора однозначно характеризуют величину и направление изгиба кантилевера.

Основные регистрируемые параметры в общем случае: *изгиб кантилевера* (под действием Z -компоненты силы отталкивания пропорционален сигналу разбаланса напряжений на сегментах фотодетектора $V \sim (U_A + U_B) - (U_C + U_D)$) и *кручение кантилевера* (под действием латеральных компонент силы отталкивания, действующих в плоскости XY , пропорционально $V_L \sim (U_A + U_C) - (U_B + U_D)$). Следует иметь в виду, что в микроскопе СММ-2000 регистрируется только изгиб кантилевера.

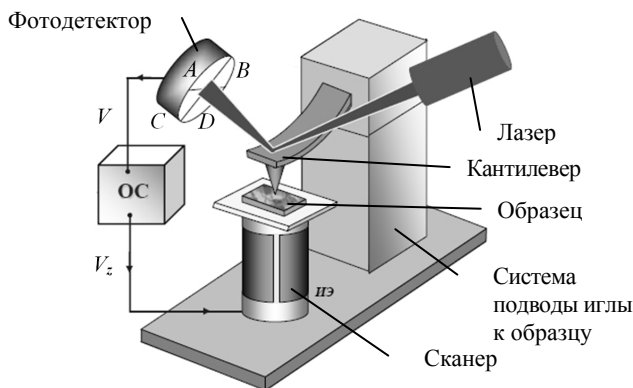


Рис. 2. Принципиальная схема работы атомно-силового микроскопа

Величина V используется в качестве входного параметра в системе обратной (ОС) связи АСМ. Система ОС обеспечивает $V = \text{const}$ с помощью Z -сканера, который поддерживает *постоянный изгиб* кантилевера равным величине, задаваемой оператором через силу прижима кантилевера к поверхности. Таким образом, зонд удерживается на фиксированном расстоянии от поверхности $\Delta z = \text{const}$. Это так называемый *режим постоянной силы*. Режим постоянной силы используется в случае, если характерный размер неровностей на поверхности образца превышает 1 нм.

В некоторых моделях АСМ имеется возможность работы в *режиме постоянного расстояния* между основанием зондового датчика и поверхностью образца. Этот режим используется при сканировании очень маленьких (не более 10×10 нм) моноатомно гладких областей с перепадами высот порядка единиц ангстрем для исследования строения поверхностных атомных сеток и моно-

атомных ступеней на поверхности кристаллов, т.е. с атомным разрешением. Микроскоп СММ-2000 модификации 2000 г. позволяет работать только в режиме постоянной силы.

При сканировании образца в этом режиме зонд перемещается вдоль поверхности, при этом управляющее напряжение на Z-сканере V_z , которое пропорционально рельефу поверхности образца, записывается в память компьютера и автоматически пересчитывается в высоту рельефа поверхности $z(x, y)$.

Пространственное разрешение АСМ определяется радиусом закругления зонда и чувствительностью системы, регистрирующей отклонения кантилевера.

Кантилеверы формируются, в основном, из тонких слоев легированного кремния, SiO_2 или Si_3N_4 методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании – держателе, на другом конце располагается зонд в виде острой иглы с радиусом закругления 10–50 нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. Угол при вершине зонда составляет 10° – 20° .

Связь между силой взаимодействия зонда с поверхностью и величиной, характеризующей изгиб кантилевера Δz , определяется законом Гука $F = -k \cdot \Delta z$.

Коэффициенты жесткости кантилеверов k варьируются в диапазоне 10^{-3} – 10 Н/м в зависимости от их геометрии и используемых материалов. Для кантилевера с $k = 1$ Н/м и силы взаимодействия между атомами 0,1 нН величина Δz составляет 0,1 нм.

В контактной моде АСМ обычно используются зондовые датчики с V -образным Si_3N_4 кантилевером и пирамидальным зондом (отношение длины зонда к ширине основания $L/W = 1:1$, радиус закругления конца $R = 10$ –50 нм) (рис. 3). Такие кантилеверы имеют упругую константу $k = 0,03$ – $0,6$ Н/м. Сила взаимодействия зонда с образцом составляет 5–50 нН.

Сканирующие элементы (сканеры) СЗМ с высокой точностью контролируют расстояние зонд-образец z и осуществляют перемещения зонда в плоскости XY . Сканеры изготавливаются из *пьезоэлектриков* – материалов, изменяющих свои размеры во внешнем электрическом поле. Изменение размеров пьезоэлектрика пропорционально приложенному напряжению и носит обратимый характер (в определенных случаях необходимо учитывать частичную

необратимость этого процесса, так называемый *крип-эффект*). Наиболее распространенный материал для изготовления пьезоприводов – цирконат-титанат свинца.

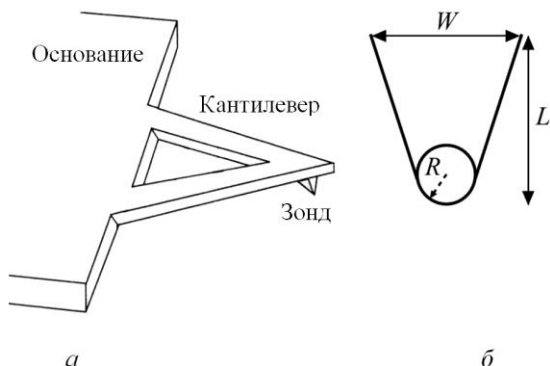


Рис. 3. Схема зондового датчика с V-образным кантилевером (а) и параметры геометрии зонда (б)

В настоящее время в СЗМ наиболее широко используются сканеры на основе одного трубчатого элемента. Общий вид трубчатого сканера и схема расположения электродов приведены на рис. 4. Материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации.

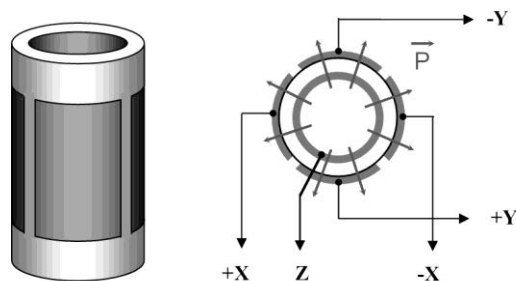


Рис. 4. Трубчатый пьезосканер

Внешний электрод сканера разделен по образующим цилиндра на четыре секции. При подаче противофазных напряжений на противоположные секции внешнего электрода (относительно внутреннего) происходит сокращение участка трубки в том месте, где на-

правление поля совпадает с направлением поляризации, и удлинение там, где они направлены в противоположные стороны. Это приводит к изгибу трубки в соответствующем направлении. Таким образом, осуществляется сканирование в плоскости XU . Изменение потенциала внутреннего электрода относительно всех внешних секций приводит к удлинению или сокращению трубки по оси Z . Так можно реализовать трехмерный сканер на базе одной пьезотрубки.

Кроме рельефа исследуемой поверхности, в контактной моде в принципе можно получить информацию о трибологических свойствах поверхности образца в нанометровом масштабе, регистрируя V_L – латеральную компоненту силы взаимодействия между зондом и образцом (*микроскопия сил трения* – МСТ). Пространственное распределение коэффициента трения между поверхностью и движущимся над ней зондом формируется путем регистрации кручения кантилевера (разностного сигнала левого и правого секторов фотодетектора). Обычно исследование пространственного распределения коэффициента трения и рельефа поверхности производится одновременно (сигналы от всех секторов фотодетектора регистрируются одновременно). В микроскопе СММ-2000 регистрация кручения кантилевера не реализована.

1.3. Факторы, влияющие на качество и достоверность АСМ-изображения

Очевидно, что качество и достоверность получаемого изображения рельефа поверхности во многом зависят от параметров сканирования, определяющих характеристики системы ОС. Вопрос оптимизации этих параметров рассматривается в разд. 3.

Важнейшим фактором, влияющим на качество изображения является состояние иглы кантилевера. Основная причина стабильного ухудшения качества изображения и, в конце концов, выхода из строя кантилевера – налипание каких-либо частиц на конец иглы с образца, вследствие чего конец иглы представляет собой ком с радиусом в несколько микрометров (вместо 10–20 нм). Получаемые при этом кадры характеризуются размытостью и отсутствием резкости. Отмыть налипший на иглу ком обычно не удастся. Промывка в спирте или ацетоне еще больше увеличивает ком. Налипание кома происходит, если на поверхности образца имеются плохо за-

крепленные наночастицы (например, при исследовании порошков), которые прыгают на иглу из-за поверхностного натяжения на острых радиусах. Налипание кома характерно для органических и биоорганических образцов, а также для образцов, промытых в спирте, ацетоне или других растворителях. Поэтому, если образец просто запылен, промывать его не стоит – лучше постараться сдуть пылинки, используя чистую резиновую грушу, или сканировать с пылинками и находить области на образце без них.

Качество и достоверность получаемого изображения рельефа поверхности зависят и от *свойств исследуемой поверхности*, которые оказывают влияние на взаимодействие между зондом и поверхностью. Любая поверхность на воздухе покрыта тонким слоем адсорбированных атомов (толщиной 2–50 нм), состоящим из воды и следов веществ, с которыми образец находился в контакте в процессе изготовления, загрязнений и т. п. При соприкосновении зонда с адсорбционным слоем возникает сильная притягивающая компонента силы вследствие капиллярного эффекта. Это приводит к тому, что при одном и том же расстоянии зонд-образец сила взаимодействия зонда с образцом может быть меньше при приближении зонда, чем при его удалении. Влияние сил капиллярного взаимодействия можно уменьшить при использовании острых зондов с малым R и большим L/W вследствие меньшей площади контакта с адсорбционным слоем.

Материал образца также оказывает влияние на характер сил взаимодействия между зондом и поверхностью. Поверхность некоторых материалов накапливает статическое электричество, которое существенно затрудняет измерения.

При сканировании неизбежно происходит локальный нагрев образца за счет работы прибора. Разные части микроскопа имеют разный коэффициент температурного расширения, вследствие этого можно наблюдать так называемый *температурный дрейф*, т. е. при повторном сканировании одного участка происходит смещение образца. Этот эффект практически не заметен при сканировании участков большой площади (больше 100 мкм^2), но существенен на малых полях сканирования.

Несмотря на возможность достижения высокого пространственного разрешения, информация о рельефе исследуемой поверхности может неадекватно отображать реальные особенности поверхно-

сти, что является следствием влияния инструмента исследования на объект и приводит к наблюдению *артефактов*. Эти артефакты, как правило, легко учитываются на качественном уровне при интерпретации АСМ-результатов, однако специфика ряда задач может потребовать количественных оценок и методов восстановления реальной геометрии объектов.

В процессе сканирования возможно появление двух основных групп артефактов АСМ: *артефакты, вызванные конечными размерами и формой зонда*, и *артефакты, обусловленные упругой деформацией исследуемых объектов*. Рассмотрим примеры некоторых из них.

1. *Искажения особенностей типа ступеньки/канавки*. При отображении резких особенностей геометрия зонда очень важна. Зонд с большим радиусом начинает взаимодействовать с поверхностными особенностями задолго до того, как центральная ось зонда достигает особенности. Это можно видеть на примере отображения ступеньки, показанном на рис. 5. Закругленные зонды создают изображения, которые кажутся округленными (см. рис. 5, а). Пирамидальные зонды с малым отношением сторон производят наклонные ступеньки (см. рис. 5, б). Для получения изображений, наиболее близко соответствующих поверхности образца, требуются зонды с большим отношением сторон (см. рис. 5, в).

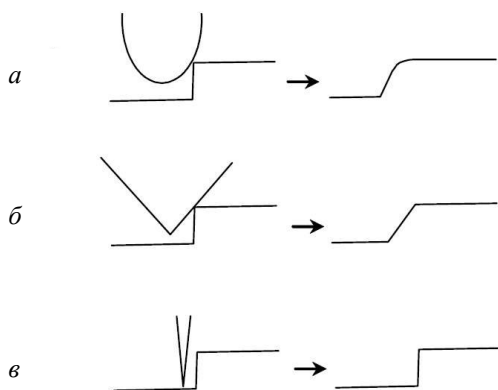


Рис. 5. Искажения наблюдаемого рельефа поверхности при взаимодействии ступеньки с зондами различной формы

При отображении глубоких особенностей, типа канавок, это становится еще более важным. Дно этих особенностей может быть отображено только при использовании длинных и тонких зондов. Зонды с малыми отношениями сторон не будут достигать дна этих особенностей (рис. 6).

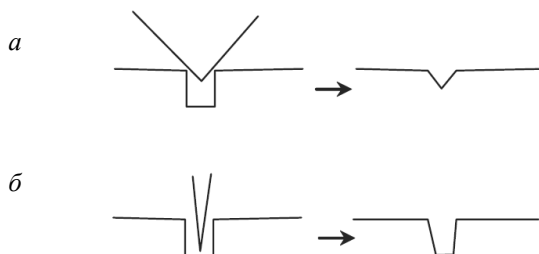


Рис. 6. Искажения наблюдаемого рельефа поверхности при взаимодействии канавки с зондами различной формы

2. *Искажения особенностей типа выпуклости.* При отображении малых выпуклостей на плоской поверхности (например, квантовых точек) заостренность используемого зонда драматически влияет на ширину изображения: зонд с большим радиусом начинает взаимодействовать с особенностью задолго до того, как центральная ось зонда коснется образца (рис. 7). Изображение будет значительно шире, чем реальная поверхность образца. При этом высота будет измерена правильно, независимо от геометрии зонда.

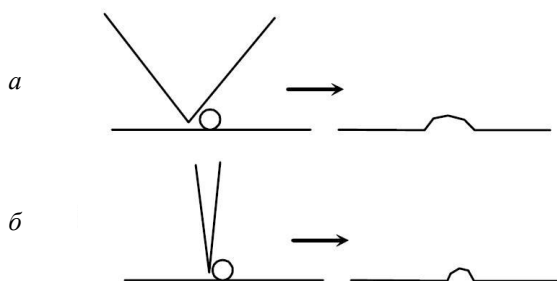


Рис. 7. Искажения наблюдаемого рельефа поверхности при взаимодействии выпуклости с зондами различной формы

При отображении очень мелких деталей на поверхности тупые зонды приводят к более широким изображениям, чем реальный образец (см. рис 7. а). При использовании острых зондов ширина изображения более соответствует реальной ширине деталей (рис 7. б). В обоих случаях высота особенностей воспроизводится точно.

3. *Искажения, обусловленные упругой деформацией исследуемых объектов.* Упругие деформации в области контакта зонда с поверхностью накладывают свои ограничения на точность АСМ. За счет деформаций изменяется рельеф образца (рис. 8). Один из эффектов этого рода – проминание поверхности больших органических молекул приводит к занижению их измеряемой высоты на несколько десятков процентов.

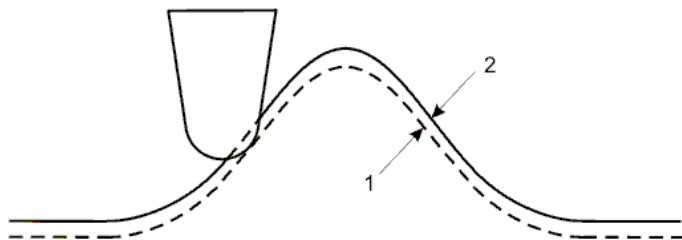


Рис. 8. Качественный вид измеряемого профиля (1) в сравнении с неискаженной топографией (2). За счет упругих деформаций выпуклая особенность на поверхности выглядит ниже и уже, чем должна быть

К наблюдению артефактов на изображении могут приводить и другие причины. Они могут быть вызваны *углом между осью зонда и образцом*, отличным от 90° ; *раздвоением кончика зонда* и т.п.

Отследить возникновение некоторых артефактов можно, анализируя зависимость реконструированного рельефа поверхности от направления сканирования.

Во всех описанных случаях наблюдаются искажениям в АСМ-изображениях при сканировании поверхностей с неровностями рельефа, сравнимыми с характерными размерами рабочей части зонда. Фактически АСМ-изображения являются сверткой формы поверхности исследуемого образца и зонда, который используется для отображения поверхности. Частично данную проблему позволяют решить развитые в последнее время методы восстановления АСМ-изображений, основанные на компьютерной обработке АСМ-данных с учетом конкретной формы зондов. Наиболее эффективным методом восстановления поверхности является метод численной деконволюции, использующий форму зонда, получаемую экспериментально при сканировании тестовых (с хорошо известным рельефом поверхности) структур. Для калибровки и определения формы рабочей части зондов используются специальные тестовые структуры с известными параметрами рельефа поверхности.

2. КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСКОПА СММ-2000

Сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000 модификации 2000 г. (ОАО «Завод Протон-МИЭТ», г. Зеленоград) имеет два режима работы: он работает как сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и как контактный атомно-силовой микроскоп (АСМ).

Технические характеристики микроскопа СММ-2000

Поле кадра:

размеры от 16/16 мкм до 10/10 нм

глубина, мкм до 2

Разрешение:

по вертикали, нм 0,03

по латерали, нм 0,3 (СТМ) и 1 (АСМ)

Позиционирование зонда:

по вертикали (Z), мм 3

по латерали (XY), мм 6/6

Размер образца:

длина, мм 5 – 10

ширина, мм 3 – 10

высота, мм 0,5 – 3

Микроскоп СММ-2000 (рис. 9) состоит из тяжелого литого латунного тела – *якоря*, на котором собрана прецизионная кинематика микроскопа.

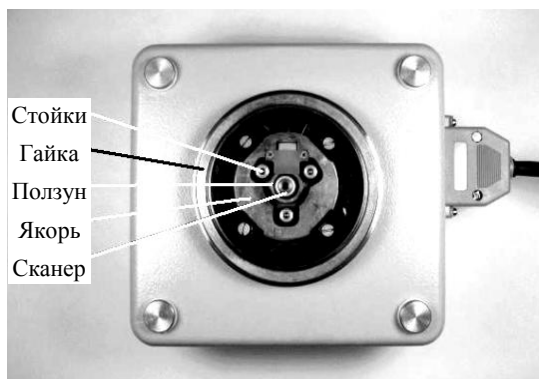


Рис. 9. Микроскоп СММ-2000, вид сверху

Вследствие высокой теплопроводности латуни на нее всегда приходится небольшой перепад градиента температур, что в совокупности с центральной симметричностью якоря и всей конструкции микроскопа обеспечивает низкий температурный дрейф по X и

У (не более 1 нм/град.). Жесткость литого якоря и его небольшие размеры определяют высокую частоту его основного механического резонанса (8 кГц), что обеспечивает невосприимчивость микроскопа к вибрациям и звуковым помехам.

В центре внутри к якорю прикреплен сканер, представляющий собой пьезотрубку с разделенными X-, Y- и Z-электродами и верхним фланцем, к которому прикручивается держатель образца с образцом. *Сканер осуществляет отображение образцом относительно подающейся к поверхности образца иглы*, в результате чего формируется кадр. Игла укрепляется на *столике*, а столик стоит на опорах – шариках, вклеенных в верхние фланцы трех пьезотрубок (стоек), стоящих на цилиндрическом «ползуне». Для режимов СТМ и АСМ в микроскопе СММ-2000 модификации 2000 г. предусмотрены отдельные легко сменяемые столики. Столики могут скользить по шарикам вбок на 3 мм в каждую сторону, так как имеют снизу полированные сапфировые пластинки, которыми они стоят на шариках. Передвигать столик вбок оператор может как вручную, так и точными (0,1–2 мкм) шагами от компьютера, подающего при этом на систему из трех пьезотрубок управляющие напряжения. Таким образом, *эти три пьезотрубки (стойки для столика) служат для перемещения столика в плоскости ХУ*. Передвигая столик, оператор ориентирует иглу на нужное место относительно образца, видя горизонтально лежащую поверхность образца и подводимый сбоку кантилевер в оптический микроскоп типа МБС-10, под который (ввиду малого размера) без проблем ставится микроскоп СММ-2000.

Для подачи иглы по вертикали к образцу или от образца служит система из шести пьезотрубок, укрепленных на якоря. На конце они имеют фланцы с аналогично вклеенными шариками, которыми они давят на три вертикальные полированные сапфировые направляющие, укрепленные на ползуне, по две трубки снизу и сверху на каждую направляющую. Давление дозировано пружинами так, что массы ползуна со столиком не хватает для проскальзывания их вниз под действием силы тяжести. Подача на эти шесть пьезотрубок особых управляющих напряжений приводит к пошаговому поднятию или опусканию ползуна и таким образом, к подводу или отводу иглы относительно образца.

При сканировании напряжения на шести пьезотрубках поднятия-опускания ползуна и на трех пьезотрубках перемещения столи-

ка по ХУ обнуляются, и эти пьезотрубки в это время представляют собой пассивные элементы конструкции.

Внутри корпуса микроскопа на четырех пружинах подвешена тяжелая (1,5 кг) плита, на которую, в свою очередь, подвешен латунный якорь со сканером и системой подачи иглы. Из-за такой двойной подвески частота, на которой колеблется якорь при ударе или других воздействиях на корпус или стол, на котором стоит микроскоп, составляет всего 2 Гц. Виброгашение достигает 60 дБ, т.е. в 1000 раз. Работать с использованием виброподвески рекомендуется только в исключительных случаях, так как и без нее достигается разрешение примерно до 1 нм, а работать с виброподвеской более сложно – колеблется и образец, и столик с иглой. Блокирование виброподвески осуществляется винтом с нижней стороны корпуса микроскопа. На время установки образца и столика необходимо закрутить накидную латунную гайку якоря сверху на корпусе микроскопа, что приведет к опусканию внутри микроскопа четырех ножек, которые надавят на выступы якоря и прижмут его к дну основания.

3. ПОРЯДОК РАБОТЫ НА МИКРОСКОПЕ В АСМ-РЕЖИМЕ

3.1. Установка кантилевера в АСМ-столик

В зондовом микроскопе СММ-2000 модификации 2000 г. могут применяться кантилеверы производства разных фирм, предназначенные для контактной АСМ-моды (режима). Лучше выбирать кантилеверы с длинными (более 200 мкм) и мягкими (Si_3N_4 , жесткость менее 0,05 Н/м) балками, например, кантилеверы марки MSCT (www.brukerafmprobes.com). Они имеют пять балок с одной стороны и одну балку с другой стороны (рис. 10). Пять балок с одной стороны полезно иметь для возможности выбора нужной по жесткости балки. Чем жестче кантилевер, тем он сильнее прижимается к образцу и точнее описывает его рельеф, но это можно использовать, соответственно, только на более жестких образцах. Реально в микроскопе СММ-2000 у кантилеверов используется балка А (одна с одной стороны), а также балки С и D (две из пяти балок на другой стороне). Балка В тоже может быть использована, но на ровных образцах, так как она не треугольная и испытывает кручения при попадании ее острия на боковые склоны объектов, из-за чего форма объектов искажается. Остальные балки не используются, потому что они короткие, и от них трудно получить хороший отклик лазерного луча.



длина и жёсткость балок:

A: 180 мкм	0,05 Н/м
B: 200 мкм	0,02 Н/м
C: 320 мкм	0,01 Н/м
D: 220 мкм	0,03 Н/м
E: 140 мкм	0,1 Н/м
F: 85 мкм	0,5 Н/м

толщина балок: 0,6 мкм

ширина балок: 20 мкм

Высота игл: 3 мкм

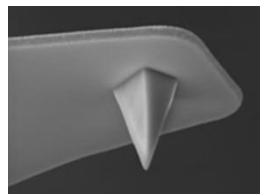
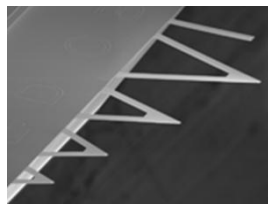


Рис. 10. Кантилеверы MSCT (радиус острия игл 10–40 нм)

Для установки кантилевера на АСМ-столик необходимо перевернуть этот столик, положить его на мягкую прокладку полированными ножками (которыми он ставится на шарики ползуна) вверх и открутить винт под плоской треугольной пружиной, прижимающей кантилеверы (рис. 11). Винт легко вывинчивается до тех пор, пока его шляпка не коснется пружины и не начнет ее отводить.

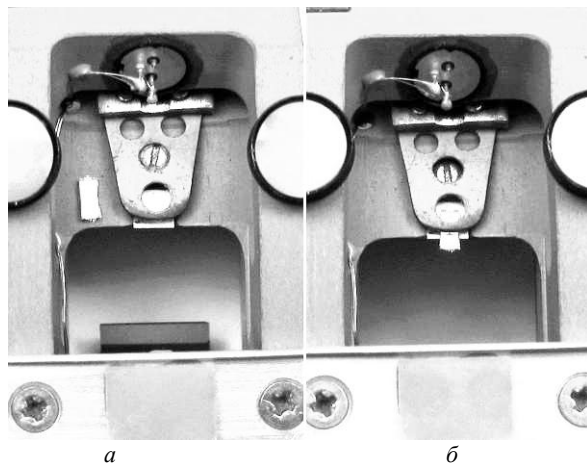


Рис. 11. Установка кантилевера под пружину на столике:
а – кантилевер на площадке, винт отжат; б – кантилевер под пружиной

Далее его надо отвинчивать с усилием до тех пор, пока конец пружины не приподнимется над кантилевером на 0,3–0,5 мм. Если под пружиной был зажат старый кантилевер, его надо сначала вытолкнуть острым инструментом на площадку рядом с пружиной, а затем убрать пинцетом.

Далее необходимо затолкать кантилевер под пружину, не приподнимая его, таким образом чтобы иголки с той стороны, которая заходит под пружину, не обломались о пружину. Глубина заталкивания должна быть такой, чтобы балки той стороны, которые находятся под пружиной, оказались примерно в центре отверстия в пружине, предназначенного для того чтобы не сломать эти балки при поджиге пружины. Несколько более глубокое заталкивание кантилевера может помочь при дальнейшей работе с короткими балками – в этом случае лазерный луч захватывает большую площадь.

После установки кантилевера под пружиной надо закрутить отжимающий ее винт – сначала с усилием, пока шляпка не оторвется от пружины, зажимающей при этом кантилевер, далее крутя винт свободно, пока он не дошел до конца, и в конце с небольшим усилием зафиксировать винт.

Балки кантилевера ломаются редко. В основном это происходит по неосторожности оператора при установке кантилевера или при подводе кантилевера к образцу, если оператор неправильно настроил АСМ-столик или задвинул образец под прижимную пружину кантилевера. Иногда на балке кантилевера ломается игла, если образец имеет глубокие поры диаметром около 20–40 нм с острыми краями. *Основная же причина выхода из строя кантилевера* – налипание на конец иглы частиц с образца, из-за чего конец иглы представляет собой ком с радиусом в несколько микрон вместо острия диаметром 10–20 нм.

3.2. Установка образца для АСМ-режима

Поскольку на образец в АСМ-режиме нет необходимости подавать напряжение, то крепление образца обычно производится его наклеиванием на двухсторонний скотч.

Наклеивать двухсторонний скотч на держатель образца и снимать с него бумагу, защищающую его вторую (верхнюю) сторону, необходимо, когда держатель образца еще не прикручен к сканеру. Далее держатель надо прикрутить к сканеру, и только после этого положить сверху и приклеить образец, слегка надавив на него вертикально вниз. Если приклеить образец заранее, он установится после закрутки в сканер в неопределенном положении. Образец желательно приклеивать так, чтобы та сторона, на расстоянии до 1,5–2 мм от которой нужно исследовать образец, была расположена горизонтально к оператору (рис. 12) и на расстоянии 1–2 мм дальше центра держателя сканера. Это положение оптимально для исследования кантилевером, так как образец не должен заходить под пружину крепления кантилевера, чтобы она не коснулась его раньше самого кантилевера.

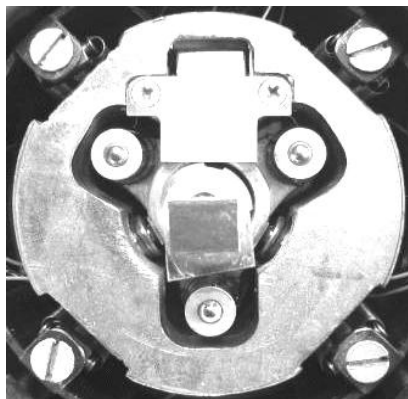


Рис. 12. Несимметричное закрепление образца на держателе (сканере)

Все операции по установке образца необходимо осуществлять при выключенном питании микроскопа (окно управления микроскопом «SMM-2000N Control Panel» должно быть выключено), так как при падении образца внутрь микроскопа при включенном питании может произойти замыкание.

При прикручивании держателя образца к сканеру нельзя прилагать боковых усилий на сканер, так как он представляет собой тонкостенную хрупкую пьезотрубку и может треснуть в основании. Крутильные усилия и вертикальный нажим сканер выдерживает. В конце закрутки необходимо приложить небольшое усилие дозакрутки. В этот момент идущий после резьбы конус в держателе образца притирается к углу центральной выемки, таким образом обеспечивая надежное безлюфтовое сцепление держателя образца со сканером, необходимое для того чтобы образец не дрожал относительно сканера при сканировании

Так как в АСМ-столике, в отличие от СТМ-столика, нет возможности поднятия или опускания кантилевера после установки АСМ-столика, *после установки образца необходимо поднять ползун в максимально верхнее положение и проверить зазор между образцом и кантилевером на АСМ-столике.*

Для поднятия ползуна надо включить питание микроскопа открытием окна управления микроскопом («SMM-2000N Control Panel») через иконки «Z» или «Scan» на контрольной панели микроскопа. Затем следует нажать на правую кнопку мыши, и, удерживая ее, щелкнуть левой кнопкой на кнопке «Park Z» в окне управления микроскопом, в которую превращается кнопка «Back Z» при нажатой правой кнопки мыши. Микроскоп начнет щелкать, поднимая ползун. При этом надо следить за зазором между ползуном и стеклотекстолитовой планкой, ограничивающей его верхнее положение. При достижении максимально верхнего положения, которому соответствует величина зазора от 0,1 до 0,5 мм, подается короткий сигнал низкого тона, и подъем останавливается автоматически. Если раздается длинный сигнал низкого тона и (или) ползун останавливается, нужно еще раз повторить нажатие на кнопку «Park». После поднятия ползуна в максимально верхнее положение до установки столика необходимо выключить микроскоп закрытием окна управления микроскопа («SMM-2000N Control Panel»).

После поднятия ползуна надо установить АСМ-столик. Столик берется за расширения с боков и опускается задней частью двумя задними круглыми ножками на два задних шарика ползуна. Потом, контролируя на всякий случай расстояние между кантилевером и образцом, надо опустить столик передней частью (где одна прямоугольная опора) на передний шарик ползуна. При этом надо сле-

дять, чтобы пружинка из пяти проводков сильно не растягивалась (для этого ее вместе со штекером можно положить на столик).

Если зазор между кантилевером и образцом при поднятом ползуне составляет 0,3–1 мм (максимум 1,5 мм), это нормально и образец можно считать установленным (рис. 13).



Рис. 13. Осторожное опускание АСМ-столика с кантилевером на образец с контролем зазора (около 0,3–0,5 мм); вид крепления достаточно толстого образца (без промежуточных шайб – вверху справа)

Если зазор между кантилевером и образцом более 1–1,5 мм, необходимо приподнять образец. Для этого надо снять столик, открутить держатель образца, снять с него образец и обязательно убрать скотч. Далее надо новым двухсторонним скотчем приклеить к держателю образца промежуточную плоскую шайбу толщиной чуть меньше начального зазора между образцом и кантилевером. После приклеивания скотча на верхнюю поверхность шайбы и отделения от него бумаги держатель прикручивают на сканер, и приклеивают на верхнюю поверхность шайбы образец.

Образцы для исследований в АСМ желательно иметь в виде пластинок размерами от 2х2 до 5х12 мм. По ширине размер образца ограничивается размером окна в АСМ-столике с учетом его возможного смещения для выбора точки на образце. Величину максимально возможной толщины образца желательно проверять на каждом конкретном микроскопе. Обычно это 3–4 мм.

3.3. Установка и настройка АСМ-столика

До установки АСМ-столика в микроскоп необходимо предварительно поднять ползун в максимально верхнее положение и далее выключить микроскоп (т.е. закрыть окно управления микроскопом «SMM-2000N Control Panel»), чтобы устанавливать столик, когда на микроскоп не подано высокое напряжение.

Если это все уже было сделано в ходе примерки АСМ-образца (см. разд. 3.2), то повторять этого не надо.

Нет необходимости поднимать ползун в максимально верхнее положение, если устанавливается такой же по толщине новый образец или если на том же образце устанавливается новый кантилевер. В этом случае достаточно сделать предварительный подъем ползуна всего одним нажатием на кнопку «Park», без контроля достижения ползуном максимально верхнего положения. До установки столика после этого надо также выключить микроскоп.

Для установки столика надо взять столик в нормальном его положении (ножками вниз) за расширения с боков, опустить болтающийся на пружинке из пяти проводков разъем от столика за пределы окна микроскопа на покрашенную поверхность, и опустить столик задней частью двумя задними круглыми опорами на две задние стойки с шариками. Потом, контролируя на всякий случай расстояние между кантилевером и образцом, надо опустить столик передней частью (где одна прямоугольная опора) на шарик передней стойки.

После установки столика можно взять разъем от столика рукой (или пинцетом) и воткнуть его в пятиконтактное гнездо справа спереди в окне микроскопа. Через этот разъем подается питание для лазера и снимаются сигналы с фотодетектора. Белую точку на разъеме необходимо совместить с белой точкой на гнезде. Если подсоединить наоборот, столик работать не будет (не зажжется лазер столика), но в электронике ничего не испортится. После этого желательно проследить чтобы пружинка-проводочка, идущая от разъема, не была натянута или сжата, так как тогда она при приближении иглы к образцу будет уводить столик вбок и смещать иглу вдоль образца.

Неосторожное обращение с пружинкой из пяти проводков, питающей АСМ-столик, может привести к ее растяжению или даже разрыву.

После установки столика можно поводить его в горизонтальной плоскости, не нажимая на столик сверху вниз во избежание проскальзывания ползуна вниз, и установить кантилевер над нужным местом на образце. При этом, однако, желательнее всего чтобы образец не заходил под кантилевер дальше – под прижимающую кантилевер пружину, так как эта пружина может в случае кривизны или шероховатости образца первой коснуться образца и не дать коснуться образца кантилеверу.

Для настройки оптической схемы АСМ-столика надо вырезать экран в виде небольшой полоски бумаги шириной 12–14 мм и длиной 50–70 мм, и подсунуть его под все оси на АСМ-столике, прикрыв им фотодиод на столике (рис. 14). На этом экране можно легко, без дорогих видеосистем и мониторов, наблюдать отклик от кантилевера.

Из-за прямолинейности лучей на бумажке-экране, находящемся примерно в 50 мм от кантилевера, возникает увеличенное примерно в 100 раз изображение балок кантилевера, хорошо просматриваемое глазом и без какой-либо оптики или видеосистем. Отраженный от балки кантилевера луч проходит также два зеркала – одно поворотное в горизонтальной оси (винт 4) и второе поворотное в вертикальной оси (винт 3) – и попадает на четырехквadrантный фотодиод или на закрывающую его бумажку-экран.

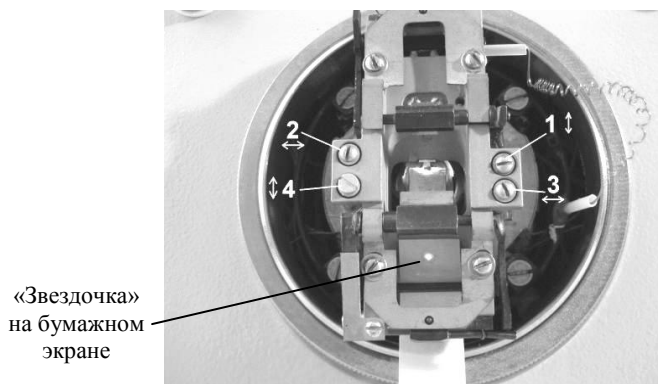


Рис. 14. Вид установленного, включенного и настроенного АСМ-столика

Первая операция при настройке АСМ-столика – это наведение луча от лазера на нужную балку на кантилевере. Для этого *винтом 1*

сначала надо привести луч кантилевера на тело АСМ-столика, под которым и к которому прикреплен кантилевер, т.е. увести луч лазера от балок кантилевера на тело кантилевера.

Необходимо крутить винты на АСМ-столике, придерживая его от бокового сползания и поворота, но, не давя на него, чтобы не проскользнул вниз ползун, и кантилевер при этом не въехал в образец. Кроме того, нельзя также давить отверткой и на винты во избежание того же проскальзывания ползуна вниз. *При кручении винтов необходимо также следить, чтобы не открутить их настолько, что отвинтятся их латунные гайки.*

Питание лазера подводится к АСМ-столику непосредственно от компьютера и программно не выключается. Это сделано для возможности настройки столика без включения собственно микроскопа. Но из-за того, что лазер имеет ограниченный 1000 ч режим одномодовой работы (после этого он переходит в многомодовый режим и постепенно гаснет), *необходимо после сканирования в АСМ-режиме отключить лазер (т.е. разъем от столика) и только после этого обрабатывать полученные кадры.*

Винтом 2 после этого надо поводить лазером по телу кантилевера и установить его примерно напротив центра балки, на которую будет наводиться луч лазера.

Далее винтом 1 надо начинать вести луч лазера в сторону балок, следя за экраном. Когда луч сойдет с тела АСМ-столика на тело кантилевера и подойдет к его краю, где располагаются балки, отражение от края кантилевера даст горизонтальное «зарево» на экране. Надо смещать лазер дальше к балкам, и, когда он попадет на них, над «заревом» на экране возникнут одна или две-три звездочки. Это отражения от балок кантилевера. Если продолжать крутить винт 1, звездочки (и «зарево») исчезнут, так как луч ушел дальше них. Тогда надо повернуть винт 1 в обратную сторону и добиться нахождения на экране одной-двух звездочек.

Чтобы удостовериться, что звездочки – это отражения от балок, надо несильно подуть на кантилевер, придерживая экран-бумажку. Звездочки должны шевелиться вверх-вниз, причем больше всего будет шевелиться отражение от самого гибкого (длинного) кантилевера. Обычно в первую очередь наводятся сначала на него. Если эта звездочка не по центру всего пятна отражения от кантилевера, ее надо привести в этот центр, крутя другой винт – винт 2. После

приведения по центру нужно прокрутить снова винт 1 в одну и другую сторону, и добиться наиболее яркого и сфокусированного пятнышка.

Четыре квадранта фотодиода, каждый размером 1/1 мм попарно объединены. Объединены два верхних квадранта и объединены два нижних квадранта, а итоговый сигнал от фотодиода – это разность между интенсивностью света, пришедшейся на оба верхних квадранта, и интенсивностью света, пришедшейся на оба нижних квадранта. Поэтому для того чтобы сигнал от перемещения звездочки (отражения от балки) был сильным, необходимо, чтобы кроме максимальной яркости ее размер по высоте был не более 1,5 мм. Тогда, если она направлена на центр фотодиода, ее смещение будет приводить одновременно и к уменьшению интенсивности света на одной паре, и к увеличению интенсивности на второй паре фотодиода. Итоговый разностный сигнал будет при этом в два раза больше, чем изменения яркости на каждой паре в отдельности. По горизонтали звездочка может быть в виде полоски (галочки) – это не влияет на изменение сигнала при перебеге звездочки в вертикальном направлении.

Так как от фотодиода берется разностный сигнал с почти одинаковых его площадей, общая засветка от комнатного света (лампы, солнечный свет) в первом приближении вполне допустима, так как вычитается сама из себя. При работе с ровными образцами, где необходимо повышенное разрешение по вертикали, *в помещении следует выключать мигающие люминесцентные лампы* или даже лампы накаливания, если их свет попадает на фотодетектор.

Также из-за возникновения наводки от флуктуации интенсивности лазерного луча нельзя допускать попадания на фотодиод зарева от края кантилевера. По экрану-бумажке это можно отслеживать, добиваясь такой ситуации, когда зазор между звездочкой и заревом не меньше чем 1,5–2 мм. Иногда для удовлетворения этого требования, а также требования по размеру звездочки в вертикальном направлении, в ущерб яркости винтом 2 сводят луч лазера только на одну сторону треугольной балки кантилевера, и получают звездочку в виде косой полоски.

После получения нужной формы звездочки – отражения от балки – ее нужно направить примерно на центр фотодиода. Для этого экран-бумажку выдвигают так, чтобы он заслонял только половину

фотодиода. Винтом 3 ориентируют звездочку примерно на центр в горизонтальном направлении. Очень точно этого делать не надо, так как для сигнала из-за попарного объединения верхних и нижних квадрантов фотодиода безразлично, в каком месте звездочка будет перебегать горизонтальную среднюю линию фотодиода вверх или вниз.

При горизонтальном нацеливании звездочки на фотодиод важно лишь, чтобы на фотодиод попала наиболее яркая и узкая по вертикали часть звездочки.

После этого винтом 4 сдвигают звездочку в вертикальном направлении так, чтобы половина звездочки попала на экран-бумажку, граница которой совпадает с серединой фотодиода. Этого точно также делать не надо, так как более точная настройка вертикального нацеливания будет производиться по числам на дисплее после включения АСМ-режима.

После ручной настройки АСМ-столика надо еще раз проконтролировать его положение в горизонтальной плоскости относительно образца и скорректировать его, если игла сместилась вбок от нужной точки или если образец «ушел» под окно АСМ-столика в область поджимающей кантилевер пружины. АСМ-режим нечувствителен к электромагнитным помехам, поэтому крышку микроскопа закрывать не требуется.

3.4. Включение и настройка АСМ-режима

После ручной настройки АСМ-столика необходимо включить АСМ-режим и донастроить АСМ-столик. Для этого щелчком мыши по иконкам «Z» или «Scan» на контрольной панели микроскопа включают окно управления микроскопом «SMM-2000N Control Panel», и кнопками «Mode» в правой верхней части этого окна устанавливают «F» – режим АСМ (рис. 15). Под надписью Mode появляются параметры АСМ-режима. Из них следует пользоваться только двумя параметрами – $F(nN)$ и $F0(nN)$ (в этом параметре не надо пользоваться знаком, он должен быть всегда «+», это мода отталкивания). Остальные параметры надо оставить в том же состоянии, как это отражено на рис. 15.

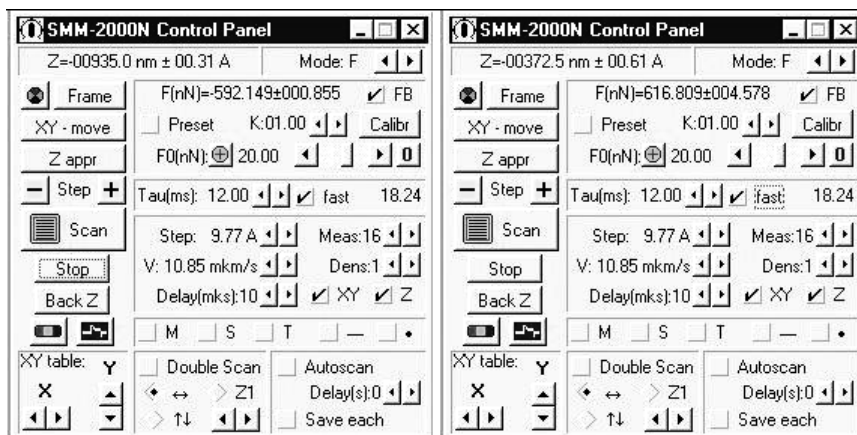


Рис. 15. Окно управления микроскопом «SMM-2000N Control Panel» в режиме ACM: слева – до подвода, с предварительно установленным F0 около –700; справа – сразу после подвода

Параметр $F(nN)$ – сигнал с фотодиода ACM-столика, соответствующий углу изгиба нажимающего на образец кантилевера, и, для конкретной балки определенной жесткости, соответствующий силе нажима иглы на образец.

Параметр $F_0(nN)$ – смещение сигнала с фотодиода ACM-столика, задающееся оператором, которое при включенной кнопке «FB» (всегда включена) должно поддерживаться на постоянном уровне после подвода иглы к образцу – при стоянии в точке и при сканировании. Это смещение соответствует определенному углу изгиба нажимающего на образец кантилевера, и, для конкретной балки определенной жесткости, соответствует поддерживающейся на постоянном уровне силе нажима иглы на образец. Обычно используются значения $F_0(nN)$ от 5 до 30. Чем меньше $F_0(nN)$, тем меньше сила нажима на образец и тем хуже будет отслеживание рельефа образца, однако эти малые значения $F_0(nN)$ нужно использовать на мягких образцах.

После ручной настройки ACM-столика значение $F(nN)$ может находиться в любой точке своего диапазона примерно от –1800 до +1800. Эти края диапазона соответствуют насыщению фотосигнала $F(nN)$ при смещении звездочки из центра фотодиода на расстояние около 0,1 мм. Так как глазом так точно настроиться звездочкой на

центр нельзя, нужно еще раз подстроить вертикальное нацеливание звездочки на фотодиод по сигналу $F(nN)$. Для этого, придерживая АСМ-столик, сначала надо покрутить винт 4 в одну и другую сторону и найти по сигналу $F(nN)$ точку перебега звездочки через центр фотодиода. При этом $F(nN)$ будет резко (за 0,5–2 оборота винта) перебегать из одного края диапазона в другой, примерно с +1800 на –1800. Когда значение $F(nN)$ будет больше примерно +600 – +700 (при $F_0(nN) = 20$), значение $Z(nm)$ координаты сканера в окне управления микроскопом «SMM-2000N Control Panel» переключится также с «минус максимума» на «плюс максимум». Это значит, что работающая система поддержания постоянного уровня сигнала (в случае АСМ – силы нажима иглы F_0) приняла изменение сигнала $F(nN)$ как реальное изменение силы нажима больше некоторой заданной величины, и старается уменьшить этот нажим, полностью отведя сканер вниз, от иглы. Это правильная работа системы поддержания постоянного уровня сигнала, и неплохо при каждой настройке АСМ-столика это проверять.

После этого тем же *винтом 4* надо установить значение $F(nN)$ на уровне от –1000 до –400 внутри этого диапазона. Шум установленного сигнала $F(nN)$ будет значительным из-за флуктуаций воздуха. Вблизи образца воздух будет почти неподвижен и шум сильно уменьшится. Но вблизи образца луч лазера, который бьет на балки кантилевера, будет попадать и на образец, и, отражаясь от образца, будет попадать на фотодиод, смещая его сигнал $F(nN)$ в положительную область. Именно из-за этого надо установить сигнал $F(nN)$ до подвода к образцу не в нуль, а немного в отрицательную область, чтобы не подстраивать смещение этого сигнала вблизи образца при подводе. Подстройка винтов в АСМ-столике на этом заканчивается.

Рекомендуется при каждом включении компьютера с микроскопом (обычно это делается раз в день) сначала перейти в низковольтный режим (убрать галочку в поле «XY»), а потом снова включить высоковольтный режим.

3.5. Выбор области сканирования

На контрольной панели микроскопа (см. рис. 15) расположены для удобства друг под другом в столбец семь кнопок управления микроскопом («*столбовая дорога оператора*»: Frame – XY move – Z appr – Step – Scan – Stop – Back), последовательное прохождение которых и представляет собой работу за микроскопом с целью получения кадров.

Нажатие на первой кнопке «Frame» приводит к появлению окна «2D» (рис. 16), предназначенного для назначения рамки области сканирования и отображения полученных кадров в двухмерном виде.

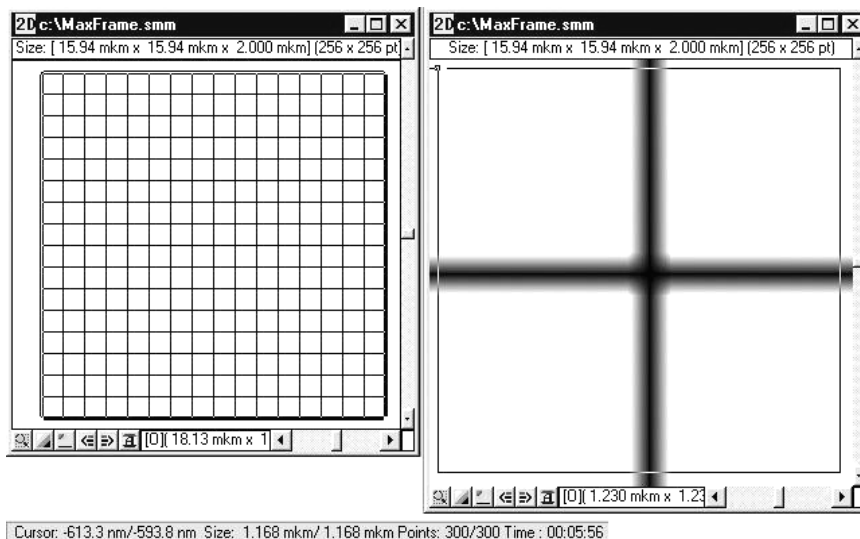


Рис. 16. 2D-окно с максимальным кадром 16x16x2 мкм (слева), с увеличением этого кадра и назначением рамки сканирования (справа), и с подстройкой при назначении рамки (внизу)

В этом окне выводится виртуальный кадр-сетка, размеры которого соответствуют размеру максимально возможного на каждом конкретном микроскопе кадра. Для микроскопа с максимальным кадром 16x16x2 мкм сетка состоит из 16x16 ячеек, поэтому можно сразу прикинуть, что на каждую ячейку приходится поле кадра 1x1 мкм. Полное имя кадра отображается в верхней строчке 2D-окна. Размер кадра и число снятых на него точек выводятся в строчке ниже.

Для того чтобы назначить первую рамку области сканирования с физическим размером меньше максимального кадра, *надо увеличить кадр-сетку*. Для этого надо щелкнуть на крайней левой нижней кнопке 2D-окна в виде лупы (курсор приобретет вид лупы, а кнопка – вид перечеркнутой лупы) и левой кнопкой нажать примерно в центре кадра-сетки. При каждом щелчке левой кнопкой будет происходить «цифровое» увеличение кадра в 2 раза в стороны от точки щелчка лупой (при щелчке правой кнопкой кадр уменьшается в 2 раза к точке щелчка лупой). Размер и число точек в кадре меняться не будут, но будет меняться отображаемый в нижней строчке 2D-окна размер части кадра-сетки, видимой во всем 2D-окне. После достижения требуемого увеличения для возможности других операций надо вернуть нормальный вид курсора, щелкнув курсором-лупой на кнопке крайней левой нижней кнопке 2D-окна в виде перечеркнутой лупы. При этом курсор приобретет вид крестика, а кнопка – начальный вид лупы.

До задания рамки области сканирования рекомендуется сделать еще одну операцию – подвести курсор на нижний правый угол 2D-окна (курсор при этом примет вид косой двусторонней стрелки), нажать на левую кнопку, удерживая ее, немного растянуть 2D-окно и отпустить. При этом не только произойдет растяжение 2D-окна, но и сцентрируется кадр (в нашем случае кадр-сетка) – сдвинется так, что центр кадра окажется в центре 2D-окна. Этого трудно достичь выбором места щелчков курсором-лупой, и также трудно достичь перемещением кадра с использованием скроллеров 2D-окна, так как центр кадра никак не отмечен. В центре кадра микроскоп работает с маленькими рабочими напряжениями на сканере, здесь лучше линейность и меньше искажения объектов.

Для выбора рамки необходимо в любом месте внутри 2D-окна произвести двойной щелчок левой кнопкой. Курсор при этом поменяет вид на один из видов курсора выбора рамки, который был использован в программе в последний раз. Вид курсора выбора рамки определяет направление сканирования (горизонтальное или вертикальное) и форму области (квадрат или прямоугольник) и его можно менять щелчками правой кнопки мыши. Затем указатель мышки следует подвести к точке, с которой микроскоп должен начать сканирование образца, нажать левую кнопку мышки и не отпуская ее выделить рамку. Рекомендуется формировать рамку движением мыши вниз и направо. В строке состояния появится информация о размерах

выбранной области в нанометрах (микрометрах) и пикселах, а также прогноз времени, требующегося на проведение сканирования при текущих установках микроскопа. Когда рамка охватит нужную область, отпустите кнопку мышки. *Количество пикселей на экране монитора в выбранной рамке соответствует количеству точек сканирования.* Поэтому для получения хорошего разрешения необходимо растягивание 2D-окна до соответствующего размера. Для восприятия кадра достаточно иметь примерно 550x550 точек. Встречается необходимость получения кадра с очень большим числом точек. Для этого надо в окне управления микроскопом увеличить параметр Dens – плотность точек по отношению к точкам дисплея. Но это резко увеличивает время сканирования.

3.6. Подвод иглы к образцу

Для подвода иглы к образцу надо выполнить две основные процедуры – «*нацеливание*» иглы по XY на начальную точку назначенной рамки сканирования (кнопка «XY move») и собственно *подвод иглы по Z* (кнопка «Z app»), а также при необходимости сделать дополнительную процедуру коррекции Z-координаты сканера.

При нажатии на эти кнопки надписи на некоторых кнопках временно изменяют свой цвет с черного на серый, указывая на недоступность соответствующих операций.

При подводе иглы к образцу начинается опускание столика, опирающегося на три подвижных стойки, которое сопровождается пощелкиванием микроскопа. В процессе опускания столика необходимо следить, чтобы АСМ-столик не уехал из-за вибраций подвода в сторону, например, не наезжал пружиной поджима кантилевера на образец. Боковой уход столика можно на ходу подправлять рукой. Если игла была далеко от образца, возможно, придется повторно запускать подвод (Z app) при его остановке и подаче длинного сигнала высокого тона. При успешном подводе из микроскопа раздается характерный для АСМ-режима «присвист», а из компьютера – обычный короткий сигнал высокого тона.

Перед запуском сканирования можно *дополнительно проверить систему поддержания заданного значения сигнала* (при АСМ-режиме – сигнала F0). Если задано поддерживать $F0(nN) = 20$, при подведенной игле на $F(nN)$ должно поддерживаться это значение 20, умноженное на некоторый коэффициент пропорциональности.

Чаще всего значение этого коэффициента около 30 (при $K = 1$), т.е. если задано поддерживать $F_0(nN) = 20$, при подведенной игле на $F(nN)$ должно поддерживаться значение около 600. Если изменить значение $F_0(nN)$, должно наблюдаться пропорциональное изменение реально поддерживающегося сигнала $F(nN)$.

До запуска сканирования *полезно также проверить значение сигнала $F(nN)$ вблизи образца после подвода*. Для этого надо сделать «Back» один или несколько раз, $Z(nm)$ сканера должно стать при этом равным «минус максимум» (около -935 нм), что соответствует отходу иглы от образца. Значение $F(nN)$ при этом и будет значением $F(nN)$ вблизи образца. Это значение можно подстроить до нуля, очень осторожно крутя винт 4 на АСМ-столике, осторожно поддерживая столик. После такой проверки необходимо снова подвести иглу к образцу (кнопка «Z app»), что выполняется практически моментально из-за малого расстояния между иглой и образцом.

После этого можно при необходимости *подстроить значение $Z(nm)$ на индикаторе сканера шагами «Step» иглы* (кнопки «+» или «-»). Такая подстройка желательна, когда сканеру лучше иметь больше запас по подъему образца, чем по опусканию (и наоборот). С таким случаем можно столкнуться, например, при исследовании образца с редкими порами глубиной почти на весь диапазон Z сканера на гладкой поверхности. Тогда сканеру необходимо обеспечить возможность поднятия образца к игле, когда она будет в поре при сканировании. В этом случае нужно сделать несколько раз «Step», «+» («доехать» иглой до образца) и добиться чтобы Z -координата сканера была положительной в районе 600–700 нм, оставив только совсем небольшой запас на поднятие сканера для опускания образца на небольших буграх или из-за небольшого общего наклона образца.

3.7. Сканирование кадра и настройка параметров сканирования

После успешного подвода можно нажимать кнопку «Scan». При этом появляется новое 2D-окно с кадром, равным по размеру назначенной рамке сканирования. Индикатор Z сканера в окне управления микроскопом («SMM-2000N Control Panel») через небольшое время (время сканирования одной строчки кадра) меняет вид. Там перестает отражаться среднеквадратичное отклонение, и выводится только

одно число – средняя величина координаты Z сканера от всех точек измерения по выполненной одной строчке сканирования.

Предварительно перед началом сканирования проверяются и при необходимости корректируются *параметры сканирования* «V» (скорость сканирования), «Step» (шаг зонда), «Delay» (задержка перед точкой измерения)), «Meas» (число измерений в точке) и быстроедействие обратной связи «Tau» с кнопкой «Fast». Все эти параметры влияют как на качество сканирования, так и на время съемки кадра. Их обычно настраивают на каждом образце, на каждом размере кадра, и иногда даже на каждом кадре так, чтобы кадр снимался оптимально – максимально быстро, но не в ущерб качеству. Следует иметь в виду, что параметры «Delay» и «Meas» влияют на время съемки кадра незначительно и обычно настраиваются в последнюю очередь при необходимости. *Типичные значения параметров в АСМ-режиме приведены на рис. 15, и могут быть использованы в большинстве случаев.*

Сканирование в АСМ-режиме целесообразно вести несколько при других параметрах, чем в СТМ-режиме. АСМ-режим имеет другое *оптимальное быстроедействие системы поддержания обратной связи* (параметр «Tau»). Уменьшая значение «Tau» и отслеживая строчки кадра, на некоторых микроскопах СММ-2000 в АСМ-режиме можно достичь возбуждения системы поддержания постоянного сигнала только на очень малых значениях «Tau» = 4–5 мс. Увеличив при этом «Tau» на один-два шага, все равно значение «Tau» останется очень мало. Такое высокое быстроедействия как раз и необходимо для отслеживания рельефа на больших скоростях.

После настройки параметра «Tau» настраивают *скорость сканирования* (параметр «V»), которая в АСМ-режиме может быть существенно выше, чем в СТМ-режиме. Ее увеличивают и следят за качеством прорисовки кадра. Чаще всего на какой-то скорости сканирования начинается сглаживание рельефа, он начинает прорисовываться менее четко. Обычно сканирование проводят на скоростях 10–100 мкм/с.

Поскольку АСМ-игла при сканировании контактирует с образцом, то нет необходимости идти на минимальных шагах зонда, чтобы не столкнуться с образцом, как это делается в СТМ-режиме. Поэтому можно назначать шаг в 2, 4 или больше (кнопки «Step»).

Это заметно уменьшает время съятия кадра. Рекомендуется сначала увеличивать скорость сканирования кнопками «V», а уже потом – увеличением шага «Step». И надо следить за кадром – не ухудшается ли при этом прорисовка объектов.

Таким образом, АСМ-кадр большой площади снимается гораздо быстрее СТМ-кадра такой же площади.

Все остальные параметры сканирования, а также дополнительные возможности при сканировании (Autoscan, Double Scan, изменения палитр и т.д.) в АСМ-режиме подстраиваются и используются так же, как и в СТМ-режиме и подробно описаны в пособии [3].

Последняя настройка в процессе сканирования – *настройка параметров «Delay» и «Meas»*, не сильно влияющих на быстроту съятия кадра. Настройка производится только по внешнему виду кадра.

Параметр «Delay» – задержка перед точкой измерения – должен быть тем больше, чем больше размах поверхности по Z . Обычно его назначают на уровне 50 мкс и, уменьшая, следят, чтобы прорисовка границ зерен или других объектов на кадре была почетче.

Параметр «Meas» – число измерений в точке, его назначают тем больше, чем больше видны вибрации или шумы на кадре – для их фильтрации.

В зависимости от кадров можно включать или отключать в процессе сканирования *функции обработки кадра*. Это – кнопки «M», «S» и «T» в окне управления.

Кнопка «M» (Median) управляет включением *медианной фильтрации* вдоль каждой строчки кадра, производящейся скользящей маской из трех значений после сканирования строчки. В 2D-окно отображается уже результат фильтрации. Медианная фильтрация устраняет случайные выбросы Z . Включать эту фильтрацию надо тогда, когда на кадре видны точечные выбросы (импульсный шум), прошедшие через фильтрацию, производящуюся при вычислении Z по количеству «Meas» измерений Z в каждой точке.

Кнопки «S» (Step) и «T» (Tilt) компенсируют общий наклон рельефа образца, соответственно, поперек и вдоль строчек сканирования. Это полезно, так как при устранении общего наклона на объекты, находящиеся на этом склоне, приходится больше градаций палитры, и они хорошо просматриваются. Однако попадание выдающегося по высоте объекта на краю строчки сканирования (в начале или в конце) приводит к его искажению.

При окончании сканирования кадра, а также при остановке сканирования кнопкой «Stop» происходит обязательный перерасчет палитры – она растягивается на весь диапазон от минимума до максимума во всем кадре, и при этом становятся видны все объекты, но зачастую снижается контрастность.

Кнопка «Stop» может остановить не только сканирование («Scan»), но все и другие процессы, стартуемые из окна управления микроскопом, в том числе «XY-move», «Z appr», «Step», «Back Z», «Park Z», а также «XY» и «Z» (переключение с высоковольтного управления сканером по XY или Z на низковольтное и обратно).

Результат сканирования выводится в 2D-окно. Черным участкам соответствуют наиболее глубокие впадины рельефа (минимальные Z), а белым – наиболее высокие горбы. Промежуточные высоты закрашиваются серыми цветами.

Если нужно контрастировать палитру, можно воспользоваться кнопкой «Мольберт» в 2D-окне (крайняя правая кнопка желтого цвета с буквой «A» между синей и красной полосками) для настройки палитры по выделенному курсором участку.

Полученный кадр можно сохранить в файле с расширением .smm. Если этого не сделать, то при закрытии 2D-окна он сохранится в папке, где установлена программа. В сохраняемый файл можно включить комментарий, для чего служит кнопка на панели инструментов, обозначенная буквой *i*. В дальнейшем сохраненные кадры можно открыть для обработки и анализа.

3.8. Выход из режима сканирования и выключение микроскопа

Чтобы выйти из режима сканирования для смены образца или кантилевера, а также для окончания работы за микроскопом, необходимо предварительно отвести иглу от поверхности образца на безопасное расстояние. Для этого надо нажать на кнопку отвода иглы «Back Z», дождаться когда отработает команда (несколько секунд), и проконтролировать значение Z(nm). Если оно не достигло «минус максимума» (порядка – 935 нм), необходимо еще несколько раз нажать на кнопку «Back», пока Z(nm) не достигнет «минус максимума». После этого микроскоп можно выключить нажатием на правую верхнюю кнопку выключения «SMM-2000N Control Panel». При этом без выключения общей программы «Scan Master» выключается питание микроскопа. При выключении мик-

роскопа программа еще раз на всякий случай выполняет команду «Back Z» так, что игла после выключения остается поднятой настолько, что можно безопасно и снимать столик, и оставлять его просто в этом же положении до следующего дня.

Для надежности отвода столика с кантилевером от образца можно воспользоваться кнопкой парковки «Park Z» на контрольной панели микроскопа, в которую превращается кнопка «Back Z» при нажатой правой клавише мыши.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Программное обеспечение микроскопа «Scan Master», кроме сканирования и 2/3-мерного просмотра кадров в редактируемых палитрах, производит практически все возможные виды первичной математической обработки и статистического анализа полученных кадров и является наиболее полнофункциональным пакетом для зондовой микроскопии.

К первичной обработке изображений относятся:

- коррекция «выпавших» точек, линий и макроскопических ступеней на изображении, вызванных сбоем системы при сканировании;
- простейшие арифметические операции над изображениями – сложение, вычитание и др.;
- коррекция общего наклона поверхности образца;
- фильтрация изображений с помощью простейших алгоритмов сглаживания и фурье-преобразования для устранения шумов;
- применение фильтров для искусственного повышения контрастности изображений, выделения границ объектов и др.

К первичной обработке кадров можно отнести и вывод изображения поверхности в трехмерном представлении в 3D-окно, а также выполнение операций его поворота и изменения направления освещения (рис. 17). Вывод изображения в 3D-окно осуществляется командой «Create 3D by 2D» (или кнопкой «2/3») при открытом 2D-окне. После выполнения любой из операций в 3D-окне необходимо для обновления изображения сделать двойной щелчок мышью.

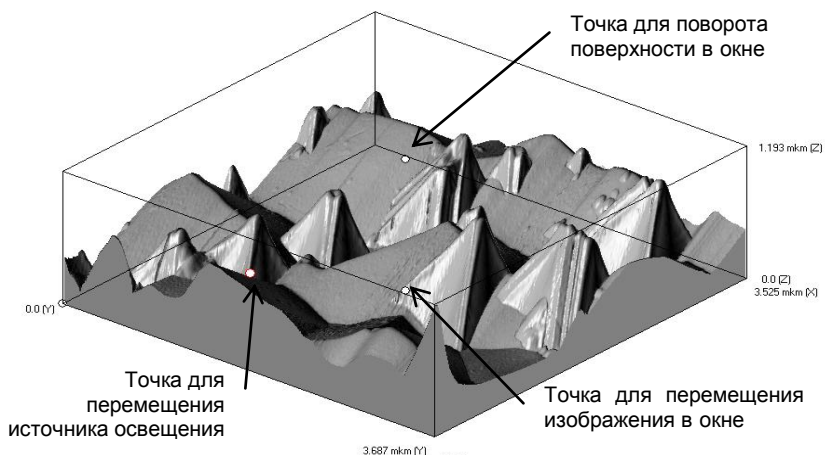


Рис. 17. 3D-окно с изображением поверхности алмазной пленки и точками для выполнения операций преобразования изображения указателем мыши

Описание всех функций обработки кадров, а также всех видов анализа изображений находится во встроенной контекстно-зависимой *функции помощи Help*. Если необходима помощь в использовании какой-либо опции программного обеспечения, необходимо щелкнуть мышью на знак вопроса в меню программы и далее курсором, ставшим после этого по виду как знак вопроса, щелкнуть на любом окне и любом параметре. При этом возникнет не только справка в виде относящейся именно к нужному окну одной из страниц гипертекста, но и примерный вид нужного окна, на котором при щелчке мыши выдаются объяснения любого параметра окна. Функция помощи не выдается только на окне управления микроскопом («SMM-2000N Control Panel»).

Рассмотрим некоторые примеры первичной математической обработки изображений, позволяющих улучшить их качество. Это важно не только для улучшения визуального восприятия изображения, но для получения более достоверных результатов последующего статистического анализа.

4.1. Медианная фильтрация

Если на изображении присутствуют дефекты в виде линий, высота которых резко отличается от общей высоты поверхности, их можно устранить методом медианной фильтрации. Для этого выбирается конфигурация маски фильтра, например, показанная на рис. 18 маска 1·5 (1 точка по оси x и 5 – по оси y). Эта маска программно пробегает все положения на кадре, устраняя лишь те попавшие под нее выбросы амплитуд, которые оказались в ней единичными. Очевидно, что усреднение по другой оси (фильтрация с маской 5·1) не принесет желаемого результата.

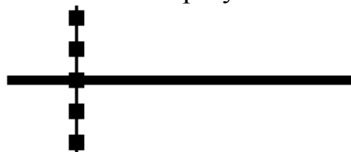


Рис. 18. Принцип работы медианного фильтра (маска 1·5)

На рис. 19 показано, как улучшается качество изображения (удаляются горизонтальные линии) после медианной фильтрации 1·5. На этом же рисунке приведен вид окна задания параметров фильтрации.

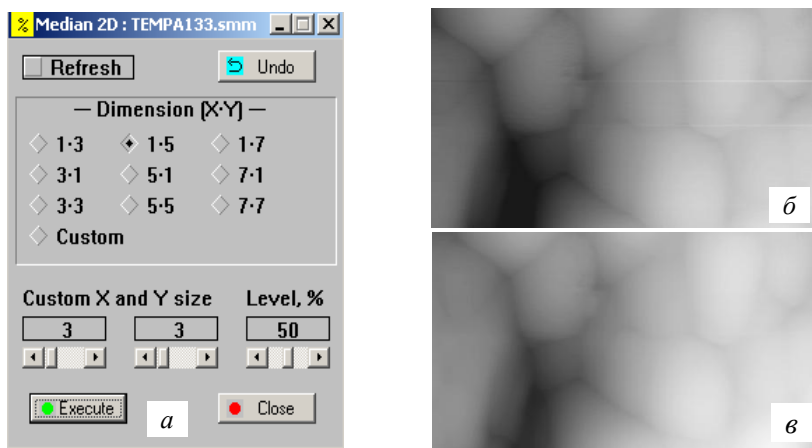


Рис. 19. Пример действия медианной фильтрации кадра с маской 1·5:

a – окно выбора параметров фильтрации;

$б$ – кадр до фильтрации; $в$ – кадр после фильтрации

Медианная фильтрация по двум осям может эффективно удалять и точечные шумы (рис. 20). С целью общего сглаживания рельефа можно использовать матричную фильтрацию.

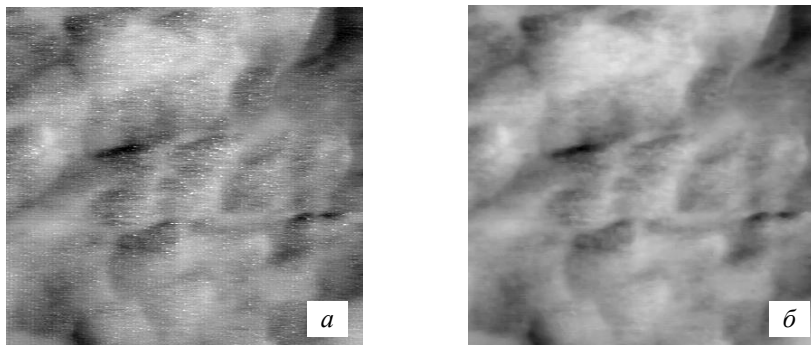


Рис. 20. Пример действия медианной фильтрации кадра с маской 5-5:
а – до фильтрации; б – после фильтрации

4.2. Фурье-фильтрация

В программном обеспечении микроскопа имеется возможность фурье-фильтрации и анализа части активного 2D-окна. Для выделения области следует щелкнуть мышью на кнопке «FFT» (Fast Fourier Transform), при этом программа переходит в режим выбора части изображения для обработки, а указатель мыши в области 2D-окна изменяет вид (на нем появляется надпись FFT). При нажатии левой кнопки мышки на экране появляется квадрат размером 16x16 точек, перемещающийся вместе с указателем мыши. Часть изображения, попадающая в квадрат в момент отпускания левой кнопки мышки, выделяется для преобразования. Размер квадрата можно изменять путем нажатия на правую кнопку мышки (при удерживаемой левой). При каждом нажатии размеры квадрата увеличиваются в 2 раза. Если размеры нового квадрата больше размеров изображения, то размер квадрата снова принимается равным 16x16. При отпускании левой кнопки программа применит *быстрое преобразование Фурье* (БПФ) к выбранной части изображения поверхности и создаст новые окна: 2D-окно с ее *фурье-образом* и 2D-окно, в которое помещается выбранная пользователем для БПФ часть изображения. Имена новых окон совпадают с именем исходного окна, но имеют другие расширения.

В результате применения БПФ к изображению поверхности создается симметрированный относительно центральной точки фурье-образ, причем удаленным от центра областям соответствуют высокочастотные составляющие ряда Фурье. Идеальная плоская поверхность отображается в окне фурье-образа в виде точки в центре. Наличие в этом окне максимумов, отрезков прямой и т.п. свидетельствует о наличии на поверхности периодических структур.

При активном 2D-окне с фурье-образом на панели инструментов программы отображается дополнительная панель команд обработки фурье-образа с их mnemonicскими обозначениями (рис. 21).

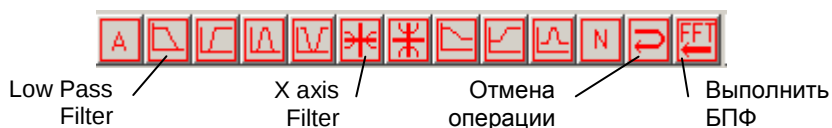


Рис. 21. Панель команд обработки фурье-образа

Команды обработки фурье-образа позволяют вырезать окрестности осей X и Y , применять высокочастотные, низкочастотные, полосовые подавляющий или пропускающий фильтры. Причем возможно использование фильтров Баттерворта разных порядков (1, 2, 4, 8), которые переключаются нажатием правой кнопки мыши перед началом выделения области применения фильтра.

С помощью команд фильтрации можно обработать фурье-образ с целью удаления или преобразования выделенных в окне фурье-образа областей, а затем выполнить обратное БПФ и тем самым восстановить изображение поверхности в обработанном виде. Таким образом, фурье-фильтрация кадра осуществляется в следующей последовательности: *создание фурье-образа выделенной части изображения, фильтрация выбранных областей фурье-образа, восстановление изображения поверхности в 2D-окне.*

Процедура фурье-фильтрации изображения позволяет эффективно очистить его от периодических дефектов или наоборот выделить периодические структуры. В отличие от медианной фильтрации, действующей на все изображение в целом, при фурье-фильтрации можно эффективно воздействовать в первую очередь на периодические объекты без существенного снижения резкости изображения в целом. Рассмотрим применение фурье-фильтрации для повышения качества изображения полученных сканов.

На рис. 22 приведен пример фурье-образа изображения с периодическими дефектами и результат его очистки от них с помощью комбинации из двух фильтров «X axis Filter» и «Low Pass Filter». Некоторое снижение резкости в результате такой фурье-фильтрации практически не приводит к потере информации, необходимой для дальнейшего анализа изображений.

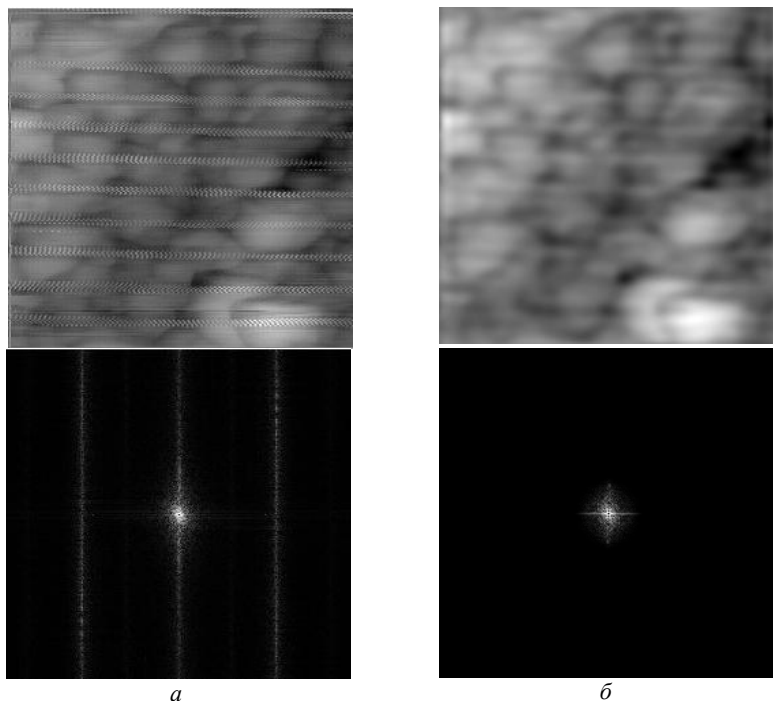


Рис. 22. Пример действия фурье-фильтрации на качество изображения:
а – исходный кадр и его фурье-образ; *б* – кадр и его фурье-образ после фильтрации

На рис. 23 демонстрируется результат применения фурье-фильтров очистки окрестности осей X и Y фурье-образа поверхности образца с преобладающими вертикальными царапинами и горизонтальными строчными помехами.

Применение команды «Y axis Filter» очищает изображение от горизонтальных помех, а «X axis Filter» – от вертикальных царапин. Важно, что очистка от горизонтальных помех практически не снижает резкости основного изображения поверхности.

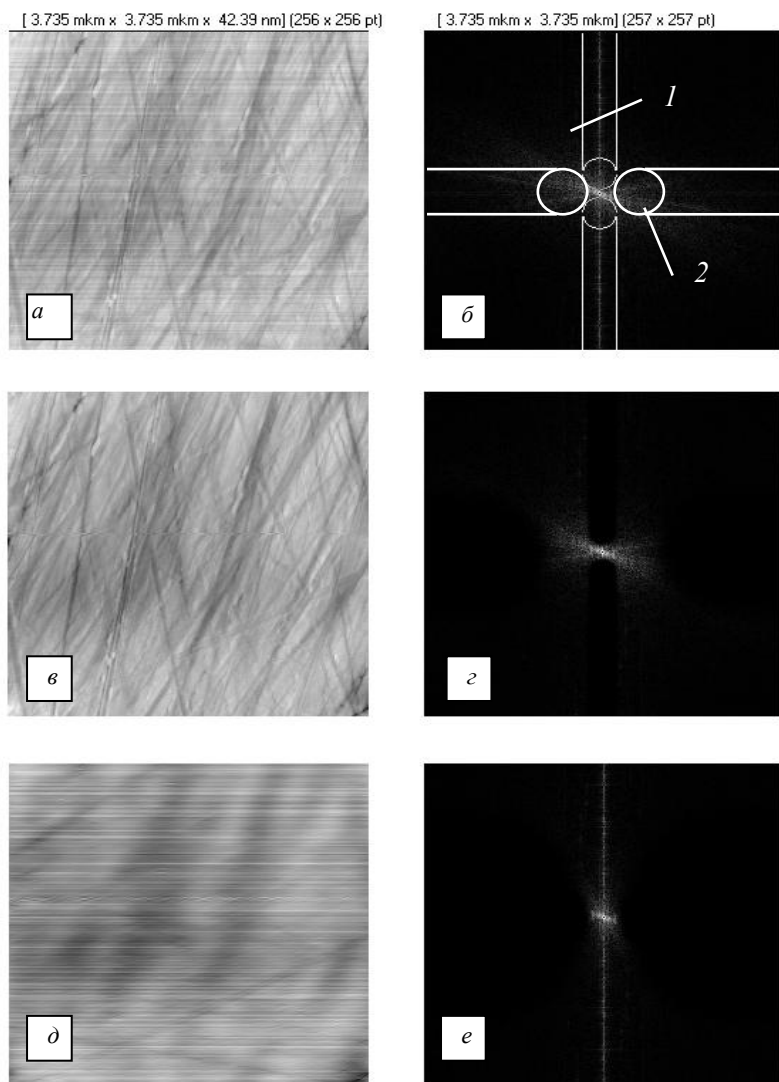


Рис. 23. Результат применения фурие-фильтров:
a – исходный кадр; *б* – фурие-образ исходного кадра;
в – кадр после обратного БПФ фурие-образа (*г*), полученного применением
 «Y axis Filter» к области 1 фурие-образа исходного кадра (*б*);
д – изображение после обратного БПФ фурие-образа (*е*), полученного
 применением «X axis Filter» к области 2 фурие-образа исходного изображения (*б*)

5. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Статистический анализ изображения поверхности включает:

- *определение расстояния и перепада высот* между двумя произвольными точками на профиле;
- *поиск и анализ локальных минимумов и максимумов* по высоте на профиле и поверхности;
- *анализ профилей* (анализ шероховатости, определение фрактальной размерности, расчет кумулятивной функции распределения точек профиля по высоте и т.п.);
- *анализ поверхностей* (анализ шероховатости, измерение площади поверхности, расчет фрактальной размерности, расчет кумулятивной функции распределения точек поверхности по высоте и т.п.);
- *анализ зерен* (распознавание зерен, как индивидуальных кластеров, лежащих выше некоторого сечения и проведение статистики по частицам – гранулометрический состав, диаметр, площадь, периметр, отношение длины к ширине и т.п.);
- *корреляционный анализ кадров* для их сравнения.

5.1. Измерение шероховатости по профилю и поверхности

Для определения шероховатости по профилю сечения следует выполнить команду меню «Measure Roughness|Section Roughness» (кнопка «Section Roughness» на панели инструментов) и провести при нажатой левой кнопке мыши линию для построения сечения на изображаемой в 2D-окне поверхности. В результате этой операции выведется *окно анализа шероховатости*, содержащее три графика: график полученного в результате сечения профиля, гистограмму распределения точек профиля по высотам и график интеграла от гистограммы (рис. 24). Для определения параметров и координат точек кривых в окне имеются четыре измерительных маркера (две вертикальных и две горизонтальных линии на графиках), положение которых на графиках можно изменять с помощью мыши. Координаты маркеров выводятся в подписях к осям графиков.

Перед выводом на экран и расчетом параметров шероховатости графики могут быть сглажены. Уровень сглаживания задается регуляторами «Sect.smooth» и «Hist.smooth». Способ построения средней линии профиля задается переключателем «Exclude slope». При включенным флажке исключается наклон профиля.



Рис. 24. Окно анализа шероховатости профиля

Для расчета параметров шероховатости заданной пользователем части поверхности, изображаемой в активном 2D-окне, служит команда «Measure|Roughness|Area Roughness» (кнопка «Area Roughness» на панели инструментов), результат выполнения которой во многом аналогичен предыдущей команде. С той разницей, что анализируется *интегральный профиль*, получаемый из серии параллельных сечений (в направлении X или Y) выделенной в 2D-окне части поверхности, расстояние между которыми зависит от параметра «Correlation» и среднего шага неровностей « S_m ».

5.2. Фрактальный анализ поверхности и профиля сечения

Одним из наиболее эффективных методов анализа топологии поверхности является ее *фрактальный анализ*.

Фрактал – структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому. Фрактальные объекты самоподобны, т.е. их вид не претерпевает существенных изменений при разглядывании их под микроскопом с любым увеличением. Фрактал выглядит одинаково, в каком бы масштабе его ни наблюдать. Например, кучевые облака состоят из огромных «горбов», на которых возвышаются «горбы» поменьше и т.д. вплоть до самого малого масштаба,

который мы способны разрешить. Другим классическим примером фрактальных объектов является береговая линия.

Фрактальный анализ применяется как для двухмерных объектов (в нашем случае профилей сечения), так и трехмерных (поверхностей). Основной характеристикой фрактальности является *фрактальная размерность* FD , которая в первом случае лежит в пределах $1 \leq FD < 2$, а во втором – $2 \leq FD < 3$. Чем большее значение имеет фрактальная размерность, тем более развит профиль или поверхность.

Алгоритм расчета *фрактальной размерности поверхности* (*Area Fractal Dimension*) состоит в следующем. Квадрат в плоскости XY изображения, выбранный мышкой в 2D-окне (длина стороны L), последовательно разбивается на $1, n_1 \cdot n_1, n_2 \cdot n_2, \dots, n_{max} \cdot n_{max}$ равных квадратов со сторонами $L_i = L/n_i$ ($n_{max} > \dots > n_3 > n_2 > n_1 > 1$, случай $n = 1$ соответствует отсутствию дополнительного разбиения, квадрат рассматривается целиком), т.е. шаг квадратной сетки равен $d = L_i = L/n_i$. Для каждого из разбиений из углов каждого из квадратов разбиения восстанавливаются перпендикуляры к плоскости XY до пересечения с поверхностью и вычисляются координаты пересечения перпендикуляров с поверхностью (рис. 25). Полученная квадратная сетка дополняется до треугольной – в центре каждого квадрата разбиения проставляется дополнительно точка, а в качестве высоты поверхности в этой точке берется средняя по четырем окружающим центр квадрата точкам высота. На каждом элементарном треугольнике сетки поверхность заменяется проходящей через три точки треугольника плоскостью, и путем суммирования по всем квадратным ячейкам вычисляется суммарная площадь этой кусочно-плоской поверхности S_i . При вычислении площади координата Z точек поверхности (и точек кусочно-плоской аппроксимации поверхности) умножается на установленный регулятором «Z scale» множитель.

Затем площади элементарных треугольников $T_i = L_i \cdot L_i / 2$ и S_i логарифмируются по основанию 10 и полученная зависимость $\lg_{10}(S_i) = F(\lg_{10}(T_i))$ строится на графике. Через точки графика методом наименьших квадратов проводится прямая и определяется ее наклон a . Фрактальная размерность поверхности определяется как $FD = 2 - a$.

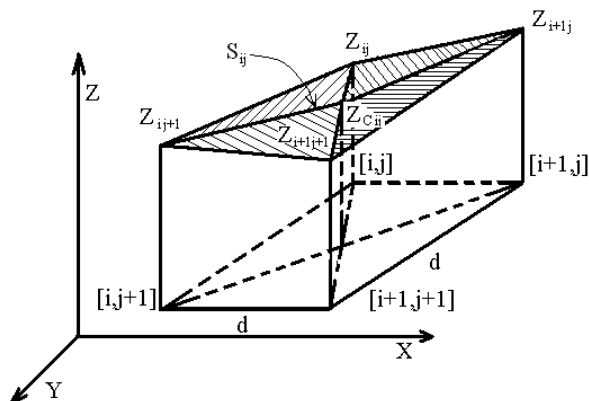


Рис. 25. Модель кусочно-плоской аппроксимации реальной поверхности с ячейкой сетки разбиения размером d в основании. Плоскость XY совпадает с горизонтальной плоскостью $Z = 0$. S_{ij} – площадь верхней кусочно-плоской поверхности

Результирующий график для фрактальной поверхности должен представлять собой прямую линию. Если график не является линейной функцией на больших интервалах шага разбиения $\lg_{10}(T_i)$, то поверхность не будет фрактальной.

Алгоритм расчета *фрактальной размерности профиля сечения* (Section Fractal Dimension) во многом аналогичен алгоритму расчета фрактальной размерности поверхности с той только разницей, что разбиение анализируемого участка проводится на отрезки равной длины (а не квадраты) и рассчитывается суммарная длина (а не площадь треугольников) ломаной линии (кусочно-прямой).

Фрактальная размерность сечения определяется как $FD = 1 - a$, где a – наклон прямой, полученной линейной аппроксимацией зависимости длины ломаной от длины отрезка разбиения: $\lg_{10}(S_i) = F(\lg_{10}(L_i))$.

Для определения фрактальной размерности поверхности с помощью стандартной программы обработки сканов необходимо выполнить команду меню «Measure|Fractal|Area Fractal Dimension» (кнопка «Area Fractal Dimension» на панели инструментов) и выбрать мышкой квадратную часть поверхности в 2D-окне. Загружаемое окно «Area Fractal Analysis» содержит график зависимости площади кусочно-плоской аппроксимации заданной части поверх-

ности от площади ячейки квадратной сетки, на которой проводится аппроксимация (рис. 26, а). График строится в дважды логарифмическом масштабе. На графике имеются два измерительных маркера (вертикальные линии), которые перемещаются щелчками кнопок мышки (левой и правой). Их координаты выводятся в подписях к осям графика. Выделенная линия на графике – проведенная методом наименьших квадратов прямая, наилучшим образом аппроксимирующая часть кривой, расположенной между маркерами. По наклону этой прямой определяется фрактальная размерность поверхности. Значение ординаты на графике в пределе $L_i \rightarrow 0$ характеризует истинную площадь поверхности. Поскольку приведенная зависимость является кусочно-линейной и имеет два излома при шагах разбиения, соответствующих размеру крупных (порядка 100 нм) и мелких зерен (порядка 15 нм), то говорить о фрактальном характере поверхности образца в целом нельзя, хотя можно говорить о фрактальности поверхности отдельных зерен.

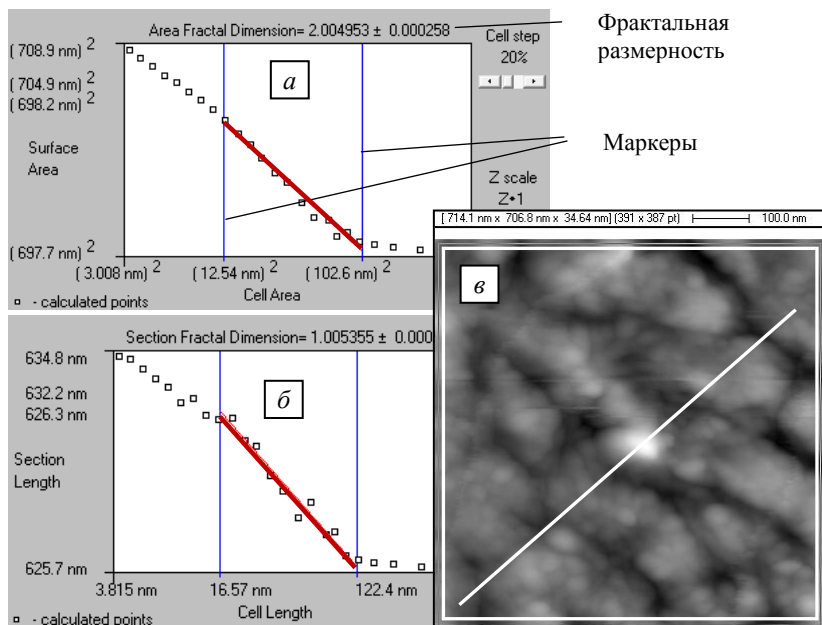


Рис. 26. Окна вывода результатов фрактального анализа участка поверхности (а) и профиля сечения (б) изображения поверхности в 2D-окне (в).

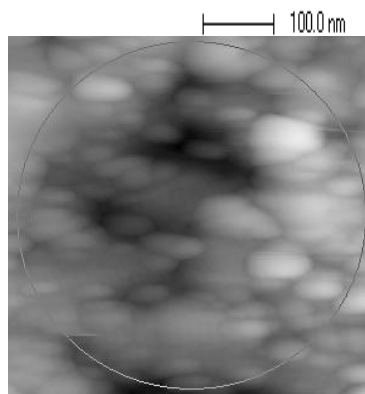
В 2D-окне выделены анализируемый прямоугольный участок и линия сечения

Для расчета фрактальной размерности заданного сечения поверхности предназначена команда «Measure|Fractal|Section Fractal Dimension» (кнопка «Section Fractal Dimension»). Результат ее выполнения аналогичен описанному выше (рис. 26, б).

Третья команда фрактального анализа – «Measure|Fractal|Direction Fractal Dimension» (кнопка «Direction Fractal Dimension») – предназначена для расчета зависимости фрактальной размерности от направления в заданной пользователем в 2D-окне части поверхности в форме окружности (рис. 27, а). В результате выполнения этой команды в окно «Direction Fractal Analysis» выводится два графика (рис. 27, б):

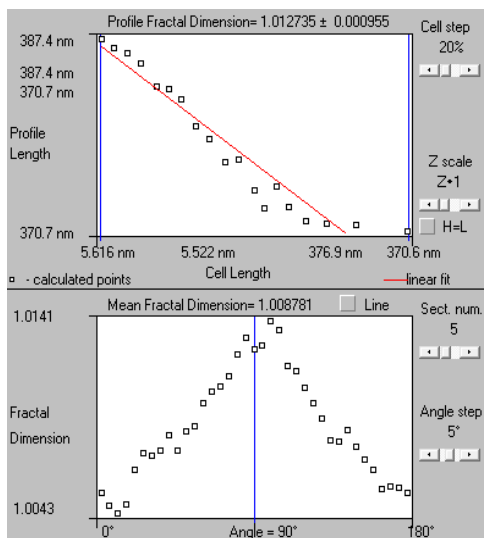
- верхний график – зависимость средней длины ломаных линий, аппроксимирующих профили, полученные при сечении поверхности из 2D-окна под выбранным на нижнем графике углом, от шага по оси абсцисс профиля, с которым проводится аппроксимация.

- нижний график – зависимость средней фрактальной размерности профилей, полученных в результате сечения поверхности линиями, проведенными в выбранной мышкой области, от угла к оси X , под которым проведены линии (на графике имеется измерительный маркер, задающий угол, при котором строится и выводится на экран верхний график).



а

Рис. 27. Выбранная область в 2D-окне (а) и результат расчета зависимости фрактальной размерности от направления (б)



б

Расчет зависимости фрактальной размерности сечений поверхности от направления проводится последовательно для каждого из направлений (углов к оси X , под которыми проводятся секущие поверхности). Шаг по углу (и, соответственно, количество точек на нижнем графике окна) задается регулятором «Angle step».

5.3. Морфологический анализ объектов

Для проведения полного морфологического анализа объектов поверхности служит команда меню «2D-process|Objects processing» и соответствующая ей кнопка на панели инструментов. Эта команда предназначена для выделения на изображении поверхности объектов, проведения с ними морфологических операций, расчета характеристик выделенных объектов, выполнения статистической обработки совокупности выделенных объектов (построения гистограмм и корреляционных зависимостей), выделения по заданному пользователем набору критериев подмножеств (классов или типов) объектов и определения их характеристик.

Панель работы с объектами разделена горизонтальными линиями на четыре части.

В верхней четверти панели собраны кнопки и переключатели для формирования списка выделенных объектов и работы с объектами (рис. 28).

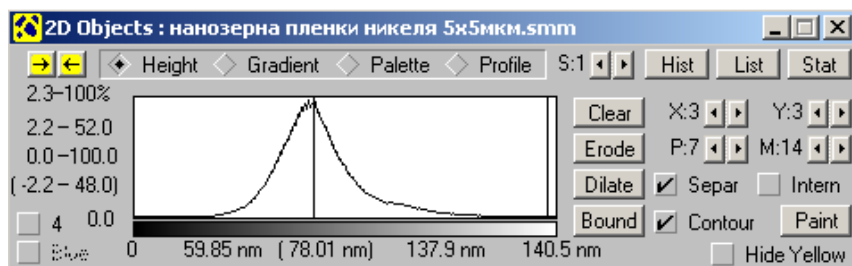


Рис. 28. Фрагмент панели работы с объектами (первая четверть панели), предназначенный для выделения объектов

Список выделенных объектов формируется в момент загрузки панели и заново переформируется каждый раз при изменении положения маркеров на гистограмме высот точек кадра (или градиента высоты и яркости в зависимости от состояния переключателей

Height – Gradient – Palette). При этом в открывающемся окне выделения объектов (Binary 2D Objects) автоматически выделяются объекты (контурами или закрашенными областями в зависимости от состояния флажка «Contour»), характеристики точек которых (высота, градиент или яркость) лежат между маркерами на гистограмме. В список для каждого выделенного объекта заносится перечень точек изображения, принадлежащих к данному объекту и перечень значений параметров данного объекта (площади, длины и т.д.).

Автоматическое выделение объектов далеко не всегда приводит к желаемому результату и часто требует дополнительного *графического редактирования выделенных объектов* (рис. 29), переход в который осуществляется нажатием на кнопку «Paint», а выход – ее повторным нажатием. Графическое редактирование производится в окне выделения объектов указателем мыши в виде карандаша при нажатой левой (рисование) или правой (стирание) кнопке мыши.

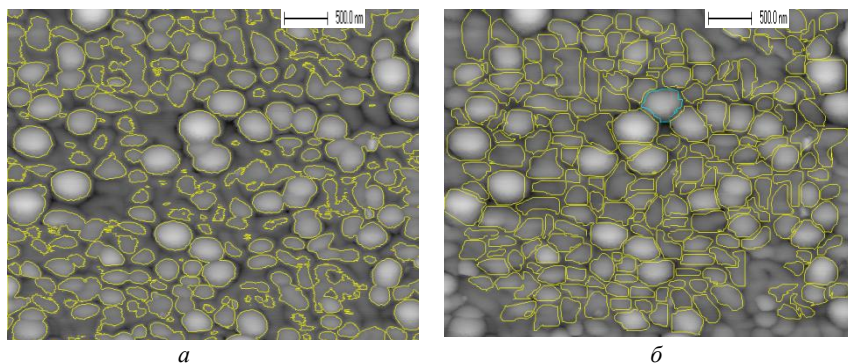


Рис. 29. 2D-окно с выделенными автоматически (а) и вручную (б) объектами

При выполнении *операций очистки* (Clear – исключение из списка выделенных объектов, размеры которых меньше или равны выбранных регуляторами $X:n$, $Y:m$; Bound – удаление объектов, касающихся границ кадра), *морфологических операций* (Erode – снятие с периферии объектов слоя точек; Dilate – наращивание объектов) и *графического редактирования* (Paint) часть перечисленных в списке объектов может исчезнуть, разделиться на части или слиться. В этих случаях список модифицируется – исчезнувшие объекты исключаются из списка, вместо разделившегося на части объекта в список добавляются новые объекты (части, на которые разделился

объект), объединившиеся (слившиеся) объекты из списка исключаются, а вместо них заносятся объекты, получившиеся в результате объединения.

Нижние три четверти панели работают с уже готовым списком выделенных объектов.

Вторая четверть панели предназначена для получения распределений объектов по какому-либо из их параметров: диаметру, периметру, площади и т.п. (рис. 30).

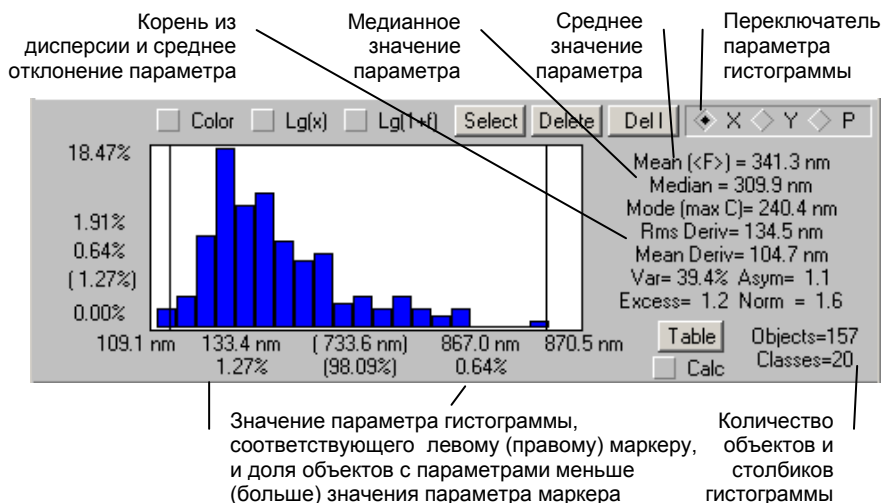


Рис. 30. Фрагмент панели работы с объектами (вторая четверть панели), предназначенный для получения распределений выделенных объектов по какому-либо из их параметров

В приведенном примере гистограмма распределения объектов построена по параметру X , который определяется в третьей четверти окна работы с объектами. В рассматриваемом частном случае – это диаметр выделенных объектов.

Предусмотрена возможность задания линейного и логарифмических масштабов осей гистограммы, измерения параметров распределения и исключения из рассмотрения (и из списка выделенных объектов) части распределения (и объектов, принадлежащих к этой части). Это исключение осуществляется с помощью кнопок «Select» (из списка выделенных объектов удаляются все объекты, кроме тех, параметр X которых лежит между задаваемыми верти-

кальными маркерами), «Delete» (удаляются все объекты между маркерами), «Dell» (удаляется один объект, выделенный левым маркером). После удаления объектов гистограмма, корреляционная зависимость на рис. 31 и статистика автоматически пересчитываются.

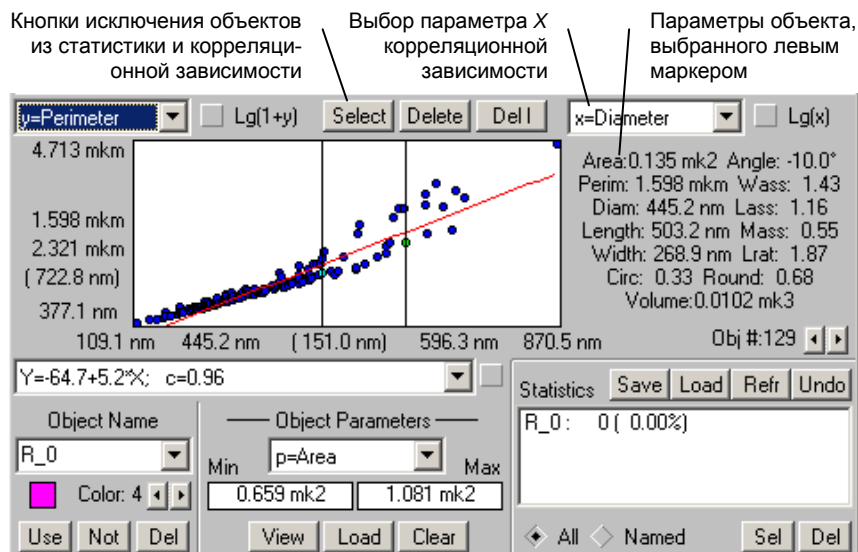


Рис. 31. Фрагмент панели работы с объектами (третья и четвертая четверти панели), предназначенный для получения корреляционных зависимостей, а также для определения типов (классов) объектов и подсчета количества объектов из списка выделенных объектов, принадлежащих к данному типу

Третья четверть панели предназначена для получения корреляционных зависимостей и измерения их параметров. Имеется возможность выбора масштаба осей графика корреляционной зависимости и исключения из совокупности (списка объектов) выбранных пользователем точек (объектов). Это исключение, так же как и в предыдущем случае, осуществляется с помощью кнопок «Select», «Delete», «Dell» и приводит к автоматическому пересчету гистограммы на рис. 30, корреляционной зависимости и статистики.

Нижняя (четвертая) часть панели предназначена для определения типов (классов) объектов и подсчета количества объектов из списка выделенных объектов, принадлежащих к данному типу.

Класс объекта задается его именем (в списке «Object Name») и набором ограничений на значения параметров объектов (задается с помощью списка «Object Parameters» и полей ввода «Min», «Max»).

Нажатие на кнопку «Save» приводит к сохранению в файле текущего состояния панели работы с объектами. Файл сохраняется под номером, выбираемым в открывающемся диалоговом окне. Сохраненное состояние впоследствии может быть восстановлено нажатием на кнопку «Load».

Параметры (характеристики) объектов

Программа для каждого из выделенных объектов рассчитывает следующие параметры.

- *Area* – площадь объекта, рассчитывается как произведение количества точек в объекте на площадь элементарного прямоугольника, равную произведению шага сетки, на которой задана поверхность по оси X на шаг сетки по оси Y .

- *Perimeter* – периметр объекта.

- *Diameter* – диаметр объекта. Вычисляется как средняя по углу φ длина проекции объекта на прямую, проходящую под углом φ к оси X . При вычислении среднего для φ используется следующий набор углов $\varphi = 0, 10, 20, \dots, 170$ град. Условимся для дальнейшего называть прямую, длина проекции объекта на которую максимальна, прямой ориентации объекта.

- *Length* – длина объекта – максимальное из значений длин проекций объекта, полученных при вычислении диаметра объекта (длина проекции объекта на прямую ориентации объекта).

- *Width* – ширина объекта – средняя длина сечения объекта прямой, перпендикулярной прямой ориентации объекта.

- *Length ratio* – отношение длины объекта к ширине.

- *Circularity* = $2\pi \cdot \text{Areal} / (\text{Perimeter} \cdot \text{Perimeter})$.

- *Roundness* = $4 \cdot \text{Areal} / (\pi \cdot \text{Length} \cdot \text{Length})$ – «кругообразность» объекта, равна единице для круга.

- *Angle* – угол между осью X и прямой, длина проекции объекта на которую максимальна.

- *Length (Width) asymmetry* – асимметрия объекта в длину (ширину). Для вычисления объект делится на части прямой, перпендикулярной (параллельной) прямой ориентации объекта, и проходя-

щей через среднюю точку проекции объекта на прямую ориентации объекта (прямую, перпендикулярную прямой ориентации объекта). Рассчитываются площади частей объекта, находящихся по обе стороны прямой. Асимметрия определяется как частное от деления большей из полученных площадей на меньшую.

- *Emptiness* – «пустотность» – отношение площади пустот внутри объекта к сумме площади пустот и площади объекта.

- *Direction* – направление (угол), под которым ориентирован объект к оси *X*. *Direction* определяется направлением вектора, проведенного от меньшей по площади «половины» объекта к большей. («Половины» объекта определяются так же, как при расчете параметра *Length asymmetry*.) *Direction* = *Angle* в том случае, если вектор, проведенный от меньшей «половины» объекта к большей, направлен в ту же сторону, что и *Angle*. В противоположном случае *Direction* = *Angle* – 180.

- *Volume* – объем объекта.

Все перечисленные выше параметры содержатся в списках выбора параметров (выбора *X* и *Y* параметров корреляционной зависимости и списка «Object Parameters»). Любой из этих параметров может быть выбран в качестве параметра гистограммы (распределения) объектов, параметра *X* или *Y* корреляционной зависимости, или параметра, по которому задаются ограничения при определении типа объектов.

6. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

6.1. Лабораторная работа «Математическая обработка и статистический анализ изображения поверхности»

Цель: изучение методов цифровой обработки сканов поверхности (медианная и фурье-фильтрация, изменение палитры и др.), полученных методами СЗМ, с целью улучшения качества изображения, а также методик анализа изображений (фрактального и морфологического) и определения параметров шероховатости поверхности.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя файлы сканов образцов для обработки и анализа. Сохранить их в отдельной папке.
2. Запустить на компьютере программу «Master Scan».
3. Изучить порядок работы с контекстной справочной системой (кнопка «?» на панели инструментов).
4. Открыть в программе файл с анализируемым сканом (кнопка «Open 2D file») и получить изображение поверхности в 2D-окне. Вырезать при необходимости фрагмент изображения для дальнейшей работы и сохранить его в отдельном файле.
5. Провести медианную и фурье-фильтрацию изображений (кнопки «Median Filtering» и «Fourier Transform FFT» на панели инструментов) с целью улучшения качества изображения в 2D-окне и установить их оптимальные параметры. Сравнить эффективность применения этих двух методов фильтрации. При необходимости провести специальную фильтрацию (кнопка «Special Filtering» на панели инструментов) для устранения наклона и изгиба поверхности, а также контрастировать изображение и настроить палитру по интересующему участку изображения (кнопки в 2D-окне). Проанализировать целесообразность применения других видов математической обработки изображений. Оптимизированные изображения сохранить в отдельных файлах.
6. Изменяя направление освещения и наклон получить наиболее наглядное 3D-изображение поверхности.
7. Вывести профиль наиболее характерного участка поверхности (кнопка «Section Roughness») и определить в зависимости от исследуемой поверхности размеры зерен и их высоту, геометриче-

ские характеристики пор, ширину и глубину царапин и т.п. Найти шероховатость поверхности (кнопка «Area Roughness»).

8. Провести фрактальный анализ поверхности образца (кнопка «Area Fractal Dimension») до и после математической обработки изображения. Сравнить их между собой. Определить на основании этого анализа размер зерен и (или) других объектов, а также полную поверхность выделенного участка поверхности и его фрактальную размерность.

9. Провести фрактальный анализ наиболее типичного сечения поверхности (кнопка «Section Fractal Dimension») и определить его фрактальную размерность. Сравнить результаты фрактального анализа поверхности и его сечения.

10. С помощью фрактального анализа по направлениям (кнопка «Direction Fractal Dimension») определить существует ли направленность в расположении и ориентации объектов поверхности.

11. Провести полный морфологический анализ поверхности (кнопка «Objects Processing»). Для этого с помощью автоматического выделения объектов по высоте профиля (или его градиенту) и (или) его графического редактирования сформировать список анализируемых объектов (зерен, пор, выделений вторых фаз и т.п.). Количество выделенных объектов должно допускать их статистическую обработку. В зависимости от типа объектов выбрать их характеристику X (диаметр, площадь, характеристики асимметрии и направленности и т.п.) и построить гистограмму распределения, из которой при необходимости удалить нетипичные классы объектов.

12. В зависимости от исследуемого образца и цели анализа выбрать характеристику Y для построения корреляционной зависимости $Y(X)$, построить эту зависимость и определить ее параметры. При необходимости удалить из рассмотрения лишние объекты. Сделать заключение по результатам исследования корреляции.

13. Составить отчет по проведенным исследованиям.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- изображения 2D-окон анализируемого скана на различных этапах математической обработки;
- заключение об эффективности применения медианной и фуры-фильтрации изображения и других видов обработки;

- оптимизированное 3D-изображение;
- результаты анализа шероховатости поверхности, фрактального (графики, значения величин полной поверхности и фрактальной размерности, заключение о фрактальности поверхности) и морфологического (изображение выделенных объектов, средние значения их геометрических характеристик, гистограммы распределения объектов по выбранным характеристикам, корреляционные зависимости) анализов поверхности;
- окончательное заключение по результатам всех видов статистической обработки о геометрических размерах, форме и характере распределения объектов (зерен, пор, царапинах, выделениях и т.п.) на поверхности.

Контрольные вопросы

Вопросы входного контроля

1. Для чего применяют дополнительную математическую обработку изображений в СЗМ?
2. Перечислите виды математической обработки изображений, полученных методами СЗМ.
3. Перечислите виды статистической обработки изображений, полученных методами СЗМ.
4. Может ли математическая обработка АСМ-кадров влиять на результаты фрактального и морфологического анализов?

Вопросы выходного контроля

1. Какие виды математической обработки и статистического анализа изображений имеются в программном обеспечении микроскопа СММ-2000?
2. Какие виды дополнительной математической обработки кадров в той или иной степени дублируют функции математической обработки изображения в процессе сканирования?
3. В чем заключается алгоритм медианной фильтрации изображения, и какие ее параметры знаете?
4. От каких дефектов изображения позволяет избавиться медианная фильтрация?
5. Перечислите последовательность операций, которые выполняются при фурье-фильтрации изображения.

6. От каких дефектов изображения позволяет избавиться медианная фильтрация?

7. Изображения каких размеров могут подвергаться фурье-обработке?

8. Как отражается наличие периодически расположенных структурных составляющих или дефектов изображения на фурье-образе изображения?

9. Что представляет из себя фурье-образ идеальной плоскости?

10. Приведите пример фрактальной поверхности.

11. Что характеризует фрактальная размерность кривой (поверхности)?

12. Какую информацию о поверхности можно получить с помощью фрактального анализа?

13. Как с помощью фрактального анализа можно определить площадь поверхности?

14. Какие характеристики определяются при морфологическом анализе объектов поверхности?

15. Какой алгоритм используется программой обработки объектов при вычислении их диаметра (длины, ширины, асимметрии)?

16. Придумайте примеры использования корреляционных зависимостей характеристик объектов поверхности для качественного и количественного описания морфологических особенностей поверхности.

6.2. Лабораторная работа «Исследование топологии поверхности методом АСМ»

Цель: получение оптимизированного изображения поверхности образца на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 в режиме контактной атомно-силовой микроскопии, а также анализ топологических и морфологических особенностей структурно-фазовых составляющих образца.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством сканирующего зондового микроскопа СММ-2000. Локализовать следующие элементы: пьезосканер (держатель) образца, ползун, три стойки на ползуне с шариками и ХУ-сканерами, АСМ-столик с пятиконтактным штекером. На АСМ-столике найти кантилевер, его держатель, три опоры, лазер, систему зеркал, четырехсегментный фотодетектор, четыре винта для оптической юстировки.

2. Ознакомиться с устройством оптического микроскопа МБС-10 и органами его управления.

3. Подготовить микроскоп к работе, для чего установить кантилевер в АСМ-столик (если необходимо), закрепить образец на держателе, установить АСМ-столик на стойки, настроить АСМ-столик (если проводилась замена кантилевера, то необходимо провести полную регулировку столика четырьмя винтами, если нет – достаточно только отрегулировать значение $F(nN)$ винтом 4), выбрать область и параметры сканирования, подвести иглу к образцу.

Примечания: операции установки образца и столика проводятся при выключенном питании микроскопа (т.е. выключенном окне управления микроскопом «SMM-2000N Control Panel»); при длительных простоях питание лазера (штекер) необходимо отключать.

4. Провести сканирование кадра и при необходимости оптимизировать качество изображения, изменяя параметры сканирования и проводя математическую обработку кадра (включением кнопок «М», «Т», «S»). При оптимизации сохранять кадры в файлах (если есть существенные улучшения качества).

5. Изменением увеличения (размера кадра) и назначением новой рамки получить наиболее характерный и информативный 2D-кадр. Получить трехмерный вид кадра.

6. Провести повторное сканирование без выбора новой рамки и после получения нового 2D-кадра сравнить его с предыдущим.

7. Провести математическую обработку полученного изображения с целью улучшения его качества.

8. Вывести профиль наиболее характерного участка поверхности и определить размеры структурных составляющих образца. Определить шероховатость поверхности.

9. С учетом специфики образца провести морфологический и фрактальный виды анализа кадра. Выявить основные структурные объекты анализируемого образца, построить гистограммы их распределения по размерам и определить средние значения геометрических характеристик этих объектов.

10. Проанализировать возможность наблюдения артефактов на полученных сканах.

11. Оформить отчет о работе.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- исходные данные к исследованному образцу (материал, метод получения, обработка поверхности и т.п.);
- изображения 2D-окон неоптимизированных и оптимизированных кадров с указанием параметров сканирования и методов математической обработки при сканировании;
- наиболее характерный и информативный 2D-кадр и его трехмерное представление;
- изображение 2D-окна кадра, подвергнутого дополнительной математической обработке с целью улучшения качества и выделения характерных объектов (с указанием методов и параметров обработки);
- профиль наиболее характерного участка поверхности и размеры структурных составляющих образца;
- результат измерения шероховатости поверхности;
- результаты фрактального и морфологического (изображение выделенных объектов, средние значения их геометрических характеристик, гистограммы распределения объектов по размерам) анализа поверхности;
- анализ возможных артефактов на изображениях;
- заключение.

Контрольные вопросы

Вопросы входного контроля

1. Как работает атомно-силовой микроскоп в контактном режиме? Что такое режим постоянной силы?
2. Перечислите основные технические характеристики и возможности микроскопа СММ-2000.
3. Назовите и покажите основные конструктивные элементы микроскопа СММ-2000.
4. Что представляет собой кантилевер?
5. Какие параметры сканирования существенно влияют на время съемки кадра?
6. Какова максимальная область сканирования микроскопа СММ-2000?
7. Требуется ли предварительная подготовка поверхности образца?
8. Назовите основные этапы подготовки микроскопа к работе в режиме АСМ и получения изображения.
9. Как включается электрическое питание микроскопа, и какие операции подготовки микроскопа к работе проводятся с выключенным питанием?

Вопросы выходного контроля

1. Какие образцы можно исследовать с помощью атомно-силового микроскопа? Перечислите принципиальные отличия по возможностям АСМ и СТМ.
2. В чем заключаются пьезо- и крип-эффект пьезокерамики? Приведите примеры пьезокерамических материалов.
3. Что представляет собой трубчатый пьезосканер?
4. В чем заключается роль обратной связи при работе в режиме постоянной силы в контактной АСМ?
5. Перечислите основные параметры сканирования и объясните их влияние на время съемки и качество изображения.
6. Какие функции обработки кадра можно использовать в микроскопе в процессе съемки? В каких случаях такая обработка наиболее эффективна для оптимизации качества изображения?
7. В каких случаях целесообразно применять фильтрацию изображения? Приведите примеры.

8. Перечислите основные причины наблюдения артефактов на изображении. Приведите примеры.

9. Как определить полную поверхность выделенного участка?

10. Какую информацию о структурно-фазовых составляющих образца можно получить с помощью морфологического и фрактального анализов изображения?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов Б.А. Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия: Пособие по работе на микроскопе СММ-2000. М.: МИФИ, 2008. 224 с.

2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.

3. Елманов Г.Н., Логинов Б.А. Исследование топологии поверхности методом сканирующей туннельной микроскопии: Лабораторный практикум. М.: МИФИ, 2008. 48 с.

4. Физическое материаловедение: Учебник для вузов./ Под общей ред. Б.А. Калина. Том 3. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов. М.: МИФИ, 2007. 808 с.

Геннадий Николаевич Елманов

Борис Альбертович Логинов

Олег Николаевич Севрюков

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Лабораторный практикум

Редактор М.В. Макарова

Подписано в печать 15.11.2011. Формат 60х84 1/16.

Печ.л. 4,0 Уч.-изд.л. 4,0 Тираж 100 экз.

Изд. № 3/9. Заказ № 71

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31.

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42