Методы обработки и интерпретация изображений сканирующей зондовой микроскопии.

1. Введение.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – набор мощных методик исследования локальных свойств поверхности, таких как особенности рельефа, магнитные свойства, локальные емкость и проводимость поверхности. Отличительной особенностью этих методик является их высокое разрешение, достигающее атомарного. Современные научные и технологические процессы в электронике, фотонике и других областях, связанные с модификацией свойств поверхности, нанесением тонких пленок, формированием наноструктур, сложно представить без СЗМ контроля на всех этапах процесса.

Исторически первым в семействе сканирующих зондовых микроскопов был изобретен сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). В современном виде его разработали швейцарские ученые Герд Биннинг и Генрих Рорер в 1981 г. (Нобелевская премия по физике 1986 года, совместно с Э. Руском за изобретение просвечивающего электронного микроскопа).

Широкое признание эта методика приобрела после получения изображений поверхностей с атомарным разрешением, в частности, реконструированной поверхности кремния.



Рис. 1. СТМ изображение реконструированной поверхности кремния (7х7) Si (111).

Вслед за сканирующим туннельным микроскопом за короткое время появились родственные методики - атомно-силовая микроскопия (ACM), магнитосиловая микроскопия (MCM), ближнепольная оптическая микроскопия (БОМ), микроскопия зонда Кельвина и др. Все эти методики в настоящее время активно развиваются, являясь одновременно как инструментом измерений, так и объектом исследований. В частности, совершенствуется элементная база зондовых микроскопов, определяются условия проведения измерений, позволяющие получить наиболее репрезентативные изображения, исследуются методы обработки изображений и борьбы с артефактами.

В данной работе рассматриваются основы интерпретации изображений, полученных на атомно-силовом микроскопе. Практические задания посвящены получению качественного и количественного описания рельефа поверхности по данным ACM-сканов.

2. Принципы работы сканирующего зондового микроскопа.

Несмотря на многообразие видов зондовых микроскопов и измеряемых ими характеристик, в основе зондовых методик лежат схожие принципы. Локальные свойства поверхности определяются с помощью специальным образом изготовленных зондов в виде игл. Острие такого зонда имеет радиус закругления порядка десяти нанометров, при работе микроскопа оно находится на расстоянии 0,1 - 10 нм от поверхности. Для получения изображения некоторой области поверхности зонд перемещается вдоль нее, формируя развертку по строкам.В каждой точке развертки фиксируется значение некоторой величины, характеризующей свойства поверхности - это может быть значение туннельного тока на зонд в СТМ, характеристика силового воздействия на зонд в АСМ или МСМ, значение оптической амплитуды и фазы в БОМ. Измеренные значения формируют матрицу величин, которая и представляет собой изображение области поверхности.



Рис. 2. Формирование изображения при перемещении зонда по поверхности образца.

Как мы видим, острие зонда микроскопа движется в непосредственной близости от поверхности, и точность, с которой задается его положение, требуется поддерживать на уровне десятых долей ангстрема. Поэтому одним из стабильность условий получения качественного изображения является измерительной системы микроскопа по отношению к внешним воздействиям. Это накладывает жесткие требования на размещение микроскопа. Прежде всего, помещение, в котором находится прибор, должно быть изолировано от внешних вибраций. Сам прибор чаще всего размещают на пневматическом виброизолирующем столе или массивной плите. Поскольку их собственные частоты составляют единицы герц, к прибору пройдут лишь воздействия внешних колебаний с такими частотами. Колебания с частотами порядка десятков и сотен килогерц, близких к частотам, на которых работает сканирующая система микроскопа, эффективно отфильтруются. С аналогичной целью применяются системы активной виброизоляции, представляющие собой электромеханические системы с отрицательной обратной связью, которая поддерживает неизменным положение виброизолирующей платформы с микроскопом.

Для защиты от акустических шумов, которые приводят к колебаниям острия зонда относительно образца, используют защитные колпаки над сканирующей частью микроскопа. Наиболее эффективным средством является создание вакуума внутри такого колпака.

Кроме того, к нестабильности положения зонда может привести изменение температуры окружающей среды. Поэтому важным условием проведения качественных измерений является поддержание в помещении неизменной температуры и отсутствие в нем потоков воздуха. Кроме того, для компенсации термодрейфа элементы измерительной конструкции изготавливают из материалов с разными коэффициентами теплового расширения таким образом, чтобы суммарное тепловое расширение в различных плечах конструкции не приводило к изменению относительного расположения зонда и образца.

Итак, после того, как микроскоп размещен с учетом негативного влияния всех возможных внешних воздействий, можно переходить к измерениям. Первоначальное, грубое позиционирование образца, закрепленного на столике, осуществляется с помощью системы микрометрических винтов, управляемой вручную или с помощью контроллера. Для точного позиционирования и последующего формирования развертки при получении изображения обычно используется пьезокерамический сканер. Для определенности далее будем говорить о системе сканирования образцом (то есть игла зафиксирована, а образец перемещается относительно нее) с трубчатым сканером. В этом случае иголка зонда располагается на неподвижном держателе. Исследуемый образец размещается на столике, который, в свою очередь, закреплен на торце пьезокрамической трубки. На внутреннюю и внешнюю цилиндрические поверхности трубки наносятся электроды (рис. 3), а материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации. Подавая на каждый из внешних определенное напряжение относительно внутреннего, можно электродов управлять изгибом трубки, приводящим "квазигоризонтальному" К

перемещению ее верхнего торца вместе со столиком, или ее удлинением/сокращением, приводящим к вертикальному перемещению.



Рис. 3. Внешний вид и принцип работы трубчатого пьезокерамического сканера.

Основными недостатками такой системы являются:

- неплоскостность перемещения образца, которая возникает из-за того, что при изгибной деформации трубки ее торец вместе с образцом движется не строго горизонтально, а по поверхности сферы. Таким образом, при слишком больших размерах сканируемой области (критерий "большой размер" в данном случае определяется геометрическими параметрами конкретного сканера) может возникнуть эффект вогнутости или выпуклости поверхности.
- Крип пьезокерамики (*creep* ползучесть) проявляется как запаздывание реакции пьезоэлемента на управляющее поле. Этот

эффект может особенно сказываться при перемещении сканера в заданную исходную точку. Для устранения негативного влияния используют временные задержки.

 Гистерезис пьезокерамики приводит к тому, что при одинаковых управляющих напряжениях острие зонда оказывается в различных точках относительно образца в зависимости от направления движения. Поэтому при измерении рельефа регистрация информации обычно осуществляется только при прямом движении зонда вдоль строки и не осуществляется при возврате зонда вдоль этой строки.

Устройство зондов и физику их взаимодействия с поверхностью рассмотрим на примере АСМ. Зондовый датчик атомно-силового микроскопа представляет собой упругую балку – кантилевер – с зондом в виде острой иглы на конце (рис. 4). Радиус закругления острия обычно составляет 1 - 50 нм. В атомно-силового рассматриваемой конфигурации микроскопа co сканированием образцом острие расположено зонда неподвижно над исследуемой поверхностью. По мере приближения образца к острию между ними начинают действовать силы, вызывающие изгиб балки. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.



Рис. 4. Изображение атомно-силового зонда в сканирующем электронном микроскопе.

Силовое взаимодействие зонд-поверхность в отсутствие дополнительных возмущений (таких как электрический заряд на образце или адсорбированный на его поверхностиводяной пар, вызывающий прилипание) можно описать на основе сил Ван-дер-Ваальса. Эти силы хорошо аппроксимируются потенциалом Леннарда-Джонса. Для двух атомов, находящихся на расстоянии *r*:

$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 + \left(\frac{r_0}{r}\right)^{12} \right\}.$$
 (1)

Первое слагаемое соответствует притяжению, вызванному дипольдипольным взаимодействием атомов, а второе соответствует отталкиванию атомов на малых расстояниях. U_0 - глубина потенциала, r_0 соответствует равновесному расстоянию. Силу взаимодействия зонда (*probe*) и образца (*surface*) можно получить, разбивая каждый из них на элементарные объемы dV'и dV с плотностью атомов $n_p(r')$ и $n_s(r)$ соответственно и интегрируя по всему пространству:

$$W_{ps} = \int_{V_p V_s} U_{LD}(r - r') n_p(r') n_s(r) dV dV', \qquad \overrightarrow{F_{ps}} = -grad (W_{ps}) \qquad (2)$$

Полученная сила имеет составляющую, направленную перпендикулярно поверхности и вызывающую изгибные деформации кантилевера, и латеральную составляющую, приводящую к деформации кручения.



Рис. 5. Вид силы взаимодействия между зондом и поверхностью и выбор рабочей точки (высоты положения зонда) при полуконтактном режиме проведения измерений.

Эти малые деформации регистрируют с помощью оптической системы. Принцип ее работы заключается в том, что излучение лазера фокусируется на кончике кантилевера, а отраженный от него луч попадает в центр четырехсекционного полупроводникового фотоприемника. При изгибе кантилевера луч отклоняется от центра приемника. Регистрируя ток с каждой из секций, можно определить величину деформации кантилевера.Если ΔI_i – отклонение текущего значения тока через *i*-ю секцию от равновесного, то величина $I_z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4)$ будет пропорциональна изгибу балки под действием нормальной составляющей, а величина ($\Delta I_1 + \Delta I_4$) – ($\Delta I_2 + \Delta I_3$) – деформации кручения под действием латеральных сил.



Рис. 6. Деформация изгиба и деформация кручения кантилевера. Лазерная система регистрации деформаций.

Условно методики регистрации изображений с помощью АСМ можно разделить на две группы: контактные квазистатические и бесконтактные колебательные. В первом случае зонд постоянно находится на столь малом расстоянии от поверхности, что на него действует только сила отталкивания, соответствующая левой части графика зависимости потенциала сил от расстояния. Его положение определяется равновесием между этой силой отталкивания и силой упругой деформации кантилевера, прижимающей зонд к поверхности. При этом во время перемещения зонда вдоль строки система обратной связи, использующая в качестве входного параметра разностные токи с фотодиода и подающая пропорциональное им значение на *z*-составляющую напряжения сканера, поддерживает постоянной либо величину деформации кантилевера, то есть силу отталкивания, либо среднюю высоту зонда над поверхностью. Это, соответственно, либо режим постоянной силы, либо режим постоянной высоты. В первом случае распределение высот отражает *z*составляющая напряженияна сканере. Во втором случае распределение силы (часто считается, что оно коррелирует с распределением высоты, хотя, вообще говоря, это не так) соответствует изменению *I*_z на фототиоде. Последний режим применим только на поверхностях с малыми перепадами высот – не более нескольких ангстрем.

Недостатком контактных методик является то, что зонд постоянно воздействует на поверхность. Несмотря на то, что для их реализации используют зонды с небольшой жесткостью, такое воздействие приводит к быстрому изнашиванию зонда и зачастую к разрушению поверхности. Рельеф мягких материалов, например, органических веществ, в контактном режиме исследовать невозможно.

Для понимания принципа работы бесконтактных методик рассмотрим колебания зонда под действием вынуждающей силы вблизи поверхности. Вынуждающую силу обеспечивает пьезокристалл, расположенный в основании держателя кантилевера, за счет подаваемого на него периодического напряжения. Пусть он совершает колебания по высоте с частотой ω :

 $u(t)=u_0 cos(\omega t)$. В качестве модели кантилевера используем упругую балку с жесткостью k и массой, m, сосредоточенной на одном ее конце. Силу, действующую между зондом и поверхностью, для малых колебаний можно записать в виде

$$F_{ps} = F_{ps\,0} + \frac{\partial F}{\partial z}(z_0) \cdot z(t) \tag{3}$$

Тогда вводя в уравнении колебаний

$$m\ddot{z} = -k(z-u) - \gamma \dot{z} + F_0 + F_{ps\,0} + F'_z z$$

новые переменные $z = z + (F_0 + F_{ps 0})/k$, приходим к уравнению

$$m\ddot{z} + \gamma \dot{z} + (k - F'_z) \cdot z = ku_0 \cos \omega t .$$
⁽⁴⁾

Здесь γ – коэффициент, описывающий диссипацию, например, за счет трения о воздух, F_0 – сила тяжести и другие постоянные силы. То есть наличие градиента силы приводит к изменению эффективной жесткости системы.

Отыскивая решение в виде $ae^{-i\omega t}$, получим модуль комплексной амплитуды, то есть амплитудно-частотную характеристику системы, в виде

$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0^2}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'}{m}\right)^2 + \frac{\omega_0^2 \omega^2}{Q^2}}}$$
(4)

и фазу комплексной амплитуды, то есть фазо-частотную характеристику, в виде

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\left[\frac{\omega\omega_{0}}{Q\left(\omega_{0}^{2} - \omega^{2} - \frac{F'}{m}\right)}\right]$$
(5)

где $Q = \omega_0 m / \gamma$ – добротность системы.

Таким образом, наличие градиента силы приводит к сдвигу АЧХ и искажению ФЧХ.



Рис. 7. Изменение АЧХ и ФЧХ в присутствии градиента сил. ω_{rd} - резонансная частота в системе с диссипацией, ω_{rf} - резонансная частота в присутствии внешней силы, ω^* - точка перегибы ФЧХ.

Ha практике используется полуконтактный чаше всего режим сканирования (рис. 5). В этом случае часть периода острие зонда находится в области отталкивания на потенциальной кривой, и внешнюю силу уже нельзя разложить в ряд по малым *z*. Однако сдвиг частоты АЧХ по-прежнему определяется степенью взаимодействия между зондом и поверхностью. Искажение фазовой кривой определяется энергией диссипативного взаимодействия. Преимущество полуконтактного режима заключается в том, что зонд не так сильно воздействует на образец, как в контактном, но и не требуется такая высокая чувствительность и устойчивость в работе обратной связи, как в бесконтактном.

Регистрация рельефа в полуконтактном режиме происходит следующим образом. На пьезокристалл в основании кантилевера подается напряжение на собственной частоте кантилевера, вызывающее колебания зонда с амплитудой A_0 (соответствующей измеряемой амплитуде разностного тока фотодиода I_{z0}). Затем острие зонда подводится к поверхности (или, точнее, в нашей системе сканирования образцом поверхность подводится к острию). При этом амплитуда колебаний уменьшается до значения A. Во время сканирования обратная связь поддерживает постоянной эту амплитуду – то есть значение z напряжения на пьезосканере пропорционально высоте рельефа в данной точке.

Одновременно фиксируется фазовый контраст, дающий дополнительную информацию о свойствах образца, например, распределение по поверхности материалов с разной жесткостью.



Рис. 8. АСМ изображение в полуконтактном режиме: амплитудный и фазовый контраст.

3. Методы обработки и интерпретации изображений СЗМ.

Прежде всего, отметим, что в атомно-силовом микроскопе нет линейки, которая позволила бы напрямую измерить нанометровые перемещения зонда. Реально измеряется ток через секции фотодиода и напряжения в петле обратной связи сканера. Чтобы перевести эти токи или напряжения в отсчеты высоты или продольной координаты, осуществляют калибровку сканера, измеряя образцы с хорошо известным рельефом. Поскольку со временем параметры прибора могут уходить от начальных значений, рекомендуется проверять, не отклоняются ли измеренные параметры тестовых структур от номинальных, и учитывать отклонения если не аппаратно на этапе получения изображений, то хотя бы программно при их обработке.

Для калибровки отсчетов высоты обычно сканируют структуру в виде прямоугольных полосок известной высоты, строят гистограмму распределения отсчетов высоты и по двум пикам этой гистограммы, соответствующим дну между полосками и верхней плоскости полосок, определяют их измеренную высоту.

Для калибровки горизонтальной координатной оси осуществляют, например, преобразование Фурье изображения такой структуры, определяя измеренные пространственные моды.

Рассмотрим теперь наиболее распространенные **артефакты**, возникающие при атомно-силовом исследовании топографии. Зачастую эти артефакты существенно уменьшают репрезентативность изображения, искажают представление о рельефе поверхности и приводят к значительным неточностям при определении его количественных характеристик.

1. Постоянный наклон изображения чаще всего возникает из-за того, что практически невозможно расположить исследуемую плоскость образца с такой точностью, чтобы обеспечить горизонтальность на уровне высоты в десятки нанометров (характерная высота рельефа) на базовой длине в микроны (характерная длина строки скана). Несложно оценить, что такая точность соответствует очень небольшому углу, около 0,5°. Тем не менее, даже при такой точности, если нас интересуют особенности рельефа величиной в несколько нанометров, они могут полностью потеряться на фоне перепада высот между противоположными краями скана. Вместо излишних усилий по позиционированию поверхности, при не слишком больших углах наклона применяют процедуру математического вычитания средней наклонной плоскости из изображения.



Рис. 9. Слева – трехмерная модель тестовой структуры, построенная по исходному изображению, справа - она же после вычитания вклада от наклонной плоскости.

2. За счет того, что верхний торец сканера вместе с образцом реально перемещается не в плоскости, а по поверхности сферы (а иногда и по более порядка), изображение поверхности высокого может представлять собой суперпозицию поверхности второго или более высокого порядка с реальным распределением высот. Для устранения эффекта осуществляют изображения этого вычитание ИЗ аппроксимирующей поверхности.



Рис. 10. Слева - исходное изображение, справа - оно же после вычитания вклада от поверхности второго порядка.

3. Многочисленные и неизбежные шумы можно условно разделить на две группы. Высокочастотные – это шумы в управляющей аппаратуре и высокочувствительном измерительном тракте, нестабильность контакта зонд-образец, внешние акустические и вибрационные шумы – близки к частоте набора точек в одной строке и поэтому содержатся в основном в строках. Их можно частично удалить, применяя математическую обработку изображения, например, медианную фильтрацию или Фурьефильтрацию (математическую реализацию этих функций см. в [2]).



Рис. 11. Слева - исходное изображение и его профиль вдоль горизонтальной линии, отмеченной красным, справа - оно же после медианной фильтрации и соответствующий профиль. Обратите внимание на различный масштаб высоты слева и справа.

Частота набора строк в сотни раз меньше, чем частота набора точек, поэтому низкочастотные шумы практически незаметны на протяжении приводят к изменению одной строки, но высоты строк друг относительно друга. Причиной этому могут служить, например, плавное изменение образцом высоты зонда над результате В термодрейфа, или захват зондом микрочастицы процессе В сканирования и, как результат изменение его собственной частоты, дающее горизонтальную «ступеньку» на изображении. Избавиться от таких артефактов можно с помощью процедуры выравнивания кадра по строкам.





Рис. 12. Слева - исходное изображение, справа - оно же после выравнивания по строкам.

4. Следующая группа искажений связана с конечностью размеров зонда и особенностями его формы. В том случае, когда на поверхности находятся выступы (например, сферические наночастицы), латеральный размер которых сопоставим с поперечными размерами зонда, на изображении эти выступы будут выглядеть более широкими по сравнению с реальными выступами. Кроме того, поскольку зонд никак не может «заглянуть» под нижнюю поверхность сферы, она также отобразится в виде выступа. Аналогично, могут заужаться углубления. В принципе, форму отдельно стоящих выступов или углублений можно восстановить, поскольку по сути получаемое изображение рельефа

является сверткой реального рельефа с функцией, описывающей форму зонда. Однако для осуществления процедуры численной деконволюции нужно знать точную форму зонда при минимальном количестве шумов.



Рис. 13. Путь вершины зонда при сканировании выступа и углубления. Измеряемая ширина, соответственно, оказывается завышенной или заниженной.

Кроме того, что даже хороший зонд никогда не бывает идеально тонким, довольно часто зонды изнашиваются или ломаются. В этом случае на изображении может возникать повторяющийся рисунок треугольной формы (в случае треугольного сечения зонда). Если зонд сломан несимметрично, это проявится как несимметричное отображение изначально симметричных объектов, например, как завал одной из стенок прямоугольного углубления.



Рис. 14. Изображение вершины изношенного зонда в электронном микроскопе и изображение наносфер, полученное этим зондом.

5. Некоторые артефакты связаны с особенностями работы сканера, и должны устраняться уже на этапе сканирования тщательным подбором настроек прибора, поскольку в дальнейшем их устранить будет сложно или невозможно. В качестве примера приведем выбросы на фронтах выступов или впадин, появляющиеся в результате гистерезиса реакции пьезокерамики на управляющее напряжение в вертикальном направлении. Кроме того, при слишком большой горизонтальной скорости сканирования при малом коэффициента обратной связи зонд не успевает опуститься на резких границах впадин. Это приводит к плавным затянутым спускам на месте резких провалов.



Рис. 15. АСМ изображение тестовой решетки и его профиль вдоль горизонтальной линии. На профиле видны выбросы из-за гистерезиса сканера.

6. Наконец, очень часто искажения вносятся при неумелой обработке изображений. Например, прямое использование процедуры выравнивания по строкам приведет к тому, что из каждой строки будет вычтено среднее значение по этой строке. Если в некоторой области изображения есть выступы достаточно большой высоты, эти выступы завысят вычитаемое среднее значение высоты соответствующих строк, и строки покажутся «вдавленными». В этом случае из области, по отсчетам высоты которой осуществляется выравнивание, эти выступы нужно исключать.



7.

Рис. 16. Исходное изображение наночастиц, оно же после выравнивания по строкам, оно же после выравнивания по строкам с исключенной областью, в которой расположены наночастицы.

Чрезмерно старательное использование фильтров приводит к удалению из изображения деталей вместе с шумами. Так, при неправильном

выборе окна фильтра Фурье-обработка может удалить реально существующие гармоники. В целом, можно утверждать, что если на изображении совсем нет шума, скорее всего, оно слабо связано с действительностью.

8. Многие артефакты проще всего выявляются в процессе сканирования. Проверить, связаны ли волны на изображении с интерференцией излучения от неточно отъюстированной лазерной системы, или они реально имеются на поверхности, можно повернув образец и повторив набор данных. Строго горизонтальные структуры могут говорить о нестабильности строк – и если поменяв направление развертки с построчной на постолбцовую мы увидим, что поменялось и направление структур – значит, в действительности их нет.

Сделать изображение более репрезентативным позволяют стандартные функции программ обработки данных, такие как увеличение локального контраста (как правило, в ущерб соблюдению глобального масштаба высот), использование логарифмического масштаба, поиск градиентов, граней и краев различными методами. Следует помнить, что такие процедуры могут сделать изображение нагляднее, но если они меняют данные, полученные при ACMсканировании, то количественный анализ измененных данных станет невозможным. Кроме того, они также могут привести к появлению артефактов обработки – таких, как кажущаяся зернистость на изображении f рис. 17.



Рис. 17. Примеры презентаций изображений: (а) реальные данные, (b) затенение, (c) вертикальный градиент Превитта, (d) поиск краёв Канни, (e) поиск краёв по локальной нелинейности, (f) улучшение локального контраста.

Для количественного анализа изображений в программе обработки данных сканирующей микроскопии также предусмотрен богатый набор функций. Так, чтобы получить высоту ступеньки (например, атомарной) можно построить сечение изображения вдоль выбранной линии, перпендикулярной ступеньке, а потом аппроксимировать его ступенчатой функцией. Функции определения островков (например, на изображении одного из этапов роста островковой пленки) позволяют быстро построить распределения зерен по площади, высоте и т.д. Для описания пространственных периодичностей их частот используют двумерное преобразование Фурье, вейвлет анализ, автокорреляционное преобразование. Гладкость поверхности характеризуется значением средней или среднеквадратичной шероховатости:

$$S_{a} = \frac{1}{N_{x}N_{y}} \sum_{j=1}^{N_{y}} \sum_{i=1}^{N_{x}} |Z_{ij}|$$
$$S_{q} = \sqrt{\frac{1}{N_{x}N_{y}}} \sum_{j=1}^{N_{y}} \sum_{i=1}^{N_{x}} Z_{ij}^{2}$$

4. Программа обработки данных Gwyddion

Gwyddion – модульная программа анализа данных сканирующей зондовой микроскопии, разработка которой координируется Чешским институтом метрологии. При запуске программы появляется окно, содержащее набор меню и несколько групп кнопок, связанными с обычными функциями или инструментами.



Рис. 18. Главное окно, окно данных и браузер данных программы Gwyddion.

В меню функции сгруппированы следующим образом:

Файл – команды, связанные с открытием и сохранением данных, в том числе, импортом и экспортом.

Правка – команды отмены или повтора операции, а также выбора цветов палитры или маски.

Обработка данных – строится из всех модулей работы с двумерными данными (собственно, изображениями), доступных программе. Это меню, вместе с панелью кнопок инструменты, содержит большую часть команд, которые могут понадобиться дляанализ данных СЗМ.

График – аналогично предыдущему меню, но используется для работы с одномерными данными, такими как сечения изображений. В частности, команды этого меню позволяют аппроксимировать графики набором функций.

Объемные данные – аналогично меню Обработка данных, но содержит функции для работы с трехмерными массивами данных. Это могут быть, например, результаты спектроскопии, проведенной в каждой из точек поверхности.

Информация – команды, позволяющие просмотреть информацию о программе и ее модулях. Кроме того, в этом меню находится команда включения браузера данных для обзора всех изображений, имеющихся в текущем проекте.

Группы кнопок главного окна программы:

Вид – функции масштабирования и включения трехмерного отображения данных.

Обработка данных и *График* – избранные функции соответствующих меню. Как правило, при доступе к этим функциям из меню можно выбрать большее количество параметров их работы, чем при доступе с панели кнопок.

Инструменты – функции, напрямую работающие с информацией в Окне данных. Эти функции доступны только с этой панели кнопок.

Запуск некоторых полезных функций:

Вычитание плоскости – с панели кнопок *Обработка данных* или через меню *Обработка данных* \rightarrow *Выравнивание* \rightarrow *Вычесть плоскость*.

Вычитание поверхности более высокого порядка – с панели кнопок Обработка данных или через меню Обработка данных → Выравнивание → Полиномиальный фон.

Выравнивание строк – с панели кнопок *Обработка данных* или через меню *Обработка данных* \rightarrow *Исправить данные* \rightarrow *Выровнять строки*.

Редактирование маски (например, для того, чтобы исключит область под маской при выравнивании строк) - с панели кнопок *Инструменты*.

Матричные (локальные) фильтры (медианный, гауссов и т.д.) – с панели кнопок Инструменты.

Интегральные фильтры (например, Фурье – БПФ, быстрое преобразование Фурье) – через меню *Обработка данных* \rightarrow *Интегральные преобразования*.

Для того, чтобы удалить с изображения локальные искажения (например, явно лишнюю наночастицу на поверхности), можно заменить область под маской на решение уравнения Лапласа с граничными условиями, заданными данными на границу маски. Доступ к функции с панели Обработка данных или через меню Обработка данных \rightarrow Исправить данные \rightarrow Удалить данные под маской.

Построение профиля вдоль заданной линии панели -cкнопок Обработать Инструменты. построенный профиль, например, аппроксимировать профиль заданной ступенчатой или иной функцией и определить подгоночные коэффициенты, можно с помощью кнопок из группы График или команд соответствующего меню.

Гистограммы распределения отсчетов высоты (а также наклонов, одномерные функции спектральной плотности мощности (ФСПМ), автокорреляции и т.д.) – кнопка*Рассчитать одномерные статистические функции*и панели Инструменты.

Функции работы с зернами и островками на поверхности – в меню Обработка данных → Зерна.

Функции, позволяющие улучшить репрезентативность изображения, находятся в меню *Обработка данных* → *Презентация*. Полезна в этом плане и кнопка*Растянуть диапазон цветов* на панели *Инструменты*.

5. Упражнения.

Почти все изображения, рассматриваемые в задаче, были получены при сканировании различных структур. Искусственно сгенерировано только одно из них. Во всех упражнениях на изображениях присутствуют загрязнения, искажения и артефакты различного происхождения. При сдаче задачи каждый из сканов нужно представить в обработанном, удобном для восприятия виде.

Далеко не все функции, перечисленные в описании, могут быть полезны при обработке изображений, и далеко не все полезные функции упомянуты в описании.

Упражнение 1. Калибровка сканера.

Калибровка отсчетов высоты осуществляется с помощью файла 1.1. В нем представлено изображение калибровочного образца. Номинальная высота прямоугольных выступов составляет 22 нм. Определить множитель калибровки Z и использовать его при дальнейшем выполнении работы, то есть каждое из изображений масштабировать с помощью этого множителя. Ввод множителей калибровки осуществляется в окне *Обработка данных* \rightarrow *Базовые действия* \rightarrow *Размеры и единицы измерения*.

Калибровка горизонтального перемещения сканера осуществляется с помощью файла 1.2 (изображение калибровочной решетки) в приближении одинакового растяжения по обеим горизонтальным осям. Номинальная периодичность решетки 0,27мкм. Определить множители калибровки X и Y и использовать их при дальнейшем выполнении работы

Упражнение 2. Количественное описание данных.

- Рассеяние света зеркалами видимого лазера происходит шероховатостями в пространственном диапазоне, сопоставимом с длиной волны излучения, то есть 0,1 -10 мкм. В ряде приложений допустимой считается радиальная спектральная плотность мощности (то есть «количество» шероховатостей, приходящихся на данное волновое число) не более 10³ нм³. Построить одномерную функцию спектральной плотности мощности радиальную И определить качество полировки зеркала по изображению участка его поверхности (файл 2.1). Определить среднеквадратичную шероховатость поверхности.
- Файл 2.2 содержит изображение высаженных на поверхность кремния частиц титана. Определить количество частиц и построить их распределение по размерам. Какую часть поверхности они занимают? Оценить толщину эквивалентной сплошной пленки (в монослоях). Плотность титана 4,54 г/см³, атомная масса 48 а.е.м. 1 а.е.м. = 1,66 · 10⁻²⁷ кг.
- При осаждении пленки в течении 60 секунд часть подложки была закрыта маской. Изображение границы пленки содержится в файле 2.3. Определить скорость осаждения пленки.
- Определить высоту атомной ступеньки на изображении монокристалла кремния (файл 2.4). Масштаб высоты ступеньки на изображении искусственно изменен, поэтому не обязательно совпадает со значением параметра решетки кремния.

6. Литература.

- 1. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004.
- 2. http://gwyddion.net/documentation/
- Ю.С. Нагорнов, И.С. Ясников, М.Н. Тюрьков. Способы исследования поверхности методами атомно-силовой и электронной микроскопии. Тольятти, 2012.
- 4. P. Eaton, P. West. Atomic Force Microscopy. Oxford, 2010.