= ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ _____

УДК 681.2.084, 681.5

© О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок, 2021

КОМПАКТНАЯ ГОЛОВКА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА НА ОСНОВЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПЬЕЗОПАКЕТЫ

Обсуждаются инструментальные принципы построения компактной измерительной головки сканирующего зондового микроскопа. Для минимизации габаритных размеров используется пьезопакет, позволяющий реализовать в одном узле как функции исполнительного элемента следящей системы СЗМ, так и функции модуля сближения зонда с образцом. Приведена схема управления пьезоинерциальным линейным шаговым движителем, и измерены гистограммы распределения величины шагов. Представлены схемы компактных C3M-головок, функционирующих в туннельной и полуконтактной силовой модах с использованием "self-sensing" зондовых датчиков. Для увеличения размеров обзорных C3M-изображений реализовано сканирование по нескольким перекрывающимся областям с дальнейшей сшивкой СЗМ-изображений в единый кадр. Обсуждается алгоритм сшивки C3M-изображений. Возникающие при выборе кадра сканирования отклонения в направлениях перемещений стола и зонда корректируются в рамках алгоритма сшивки C3M-изображений. Приводятся результаты формирования C3M-изображений, полученные с использованием компактной C3M-головки и алгоритмов сшивки C3M-изображений.

Кл. сл.: сканирующий зондовый микроскоп, пьезоинерциальный движитель, self-sensing кантилевер, автоматическая сшивка изображений

введение

Эксперименты по пропусканию туннельного тока через регулируемый вакуумный промежуток [1] стали основой для создания сканирующего туннельного микроскопа [2, 3], изобретатели которого были удостоены Нобелевской премии в области физики в 1986 г. [4]. Сканирующий туннельный микроскоп в свою очередь открыл новое направление, получившее название сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). СЗМ включает в себя микроскопию поверхности высокого, вплоть до атомного, пространственного разрешения, локальную спектроскопию, нанолитографию и манипулирование нанообъектами с использованием острых твердотельных зондов [5, 6]. В основе СЗМ лежит детектирование локального взаимодействия между поверхностью и острым твердотельным зондом, приближенным к поверхности образца на некоторое расстояние Λ , где Λ — характерная длина затухания взаимодействия, и прецизионное механическое сканирование зондом относительно неподвижного образца или образцом относительно зонда. При этом для стабилизации величины взаимодействия между зондом и образцом используется следящая система (СС) с отрицательной петлей обратной связи. Природа взаимодействия зонда с поверхностью может быть весьма разнообразной, что определяет различные типы СЗМ-приборов и множество СЗМ-методик, работающих в вакууме, газе и жидкости при различных температурах, включая криогенные. Среди основных типов СЗМ-приборов можно выделить туннельный микроскоп, силовой микроскоп, оптический микроскоп ближнего поля, микроскоп ионных токов, а также комбинации СЗМ с оптическими и электронными микроскопами. Во всех типах СЗМ основными структурными модулями являются: измерительный узел, который также называют измерительной головкой; электронный контроллер и программное обеспечение. Если за 35 лет развития электронный контроллер управления и сбора данных и программное обеспечение СЗМ приобрели достаточно унифицированный вид, то измерительные узлы СЗМ, вследствие большого разнообразия СЗМ-приборов и методик, имеют весьма разнообразный лизайн и продолжают развиваться и видоизменяться. Измерительный узел СЗМ-прибора любого типа должен обеспечивать: 1D прецизионное механическое сближение зонда с образцом для захвата взаимодействия между ними без повреждения образца и главным образом без повреждения зонда; 2D механическое перемещение зонда или образца для выбора места для исследования на поверхности образца; 3D прецизионное механическое сканирование и, наконец, измерение локального взаимодействия между зондом и образцом. При работе в условиях сверхвысокого вакуума или в криогенной жидкости в конструкциях измерительных узлов должны также предусматриваться манипуляторы, обеспечивающие перезарядку зонда и образца в процессе эксперимента. Как правило, в СЗМ-головках для сближения зонда с образцом, а также для выбора места на поверхности образца используют шаговые двигатели и ручные или моторизованные X-Y столики. Одним из недостатков конструкций на основе шаговых двигателей является нагрев их обмоток, вызывающий температурный дрейф зонда относительно образца и приводящий к искажению результатов измерений. Кроме того, такие конструкции имеют относительно большие габариты, что не всегда согласуется с условиями эксперимента, а также уменьшает собственные механические резонансные частоты конструкции и, как следствие, ослабляет защиту измерительного узла от вибраций, ухудшая стабильность работы СС. Поскольку тепловой дрейф пропорционален длине элементов конструкции, то преимуществом компактных СЗМ-головок является и уменьшение теплового дрейфа.

В основе компактных СЗМ-головок лежит использование пьезоинерциальных позиционеров [7, 8], обеспечивающих совмещение плавного сканирования в небольшом пространственном диапазоне с дискретным прецизионным пошаговым перемещением на относительно большие расстояния. В последние годы активно развиваются электромеханические системы прецизионного позиционирования на основе пьезоактюаторов. По сравнению с электромагнитными системами они имеют более высокое быстродействие, меньшие габариты и выделяют меньше тепла, что принципиально при их использовании в СЗМ-головках. Вообще говоря, с энергетической точки зрения, для оптимальной работы пьезоактюатора в системе механического позиционирования необходимо, чтобы в пьезоактюаторе была запасена электростатическая энергия, достаточная для совершения механической работы по перемещению некоторой массы:

$$\int_{0}^{t} F(t)v(t) dt = \frac{CU^{2}}{2},$$
 (1)

где C — электрическая емкость пьезоактюатора, U — напряжение на пьезоактюаторе, F(t) — сила, действующая на перемещаемую массу, v(t) — скорость перемещения, t — время перемещения.

Пьезоактюаторы, изготовленные из стандартных пьезопластин или пьезотрубок с толщиной ~ 1 мм и площадью электродов ~ 1 см², обладают емкостью ~ 1 нФ. В последние годы стали доступными пьезоактюаторы на основе пьезопакетов, представляющих собой тонкие плоские пьезокерамические слои с металлическими пленочными электродами, соединенными параллельно. Емкость такого пьезопакета определяется суммарной емкостью всех его тонких слоев и достигает величины ~ 1 мкФ, при этом пьезопакет имеет достаточно компактные габариты, а запасенной в нем энергии электрического поля достаточно для надежного функционирования систем механического позиционирования. В описанных ниже C3Mголовках мы использовали пьезопакеты компании PI в виде параллелепипеда с размерами 5×5×9 мм.

СЗМ-ГОЛОВКА С СОВМЕЩЕНИЕМ ФУНКЦИЙ СБЛИЖЕНИЯ ЗОНДА И ОБРАЗЦА И ФУНКЦИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Ниже описан подход, обеспечивающий создание компактных измерительных СЗМ-узлов без использования стандартных шаговых двигателей и габаритных моторизованных Х-Ү столиков.

На рис. 1, а, представлена схема компактной измерительной СЗМ-головки на основе пьезопакета.

Пьезопакет 1 с направляющим стержнем 2 прикреплен к неподвижному основанию 7. По направляющему стержню 2 перемещается каретка 3 со сканером 4, на которой закреплен зондовый датчик 5. Сканирование зондом в плоскости Х, Ү осуществляется с помощью пьезотрубки с двумя парами электродов на внешней поверхности и общим внутренним электродом. Площадь сканирования составляет (30 × 30) мкм² при максимальном напряжении 250 В. Каретка 3 прижата к стержню 2 с возможностью регулировки силы прижатия (прижим на схеме не показан). Пьезопакет предназначен как для работы в качестве исполнительного элемента СС, плавно перемещающего зонд вдоль координаты Z, так и для пошагового перемещения каретки 3 вдоль стержня 2 при сближении зонда с образцом в процессе захвата взаимодействия между ними. Если сила инерции, возникающая в момент начала сжатия (растяжения) пьезопакета и действующая на массу каретки 3 с учетом массы сканера 4 и зондового датчика 5, меньше, чем сила трения в паре трения "стержень-каретка", то каретка перемещается по координате Z вместе со стержнем. В нашем случае диапазон плавного перемещения пьезопакета по координате Z при работе в качестве исполнительного элемента следящей системы составляет ~ (0-7) мкм при управляющем



Рис. 1. Схема компактной СЗМ-головки (а); внешний вид такой головки, установленной в качестве СЗМобъектива на турель оптического микроскопа (б); схема компактной СЗМ-головки с 2D пьезоинерциальным столиком (в).

1 — пьезопакет, 2 — направляющий стержень, 3 — каретка, 4 — пьезотрубка (пьезосканер), 5 — зондовый датчик, 6 — образец, 7 — основание, 8 — двухкоординатный пьезоинерциальный Х, У столик, 9 — плоские пружины, у — усилитель сигнала зондового датчика, ВВУ — высоковольтный усилитель сигнала управления пьезопакетом, ОС — обратная связь с ПИД-регулятором

напряжении 0-120 В. Если же сила инерции превышает силу трения, то каретка проскальзывает по направляющему стержню в сторону, обратную его смещению. Многократно повторяя процесс резкого сжатия и плавного растяжения (или плавного растяжения и резкого сжатия) пьезопакета, можно осуществить пошаговое перемещение каретки на расстояние, определяемое длиной направляющего стержня, с шагами, величина которых будет зависеть от параметров импульсов электрического напряжения, прикладываемых к пьезопакету, и состояния трущихся поверхностей в паре "стерженькаретка". Для уменьшения внешних габаритов СЗМ-головки мы отказались от оптической схемы измерения отклонения кантилевера, обычно используемой при работе в силовом режиме. В приведенной на рис. 1, б, компактной СЗМ качестве головке В датчика силового взаимодействия, работающего в полуконтактной силовой моде, мы используем "self-sensing" Siкантилевер [9] или универсальный пьезорезонансный датчик на основе пьезокерамической трубки с W-иглой [10, 11], который может работать и в СТМ моде. Зондовый датчик 5 крепится к трубчатому сканеру 4 при помощи миниатюрного магнита и соединен легким шлейфом с усилителем сигнала.

Следует отметить, что поведение "self-sensing" кантилевера при измерениях на воздухе отличается от поведения стандартных кантилеверов с оптической схемой детектирования их

прогиба при взаимодействии с поверхностью образца. Поскольку на поверхности "self-sensing" кантилевера расположены пьезорезистивный датчик изгиба и резистор, обеспечивающий импульсный нагрев Si-балки для возбуждения ее резонансных колебаний, то площадь балки "selfsensing" кантилевера примерно на порядок превышает площадь балки стандартного кантилевера. В результате на кривой подвода уже на расстоянии ~ 300 мкм от поверхности образца появляется наклон, обусловленный давлением отраженного воздушного потока, возбуждаемого колебаниями Si-балки на резонансной частоте. Иными словами, появляется "ложный сигнал" от прогиба кантилевера, вызванный не его взаимодействием с поверхностью образца, а давлением на него воздушного потока, отраженного от поверхности образца. Это приводит к сокращению рабочего участка на кривой подвода в полуконтактном силовом режиме (участка колебаний резкого подавления амплитуды кантилевера при сближении с образцом) и требует установки необычно большого (по сравнению со стандартным кантилевером) опорного сигнала для СС. При этом для захвата реального взаимодействия с поверхностью образца необходимо устанавливать достаточно большую величину подавления резонансных колебаний. Увеличение угла между плоскостью образца и плоскостью кантилевера приводит к расширению рабочего кривой подвода, поскольку участка на доля отраженного воздушного уменьшается

потока, попадающего на плоскость кантилевера. Этот эффект, как и ожидалось, пропадает при измерениях в вакууме. Как показали измерения зависимости ширины рабочего участка на кривой подвода от угла между плоскостью образца и плоскостью кантилевера, угол наклона должен составлять не менее 30°.

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЬЕЗОИНЕРЦИАЛЬНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ПОЗИЦИОНЕРОМ

На рис. 2 дана схема подключения пьезопакета для шагового режима перемещения каретки. При разомкнутом ключе K пьезопакет заряжается через сопротивление R за время $3\tau_{3ap} = R \cdot C = 18$ мс до напряжения на обкладках конденсатора U_0 , растягиваясь или сжимаясь, в зависимости от знака напряжения. При замыкании ключа K емкость пьезопакета разряжается до нуля через сопротивление r за значительно более короткое время $3\tau_{pas} = r \cdot C = 18$ мкс. Для реализации пошагового режима перемещения время нахождения ключа в замкнутом состоянии t_1 должно быть больше времени разрядки емкости пьезопакета $t_1 > \tau_{pas}$,



Рис. 2. Схема управления пьезопакетом линейного шагового инерциального движителя.

а — принципиальная схема управления пьезопакетом: емкость пьезопакета $C = 600 \text{ нФ}, R = 10 \text{ кОм}, r = 10 \text{ Ом}, U_0 = 40 \text{ B}; 6 — управляющие импульсы$

а время нахождения ключа в разомкнутом состоянии t₂ должно быть меньше времени зарядки, но больше времени разрядки $\tau_{3ap} > t_2 > \tau_{pa3}$. В таком случае, как показано на рис. 2, б, при периодическом замыкании и размыкании ключа к пьезопакету будут прикладываться асимметричные периодически повторяющиеся импульсы с медленным почти линейным передним фронтом (зарядка конденсатора C) и экспоненциально резким задним фронтом (разрядка конденсатора С). Видно, что амплитуды $U_{\rm 3ap}$ этих импульсов будут определяться скважностью $(t_1 + t_2)/t_2$ управляющих импульсов. Очевидно, что в момент начала разрядки емкости (острые вершины импульсов на рис. 2) на каретку действует максимальная сила инерции, величина которой определяется временем разряда емкости $\tau_{\text{раз}}$, амплитудой импульса U_{зар} и массой каретки с учетом массы пьезотрубки и массы зондового датчика. Если сила инерции превысит силу трения в трущейся паре "направляющий стержень-каретка", то каретка начнет перемещаться по поверхности направляющего стержня в сторону, обратную перемещению направляющего стержня.

В качестве ключа можно использовать транзистор в закрытом (ключ разомкнут) и открытом (ключ замкнут) состояниях. Реверс перемещения в данной схеме управления осуществляется сменой полярности напряжения U_0 , прикладываемого к пьезопакету.

ТРЕБОВАНИЯ К ПОВЕРХНОСТИ ПАРЫ ТРЕНИЯ Для прецизионного шагового перемещения

Для устойчивой работы такого 1D пьезоинерциального движителя мы используем пару трения "плоскость-плоскость". Особенностью такой пары трения является усреднение давления по всей поверхности соприкосновения, что приводит к более равномерному перемещению. Эксперимент показал, что для реализации наноразмерных перемещений пара "плоскость-плоскость" предпочтительнее чем пара "шарик-плоскость", т.к. давление, возникающее при малой площади соприкосновения, быстро разрушает плоскую поверхность, создавая микроцарапины и ухудшая стабильность перемещения. При этом для исключения прилипания пар трения и улучшения воспроизводимости величины шагов перемещения трущиеся поверхности на микро- и наноуровне должны иметь зернистую структуру, получившую название "апельсиновая корка" (рис. 3).

В этом случае продукты трения заполняют углубления, имеющиеся на поверхности (см. рис. 3). Также для минимизации одиночного шага пере-



Рис. 3. Структура поверхности пары трения, изображение получено в оптическом микроскопе.

Вставка а — увеличенное оптическое изображение; вставка б — изображение, полученное в сканирующем силовом микроскопе

мещения необходимо подобрать материалы для пар трения и силу прижима так, чтобы трение покоя было близко к трению скольжения. В противном случае после срыва из состояния покоя движущаяся масса будет проходить значительное расстояние по инерции до полного торможения.



ИЗМЕРЕНИЕ ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ШАГОВ ЛИНЕЙНОГО ПЬЕЗОИНЕРЦИАЛЬНОГО ШАГОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Поскольку позиционер на основе пьезопакета может работать как в качестве линейного шагового двигателя, так и в качестве плавного сканера, его можно использовать как для грубого приближения зонда к образцу, так и для стабилизации взаимодействия между зондом и образцом в режиме постоянной силы или постоянного тока при включенной петле обратной связи. Поэтому, разрывая и замыкая петлю обратной связи между *n*-м и (n + 1)-м шагами каретки 3 и измеряя напряжение на пьезопакете при включенной петле обратной связи, можно определить размер шага ΔZ_n из (2):

$$\Delta Z_n = \alpha k \left(\left| U_{n+1} - U_n \right| \right), \tag{2}$$

где k — коэффициент усиления BBУ (рис. 1, а), α — чувствительность пьезопакета, U_n — напряжение на выходе ПИД-регулятора при замкнутой петле обратной связи до ее разрыва, U_{n+1} — напряжение на выходе ПИД-регулятора после сдвига каретки и замыкания петли обратной связи. Алгоритм измерения перемещения каретки и гистограммы распределения шагов представлен на рис. 4.

Рис. 4. Алгоритм измерения перемещения каретки и гистограммы распределения величины шагов линейного инерциального пьезодвижителя



Рис. 5. Графики пошагового перемещения инерциального движителя по и против силы тяжести вдоль направляющего стержня (а, г) и гистограммы распределения шагов (б, в, д, е) при разных амплитудах управляющих импульсов U_{зар}.

а, б, в — амплитуда управляющего импульса $U_{3ap} = 3$ В; г, д, е — $U_{3ap} = 30$ В

На рис. 5 представлены графики перемещения каретки инерциального движителя при разных направлениях перемещения и разных амплитудах управляющего напряжения U_{3ap} . Поскольку направляющий стержень расположен вертикально, то из-за действия силы тяжести величина шага вверх меньше, чем величина шага вниз (см. рис. 5).

Как видно из рис. 5, при напряжении на пьезопакете $U_{3ap} = 3$ В и движении вверх ~ 80% шагов пьезодвижителя попадает в диапазон 9–12 нм при полном диапазоне 4–18 нм, а при движении вниз ~ 90% шагов попадает в диапазон 20–25 нм при полном диапазоне 20–30 нм. При напряжении на пьезопакете $U_{3ap} = 30$ В и движении вверх ~ 65% шагов попадает в диапазон 360–390 нм при полном диапазоне 350–430 нм, а при движении вниз ~ 65% шагов попадает в диапазоне 400–470 нм при полном диапазоне 400–580 нм. Наблюдаемый разброс в величине шагов мы связываем с топографией поверхности пары трения и имеющимися на поверхности микро-

и наноразмерными загрязнениями и продуктами трения, что проявляется в зависимости силы трения от положения каретки на направляющем стержне. Диапазон перемещения каретки определяется в нашей схеме длиной направляющего стержня и составляет 5 мм по оси Z и 10 мм по осям X, Y.

СЗМ-ГОЛОВКА С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ВЫБОРОМ ОБЛАСТИ СКАНИРОВАНИЯ

На рис. 1, в, представлена схема компактной СЗМ головки с 2D пьезоинерциальным столиком для выбора начальной точки сканирования на поверхности образца.

В отличие от схемы рис. 1, а, в этом случае каретка 3 несет сканер 4, осуществляющий перемещение образца 6 по координатам Х, Ү, а зондовый датчик 5 установлен на двухкоординатном пьезоинерциальном столике 8, в котором оба направляющих стержня расположены горизонтально (стержень, работающий вдоль оси Y, развернут на 90° и не виден на рисунке). Поскольку пьезодвижитель, работающий по оси Х, несет на себе такой же механизм, что и работающий по оси Y, то при таком консольном креплении стержня возможно разрушение пьезопакета при большой нагрузке на каретку. Для предохранения от излома направляющий стержень зафиксирован с обоих торцов гибкими пластинами 9, которые имеют большую жесткость в вертикальном направлении, но могут изгибаться при возвратно-поступательном движении направляющего стержня. Благодаря двухкоординатному пьезоинерциальному столику (далее пьезостол) появляется возможность автоматизированным образом перемещать точку начала сканирования, тем самым осуществить сканирование по сетке с перекрытием кадров и увеличить область визуализации поверхности образца, что важно для получения обзорных СЗМ-изображений.

Для получения обзорных СЗМ-изображений при сканировании по сетке разработан специальный алгоритм — алгоритм сшивки изображений.

Для корректного выполнения сканирования по сетке необходимо отъюстировать пьезостол, т.е. минимизировать влияние углов рассогласования направлений его осей X и Y с направлениями соответствующих осей сканирования пьезосканера, для чего необходимо определить угол рассогласования осей и вычислить физическую величину шага пьезостола в направлениях X и Y. При этом величина шагов инерциального пьезостола по обоим направлениям определяется путем измерения расстояния между точками начала сканирования на C3M-изображениях двух сшитых кадров, полученных с помощью пьезосканера, чувствительность которого заранее известна. Юстировка выполняется автоматически, при помощи алгоритма автоматической сшивки изображений, описанного ниже.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СШИВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Перед началом получения обзорного СЗМизображения выбираются форма и размер поля сканирования, а также количество строк и столбцов в сетке сканирования. Величина перекрытия кадров сетки сканирования может корректироваться. Эксперимент показал, что устойчивая работа алгоритма для образцов с разной структурой поверхности имеет место при перекрытиях ~ 20%. На рис. 6, а, приведен пример схемы сканирования образца перекрывающимися областями, которые составляют сетку размером 2×3 кадра. Стрелками указано направление перемещения к следующей области сканирования при помощи пьезостола.

Так как величины перемещений, выполненных при помощи пьезостола, имеют погрешность, точные координаты положения всех кадров в сетке относительно первого кадра не известны.



Рис. 6. Схема сканирования для получения обзорного СЗМ-изображения с большой площадью.

а — схема сканирования по сетке размером 2 × 3, б — область вычисления корреляционной функции (отмечена пунктиром) для кадра № 2

Однако, зная чувствительность пьезосканера 4 (рис. 1, в) и сшивая изображения перекрывающихся СЗМ-кадров (рис. 6), можно определить координаты положения всех кадров в сетке относительно первого кадра. Для этого разработан специальный алгоритм сшивки нескольких изображений.

Алгоритм автоматической сшивки изображений состоит из блоков предварительной обработки, определения относительных координат кадров в результирующем изображении (собственно, сшивки) и постобработки. Схема алгоритма приведена на рис. 7.

Предварительная обработка заключается в удалении из изображения артефактов, типичных для измерений, проводимых при помощи пьезосканера, — удалении поверхности первого или второго порядка.

В основном блоке алгоритма выполняется конвейерная обработка цепочки изображений. Цепочка изображений составлена в том порядке, в котором выполнялось их сканирование. К каждому изображению применяются функции

сглаживания, эквализации гистограммы и выделения краев при помощи оператора Лапласа. Изображения рассматриваются попарно, каждое следующее изображение в цепочке "пришивается" предыдущему. Для этого в изображении к выбирается фрагмент, который в соответствии с направлением движения по сетке кадров и с заданной областью перекрытия соседних кадров должен также быть и в предыдущем изображении (рис. 6, б). Далее выполняется вычисление перекрестной корреляции выбранного фрагмента заланной областью предшествующего С изображения (область, для которой вычисляется корреляционная функция на примере кадра № 2, показана на рис. 6, б). Вычисление перекрестной корреляции выполняется в частотной области при помощи алгоритма БПФ. Взаимное положение изображений определяется точкой, в которой достигается максимум корреляции. Таким образом вычисляются относительные координаты всех кадров в цепочке, которые затем пересчитываются в координаты относительно начальной точки (точка О на рис. 6, а).



Рис. 7. Схема работы алгоритма сшивки изображений

Количественной характеристикой качества совмещения двух кадров служит нормированная величина максимума функции перекрестной корреляции *K_i*, где *i* — номер кадра в цепочке,

$$K_i = (\max_i - \min_i) / (\operatorname{mean}_i - \min_i).$$
(3)

Для характеристики качества сшивки всех кадров вычисляется сумма величин *K_i*

$$K_s = \sum_i K_i.$$
(4)

Для того чтобы алгоритм сшивки был достаточно универсален и работал для широкого класса изображений, предлагается выполнять конвейерную обработку цепочки изображений несколько раз, изменяя пиксельный размер (масштаб) обрабатываемых изображений и каждый раз вычисляя величину К. Представление изображения в серии фиксированных размеров позволяет выявлять в процессе оконтуривания при каждом масштабе различные признаки от мелких при максимальном масштабе до самых крупных при минимальном масштабе. Лучшая корреляция будет достигнута на том масштабе, на котором проявились наиболее значимые, повторяющиеся в соседних областях признаки. Сшивка, соответствующая максимальной величине считается наилучшей. После выбора $K_{\rm s}$ наилучшей сшивки выполняется следующий этап обработки — улучшение качества результирующего изображения (постобработка).

На этапе постобработки выполняется выравнивание средних значений высоты рельефа

в областях перекрытия изображений и усреднение значений на границах соседних изображений в сшивке.

В том случае, если результат автоматической сшивки неудовлетворителен, имеется возможность совместить сканы вручную. Для этого в программе управления прибором реализован интерфейс, позволяющий при помощи мыши перемещать и сопоставлять полученные изображения, чтобы установить их взаимное расположение и построить изображение большой площади, объединяющее все кадры сетки.

ЮСТИРОВКА ДВУХКООРДИНАТОГО ПЬЕЗОИНЕРЦИАЛЬНОГО СТОЛИКА

Сканирование образца в описываемом приборе осуществляется вдоль осей (X, Y) при помощи пьезотрубчатого 2D-сканера (4 на рис. 1, в) в системе координат, связанной со сканером, а перемещение к следующей области сканирования — вдоль осей (X, Y) в системе координат, связанной с 2D-пьезостолом (8 на рис. 1, в). Пьезосканер и пьезостол являются независимыми конструктивными элементами с неизбежными погрешностями в изготовлении, и поэтому связанные с ними системы координат повернуты на некоторый угол рассогласования $\alpha \neq 0$. Для того чтобы обеспечить корректный переход в заданную начальную точку следующего кадра в сетке, необходимо провести юстировку пьезостола.



Рис. 8. Определение параметров юстировки пьезостола.

Образец — зернистая поверхность стали. Показан угол рассогласования *а* между направлением сканирования пьезотрубки 1 и направлением перемещения пьезоинерциального столика 2. Измерительная мода — силовая полуконтактная, зондовый датчик — пьезотрубка с W-иглой

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2021, том 31, № 2

Для выполнения юстировки необходимо в первую очередь провести сканирование по сетке и, приняв угол рассогласования $\alpha = 0$, применить к полученным кадрам алгоритм автоматической сшивки изображений. После этого, исходя из полученного СЗМ-изображения, вычисляются действительный угол рассогласования α, размер шага вдоль двух осей пьезостола и рассчитывается количество шагов пьезостола, необходимое для компенсации угла рассогласования. Юстировка 2D пьезостола заключается в том, что при перемещении стола по одной из осей осуществляется также корректирующее перемещение вдоль второй оси, компенсирующее угол рассогласования α. На рис. 8 приведена схема расчета параметров юстировки пьезостола на примере двух перекрывающихся СЗМ-изображений. Правое изображение получено после перемещения пьезостола вдоль одного из направлений на заданное шагов N_{\cdot} Видно. что количество между направлением сканирования (1) и направлением перемещения пьезостола (2) существует угол рассогласования $\alpha \neq 0$. Расстояние S (нм), на которое переместился зонд, и угол рассогласования а определяются в результате сшивки изображений (рис. 8), при этом размер шага пьезостола вдоль выбранной оси вычисляется по формуле (5), угол α определяется выражением (6):

$$\operatorname{Step}_{x} = \frac{S}{N},$$
(5)

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{|AB|}{|OA|}\right).$$
(6)

Аналогично определяется размер шага Step_y пьезостола вдоль другой оси.

В каждом новом сканировании по сетке кадров выполняется расчет количества шагов (N_x, N_y) , которые пьезостол должен выполнить, чтобы при переходе к следующему кадру зонд сместился на заданное расстояние L в системе координат пьезосканера. Расчет производится по заранее определенным размерам шагов пьезостола вдоль двух осей и углов рассогласования α , с использованием стандартных формул перехода из одной системы координат в другую:

$$N_x = \operatorname{round}\left(\frac{S\cos\alpha}{\operatorname{Step}_x}\right),\tag{7}$$

$$N_{y} = \left(\frac{S\sin\alpha}{\operatorname{Step}_{y}}\right),\tag{8}$$

где Step_x и Step_y — величины шагов пьезостола, round — операция округления.

Аналогичным способом выполняется юстировка пьезостола во втором направлении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 9, 10 представлены СЗМ-изображения, полученные с использованием компактных СЗМ-головок.



Рис. 9. Примеры изображений, полученные с помощью компактной СЗМголовки.

а — изображение фрагмента дифракционной решетки на Si c Au покрытием, полученное в CTM-моде, зонд — вольфрамовая игла, $V_t = 1$ V, $I_t = 0.5$ nA; б — изображение молекулы ДНК на поверхности слюды, полученное в полуконтактной силовой моде, зондовый датчик — "self-sensing" Si-кантилевер



Рис. 10. Пример увеличения обзорной площади при СЗМ-визуализации ансамбля эритроцитов на стеклянной подложке за счет использования программы автоматической сшивки двух перекрывающихся сканов (а) и (б), полученных в полуконтактной силовой моде, в обзорное изображение (в). Зондовый датчик — "self-sensing" кантилевер в виде пьезотрубки с W-иглой

Таким образом, в работе показано, что электрическая емкость пьезопакетов позволяет запасать в них при относительно небольших электрических напряжениях энергию, достаточную для создания движителей, использующих инерциальный принцип перемещения. Экспериментально продемонстрировано, что разброс величины одиночного шага линейного инерциального движителя определяется структурой поверхностей используемых пар трения. Представленный в данной работе линейный пьезодвижитель обеспечивает инерциальный перемещение на расстояния до 10 мм с минимальным шагом, лежащим в диапазоне 4-18 нм. открывает перспективы для разработки Это компактных СЗМ-головок, работающих в туни полуконтактной силовой модах. нельной Минимизация габаритных размеров СЗМ-головки обусловлена несколькими факторами: во-первых, применение пьезопакетов позволяет уменьшить размеры за счет объединения в одном узле функций исполнительного элемента СС и узла сближения зонда с образцом; во-вторых, на основе пьезопакетов могут быть реализованы малогабаритные автоматизированные двухкоординатные столы; в-третьих, уменьшение размеров достигается за счет замены Si-кантилеверов с оптической схемой измерения на "self-sensing" кантилеверы. Предложен алгоритм автоматической сшивки нескольких перекрывающихся кадров сканирования. Показано, что в рамках алгоритма сшивки СЗМ-изображений можно минимизировать угол рассогласования между направлениями (Х, Ү) в системах координат, связанных со сканером и столом, возникающий из-за конструктивных погрешностей. Показано, что применение алгоритма автоматической сшивки СЗМ-изображений совместно с минимизацией рассогласования угла позволяет увеличить

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2021, том 31, № 2

площадь обзорной СЗМ-визуализации поверхности образца. Компактные СЗМ-головки представляют интерес, например, при объединении СЗМ с оптическими и электронными микроскопами или при проведении низкотемпературных СЗМ-исследований в криостатах с криожидкостями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E. Tunneling through a controllable vacuum gap // Applied Physics Letters. 1982. Vol 40, is. 2. P. 178–180. DOI: 10.1063/1.92999
- Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. Surface studies by scanning tunneling microscopy // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol 49, is. 1. P. 57–61. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.57
- Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy // Surface Science. 1983. Vol. 126, is. 1-3. P. 236–244. DOI:<u>10.1016/0039-6028(83)90716-1</u>
- Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy from birth to adolescence: Nobel Lecture. Stockholm December 8, 1986.
- Wiesendanger R. Scanning probe microscopy and spectroscopy: methods and applications. Cambridge University Press, 1994. DOI: 10.1017/CBO9780511524356
- Voigtländer B. Scanning probe microscopy. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-45240-0
- Быков В.А., Голубок А.О., Сапожников И.Д., Котов В.В. "Инерционный двигатель". Патент, RU2297072C1 (2005).
- Голубок А.О., Сапожников И.Д. "Сканирующий зондовый микроскоп". Патент, RU2366008C2 (2006).
- Bausells J. Piezoresistive cantilevers for nanomechanical sensing // Microelectronic Engineering. 2015. Vol. 145, is. 1. P. 9–20. DOI: 10.1016/j.mee.2015.02.010

- Быков В.А., Голубок А.О., Сапожников И.Д., Котов В.В. "Зонд на основе пьезокерамической трубки". Патент, RU2300150C1 (2005).
- 11. Васильев А.А., Керпелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д., Голубок А.О. Датчик локального силового и туннельного взаимодействий в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 1. С. 62–69.

URL: http://iairas.ru/mag/2005/abst1.php#abst7

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Контакты: *Горбенко Ольга Марковна*, gorolga64@gmail.com

Материал поступил в редакцию 27.03.2021

COMPACT SCANNING PROBE MICROSCOPE HEAD BASED ON INERTIAL THRUSTERS USING PIEZOPACKETS

O. M. Gorbenko, M. V. Zhukov, S. V. Pichahchi, I. D. Sapozhnikov, M. L. Felshtyn, A. O. Golubok

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia

The instrumental principles of constructing a compact measuring head of a scanning probe microscope are discussed. To minimize the overall dimensions, a piezo package is used, which makes it possible to implement in one unit both the functions of the actuating element of the SPM tracking system and the functions of the module for approaching the probe to the sample. A control scheme for a piezo-inertial linear step mover is presented, and histograms of the step size distribution are measured. Diagrams of compact SPM heads operating in tunneling and semi-contact power modes using self-sensing probe sensors are presented. To increase the size of the survey SPM images, scanning over several overlapping areas was implemented with further stitching of the SPM images in a single frame. The algorithm for stitching SPM images is discussed. The deviations in the directions of the stage and probe movements, arising during the new scanning frame selection, are being corrected within the framework of the SPM image stitching algorithm. The results of capturing SPM images using a compact SPM head and stitching SPM images by means of elaborated algorithms are presented.

Keywords: scanning probe microscope, piezo-inertial step mover, self-sensing cantilever, automatic image stitching

INTRODUCTION

Experiments on passing a tunneling current through an adjustable vacuum gap [1] became the basis for the creation of a scanning tunneling microscope [2, 3], whose inventors were awarded the Nobel Prize in physics in 1986 [4]. The scanning tunneling microscope, in turn, opened a new direction of research, called scanning probe microscopy (SPM). SPM includes surface microscopy of high, up to atomic, spatial resolution, local spectroscopy, nanolithography and manipulation of nanoobjects using sharp solidstate probes [5, 6]. SPM is based on the detection of local interaction between the surface and a sharp solid-state probe, close to the sample surface at a certain distance Λ (where Λ is the characteristic length of interaction decay) and precision mechanical scanning by the probe relative to the stationary sample or by the sample relative to the probe. In this case, a tracking system (TS) with a negative feedback loop is used to stabilize the value of the interaction between the probe and the sample. The nature of the interaction of the probe with the surface can be very diverse, which determines various types of SPM devices and a variety of SPM techniques operating in vacuum, gas, and liquid at various temperatures, including cryogenic ones. Among the main types of SPM devices, one can distinguish a tunnel microscope, a force microscope, an optical near-field microscope, an ion current microscope, as well as combinations of an SPM with optical and electron microscopes. In all types of

SPMs, the main structural modules are: a measuring unit, which is also called a measuring head; electronic controller and software. If over 35 years of development the electronic controller and the SPM software have acquired a rather unified form, then the SPM measuring units, due to the wide variety of SPM devices and techniques, have a very diverse design and continue to develop and change. The measuring unit of any type of SPM device should provide: 1D precision mechanical approach of the probe to the sample to capture the interaction between them without damaging the sample and, mainly, without damaging the probe; 2D mechanical movement of the probe or sample to select a location for examination on the sample surface; 3D precision mechanical scanning and finally the measurement of the local interaction between the probe and the sample. When working in ultrahigh vacuum or in a cryogenic liquid, the designs of the measuring units should also include manipulators that ensure the recharge of the probe and the sample during the experiment. As a rule, in SPM heads, stepper motors and manual or motorized X-Y stages are used to bring the probe closer to the sample, as well as to select a location on the sample surface. One of the design flaws on the basis of stepper motors is the heating of their windings, which causes a temperature drift of the probe relative to the sample and leads to distortion of the measurement results. In addition, such structures have relatively large dimensions, which are not always consistent with the experimental conditions, and also reduce the natural mechanical resonance

Fig. 1. Diagram of a compact SPM head (a); the appearance of such a head installed as an SPM objective on the turret of an optical microscope (b); diagram of a compact SPM head with a 2D piezoinertial stage (c). 1 — piezo package, 2 — guide rod, 3 — carriage, 4 — piezotube (piezoscanner), 5 — probe sensor, 6 — sample, 7 — base, 8 — two-coordinate piezo-inertial X-Y stage, 9 — flat springs, y — signal amplifier for probe sensor, BBY — high-voltage amplifier of the piezoelectric package control signal, OC — feedback from the PID control-

ler

frequencies of the structure and, as a result, weaken the vibration protection of the measuring unit, impairing the stability of the TS operation. Since thermal drift is proportional to the length of structural elements, the advantage of compact SPM heads is also a reduction in thermal drift.

The compact SPM heads are based on the use of piezo-inertial positioners [7, 8], which ensure the combination of smooth scanning in a small spatial range with discrete precision step-by-step movement over relatively long distances. In recent years, electromechanical precision positioning systems based on piezo actuators have been actively developed. Compared to electromagnetic systems, they have a higher speed, smaller dimensions and emit less heat, which is fundamentally when they are used in SPM heads. Generally speaking, from an energy point of view, for optimal operation of a piezo actuator in a mechanical positioning system, electrostatic energy, stored in a piezo actuator, is to be sufficient to perform mechanical work to move a certain mass:

$$\int_{0}^{t} F(t)v(t) dt = \frac{CU^{2}}{2},$$
 (1)

where C — the electric capacity of the piezo actuator, U— the voltage across the piezo actuator, F(t) — the force acting on the moving mass, v(t) — the velocity of travel, t — time of travel.

Piezo actuators made of standard piezo plates or piezo tubes with a thickness $\sim 1 \text{ mm}$ and an area of electrodes ~ 1 cm², have a capacitance of ~ 1 nF. In recent years, piezo actuators based on piezo packages have become available. Piezo packages are thin flat piezoceramic layers with metal film electrodes, connected in parallel. The capacity of such piezoelectric packages is determined by the total capacity of all its thin layers and reaches a value of $\sim 1 \ \mu F$, while the piezoelectric package is rather compact, and the stored electric field energy in it is sufficient for the reliable functioning of mechanical positioning systems. In the SPM heads described below, we used piezoelectric packages of PI company in the form of a parallelepiped with dimensions of $5 \times 5 \times 9$ mm.

SPM HEAD WITH A COMBINATION OF THE PROBE AND SAMPLE APPROXIMATION FUNCTION AND FUNCTION OF THE TRACKING SYSTEM ACTUATING ELEMENT

The described below approach provides the creation of compact measuring SPM nodes without the use of standard stepper motors and oversized motorized X-Y stages.

In Fig. 1, a, a diagram of a compact measuring SPM head based on a piezo package is presented. Piezopackage 1 with a guide rod 2 is attached to a fixed base 7. A carriage 3 with a scanner 4 moves along the guide rod 2, on the carriage a probe sensor 5 is fixed. Scanning with a probe in the X, Y plane is carried out using a piezotube with two pairs of electrodes on the outer surface and a common internal electrode. The scanning area is $(30 \times 30) \,\mu\text{m}^2$ at a maximum voltage of 250 V. The carriage 3 is pressed to the rod 2 with the possibility of tuning the pressing force (the clamp is not shown in the diagram). The piezo package is designed both to work as an actuating element of the TS. The actuator both smoothly moves the probe along the Z coordinate, and moves the carriage 3 step-by-step along the rod 2 when the probe approaches the sample in the process of capturing the interaction between them. If the force of inertia, arising at the beginning of compression (stretching) of the piezoelectric package and acting on the mass of the carriage 3(taking into account the mass of the scanner 4 and probe 5), is less than the friction force in the friction pair "rod-carriage", then the carriage moves along the Z coordinate together with the rod. In the present case, the range of smooth travel of the piezoelectric package along the Z coordinate when operating as an actuating element of the TS is ~ (0-7) µm, a control voltage is 0–120 V. If the inertial force exceeds the friction force, then the carriage slides along the guide rod in the direction opposite to its travel. Repeating the process of sharp compression and smooth stretching (or smooth stretching and sharp compression) of the piezoelectric package, it is possible to move the carriage step by step at a distance determined by the length of the guide rod, with steps, the size of them will depend on the parameters of electrical voltage pulses applied to the piezoelectric package, and the state of rubbing surfaces in the "rod-carriage" pair. To reduce the external dimensions of the SPM head, we abandoned the optical scheme for measuring the deflection of the cantilever, which is usually used when operating in the power mode. In a compact SPM head, presented in Fig. 1, b as a force interaction sensor operating in a semicontact force mode, we use a "self-sensing" Sicantilever [9] or a universal piezo-resonance sensor based on a piezoceramic tube with a W-needle [10, 11], which can also work in the STM mode. Probe sensor 5 is attached to the tubular scanner 4 using a miniature magnet and is connected to a signal amplifier by a light loop.

It should be noted that the behavior of the "selfsensing" cantilever during measurements in air differs from the behavior of standard cantilevers with an optical scheme for detecting their deflection when interacting with the sample surface. Since a piezoresistive bending sensor and a resistor providing pulsed heating of the Si-beam to excite its resonant oscillations are located on the surface of the "self-sensing" cantilever, then the area of the "self-sensing" cantilever beam is about an order of magnitude larger than the area of the standard cantilever beam. As a result, a slope appears on the approach curve already at a distance of $\sim 300 \ \mu m$ from the sample surface due to the pressure of the reflected air flow excited by vibrations of the Si-beam at the resonant frequency. In other words, a "false signal" appears from the deflection of the cantilever, caused not by its interaction with the sample surface, but by the pressure of the air flow reflected from the sample surface. This leads to a reduction in the working area on the approach curve in the semicontact power mode (the area of sharp suppression of the amplitude of the oscillations of the cantilever when approaching the sample) and requires the installation of an unusually large (compared to a standard cantilever) reference signal for the TS. In this case, to capture the real interaction with the surface of the sample, it is necessary to set a sufficiently large value of the suppression of resonant oscillations. An increase in the angle between the plane of the sample and the plane of the cantilever leads to an expansion of the working area on the approach curve, since the fraction of the reflected air flow, falling on the plane of the cantilever, decreases. This effect, as expected, disappears when measured in vacuum. As shown by measurements of the dependence of the width of the working area on the approach curve on the angle

between the plane of the sample and the plane of the cantilever, the tilt angle must be at least 30° .

CONTROL SCHEME OF PIEZOINERTIAL LINEAR POSITIONER

Fig. 2 shows a diagram of connecting a piezoelectric package for a stepping mode of carriage travel. When the key K is open, the piezoelectric package is charged through the resistance R in a time of $3\tau_{3ap} =$ $=R \cdot C = 18$ ms to the value U_0 of voltage on the capacitor plates, stretching or contracting, depending on the sign of the voltage. When the key K is closed, the capacity of the piezoelectric package is discharged to zero through the resistance r in a much shorter time $3\tau_{\text{pas}} = r \cdot C = 18 \ \mu\text{s}$. To implement a step-by-step mode of travel, time when the key is in the closed state t_1 must be longer than the discharge time of the capacity of the piezoelectric package $t_1 > \tau_{pas}$, and the time when the key is in the open state t_2 should be less than the charging time, but longer than the discharge time $\tau_{\text{3ap}} > t_2 > \tau_{\text{pa3}}$. In this case, as shown in Fig. 2, b, when the key is periodically closed and opened, asymmetric periodically repeating pulses with a slow, almost linear leading edge (charging of capacitor C) and an exponentially sharp trailing edge (discharge of capacitor C) will be applied to the piezoelectric package. It can be seen that the amplitudes U_{3ap} of these pulses will be determined by the pulse ratio $(t_1 + t_2)/t_2$ of the control pulses. Obviously, at the moment of the beginning of the discharge of the capacitance (sharp tops of the pulses in Fig. 2), the carriage is under impact of the maximum inertia force, the magnitude of which is determined by the discharge time τ_{pa3} , of the capaci-tance, the pulse amplitude U_{3ap} and the carriage mass, taking into account the mass of the piezotube and the mass of the probe sensor. If the force of inertia exceeds the friction force in the rubbing pair "guide rodcarriage", then the carriage will begin to move along the surface of the guide rod in the direction opposite to the movement of the guide rod.

As a key, you can use a transistor in the closed (open key) and open (closed key) states. Reverse of movement in this control circuit is carried out by changing the polarity of the voltage U_0 , applied to the piezoelectric package.

Fig. 2. Control circuit of the piezoelectric package of the linear step inertial propulsive device. a — schematic diagram of piezoelectric package control: capacitance of piezoelectric package C = 600 nF, $R = 10 \text{ k}\Omega$, $r = 10 \Omega$, $U_0 = 40$ V; 6 — control impulses

REQUIREMENTS FOR FRICTION PAIR SURFACE OF A PRECISION STEP MOTION

For stable operation of such a 1D piezo-inertial mover, we use a "plane-plane" friction pair. A feature of such a friction pair is the averaging of pressure over the entire contact surface, which leads to a more uniform movement. The experiment showed that for the realization of nanoscale movements of the "planeplane" pair is more preferable than the "ball-plane" pair, since the pressure generated by the small contact area quickly erodes the flat surface, creating microscratches and impairing the stability of movement. At the same time, in order to exclude adhesion of friction pairs and to improve the reproducibility of a size of the travel steps, the surface of the rubbing planes at the micro- and nanolevels should have a granular structure called "orange peel" (Fig. 3).

In this case, the products of friction fill the depressions on the surface (Fig. 3). Also, to minimize a single step of movement, it is necessary to select materials for the friction pairs and the clamping force so that the static friction would be close to the sliding friction. Otherwise, after a breakdown from a state of rest, the moving mass will travel a considerable distance by inertia until it is completely decelerated.

Fig. 3. The structure of the surface of the friction pair, the image was obtained in an optical microscope. Insert a — enlarged optical image; insert b — image obtained in a scanning force microscope

MEASURING THE HISTOGRAM OF THE DISTRIBUTION OF THE STEPS VALUE OF A LINEAR PIEZOINERTIAL STEP MOVER

Since a positioner based on a piezo package can operate both as a linear stepper motor and as a smooth scanner, it can be used both for a rough approximation of the probe to the sample and for stabilizing the interaction between the probe and the sample in the constant force mode or direct current when the feedback loop is on.

Therefore, breaking and closing the feedback loop between the *n*-th and (n + 1)-th steps of the carriage 3 and measuring the voltage across the piezoelectric package with the feedback loop on, it is possible to determine the step value ΔZ_n from (2):

$$\Delta Z_n = \alpha k \left(\left| U_{n+1} - U_n \right| \right), \tag{2}$$

where k — the gain ratio of the high-voltage amplifier BBY (Fig. 1, a), α — the sensitivity of the piezo package, U_n — the voltage at the output of the PID controller when the feedback loop is closed until it is broken, U_{n+1} — voltage at the output of the PID regulator after the carriage shift and the feedback loop closure. The algorithm for measuring the travel of the carriage and the histogram of the distribution of steps is shown in Fig. 4. Fig. 5 shows the graphs of the travel of the carriage of the inertial mover at different directions of movement and different amplitudes of the control voltage U_{3ap} . Since the guide rod is located vertically, than due to the action of gravity, the size of step up is less than the size of step down (Fig. 5).

As can be seen in Fig. 5, if a voltage across the pi-ezo package $U_{3ap} = 3$ V and the move is up than $\sim 80^{\circ}$ % of the steps of the piezo mover falls into the range of 9-12 nm in terms of the full range of 4-18 nm, and if the move is down than $\sim 90\%$ of the steps fall within the 20-25 nm range in terms of the full range of 20–30 nm. If a voltage is $U_{3ap} = 30$ V and the move is up ~ 65% of the steps fall into the range of 360-390 nm in terms of the full range of 350-430 nm, and if the move is down $\sim 65\%$ of the steps fall into the range of 400–470 nm in terms of a full range of 400-580 nm. We associate the observed scatter in the size of steps with the topography of the surface of the friction pair and the micro-and nanoscale contaminants and friction products, which manifests itself in the dependence of the friction force on the position of the carriage on the guide rod. The range of travel of the carriage is determined in our diagram by the length of the guide rod and is 5 mm along the Zaxis and 10 mm along the X, Y axes.

Fig. 4. Algorithm for measuring the movement of the carriage and the histogram of the distribution of the magnitude of the steps of the linear inertial piezoelectric mover

Fig. 5. Graphs of the step-by-step movement of the inertial mover along and against the force of gravity along the guide rod (a, Γ) and the histogram of the distribution of steps (6, B, π , e) at different amplitudes of control impulses U_{sap} . a, 6, B — the amplitude of the control pulse $U_{\text{sap}} = 3 \text{ V}$; Γ , π , e — $U_{\text{sap}} = 30 \text{ V}$

SPM-HEAD WITH AUTOMATED SCAN AREA SELECTION

Fig. 1, B shows a diagram of a compact SPM head with a 2D piezoinertial stage for selecting the initial scanning point on the sample surface.

In contrast to the diagram in Fig. 1, a, in this case, the carriage 3 carries the scanner 4, which moves the sample 6 along the coordinates X, Y, and the probe sensor 5 is mounted on a two-coordinate piezo-inertial stage 8, in which both guide rods are located

horizontally (the rod operating along the Y axis is rotated 90° and is not visible in the figure). Since the piezo mover, operating along the X axis, carries the same mechanism as that operating along the Y axis, this cantilever mounting of the rod makes it possible that the piezo package may be destroyed under a large load on the carriage. To prevent breakage, the guide rod is fixed at both ends with flexible plates 9, which have greater rigidity in the vertical direction,

Fig. 6. Scanning scheme for obtaining an overview SPM imagewith a large area. a — scanning scheme on a 2×3 grid, 6 — area for calculating the correlation function (marked with a dotted line) for frame No. 2

Fig. 7. Diagram of the image stitching algorithm

but can bend during the reciprocating movement of the guide rod. Due to the two-coordinate piezo-inertial stage (hereinafter referred to as the piezo-stage), it becomes possible to move the scanning start point in an automated manner, thereby to scan along the grid with overlapping frames and increase the visualization area of the sample surface, which is important for obtaining survey SPM images.

To obtain survey SPM images during scanning a grid, a special algorithm has been developed — an image stitching algorithm.

For the correct scanning on the grid, it is necessary to adjust the piezo-stage, i.e. to minimize the influence of the angles of misalignment of the directions of its X and Y axes with the directions of the corresponding axes of the piezo-scanner scanning, for which it is necessary to determine the angle of misalignment of the axes and calculate the physical size of the step of the piezo stage in the X and Y directions. In this case, the size of the steps of the inertial piezoelectric stage in both directions is being determined by measuring the distance between the points of the beginning of scanning on the SPM images of two stitched frames obtained using a piezoscanner, the sensitivity of which is known in advance. The alignment is performed automatically using the automatic image stitching algorithm described below.

ALGORITHM OF AUTOMATIC STITCHING OF IMAGES

Before starting to obtain a survey SPM image, the shape and size of the scanning field, as well as the number of rows and columns in the scanning grid, are selected. The area of overlapping frames of the grid of scanning can be adjusted. The experiment showed that the stable operation of the algorithm for samples with different surface structures takes place at overlaps of $\sim 20\%$. Fig. 6, a shows an example of a pattern for scanning a sample with overlapping areas, which make up a 2 \times 3 frame grid. The arrows indicate the direction of movement to the next scan area using the piezo stage.

Since the values of the displacements of the piezo table have an error, the exact coordinates of the position of all frames in the grid relative to the first frame are not known.

However, knowing the sensitivity of piezoscanner 4 (Fig. 1, B) and stitching the images of overlapping SPM frames (Fig. 6), it is possible to determine the coordinates of the position of all frames in the grid relative to the first frame. For this, a special algorithm for stitching several images has been developed.

The algorithm for automatic stitching of images consists of blocks: preprocessing, determining the relative coordinates of the frames in the resulting image (actually, stitching) and post-processing. The scheme of the algorithm is shown in Fig. 7.

Pre-processing consists in removing artifacts, typical for measurements carried out with a piezoscope, from the image — removing the surface of the first or second order.

The main block of the algorithm performs pipeline processing of the image chain. The chain of images is arranged in the order in which they were scanned. Anti-aliasing, histogram equalization and edge enhancement using the Laplace operator are functions, applied to each image. Images are considered in pairs, each next image in the chain is "sewn" to the previous one. For this, a fragment is selected in the image, which, in accordance with the direction of movement along the grid of frames and with a given area of overlap of adjacent frames, should also be in the previous image (Fig. 6, δ). Next, the calculation is carried out for the cross-correlation of the selected fragment with a given area of the previous image. The area for which the correlation function is calculated on the example of frame No. 2 is shown in Fig. 6, δ . The cross-correlation calculation is performed in the frequency domain using the FFT algorithm. The relative position of the images is determined by the point at which the maximum correlation is achieved. Thus, the relative coordinates of all frames in the chain are calculated, which are then converted into coordinates relative to the starting point (point O in Fig. 6, a).

The quantitative characteristic of the quality of alignment of two frames is the normalized value of the maximum of the cross-correlation function K_i , where *i* is the number of the frame in the chain,

$$K_i = (\max_i - \min_i) / (\operatorname{mean}_i - \min_i).$$
(3)

To characterize the quality of stitching of all frames, the sum of K_i values is calculated

$$K_s = \sum_i K_i.$$
 (4)

In order for the stitching algorithm to be sufficiently universal and working for a wide class of images, it is proposed to perform pipeline processing of the chain of images several times, changing the pixel size (scale) of the processed images and calculating the value of K_s each time. The representation of the image in a series of fixed dimensions allows for the identification of various features during the contouring process at each scale — from small ones at maximum scale to largest ones at minimum scale. The best correlation would be achieved at the scale which showes the most significant features, repeating in neighboring areas. The stitching, corresponding to the maximum K_s value, is considered to be the best. After choosing the best stitching, the next stage of processing is performed — improving the quality of the resulting image (post-processing).

At the post-processing stage, the average values of the relief height in the overlapping areas of the images are aligned and the values are averaged at the boundaries of neighboring images in the stitching.

If the result of automatic stitching is unsatisfactory, it is possible to stitch the scans manually. To do this, the device control program implements an interface that allows an operator to move and to compare the obtained images in order to establish their relative position and build an image of a large area, combining all the frames of the grid.

Fig. 8. Determination of the adjustment parameters of the piezo-stage. Sample — grained surface of steel. Shown is the mismatch angle a between the scanning direction of the piezotube 1 and the direction of movement of the piezoinertial stage 2. The measuring mode is tapping force, the probe sensor is a piezotube with a W-needle

ADJUSTING THE TWO-ORDINATED PIEZO-INERTIAL STAGE

Scanning the sample in the described device is carried out along the axes (X, Y) using a piezotubular 2D scanner (4 in Fig. 1, B) in the coordinate system associated with the scanner, and moving to the next scanning area — along the axes (X, Y) in the coordinate system related with 2D piezo stage (8 in Fig. 1, B). Piezoscanner and piezo stage are independent structural elements with inevitable manufacturing errors, and therefore the coordinate systems, associated with them, are rotated by a certain mismatch angle $\alpha \neq 0$. In order to ensure the correct transition to the given starting point of the next frame in the grid, it is necessary to adjust the piezostage.

To perform the adjustment, one must first scan along the grid and, taking the mismatch angle $\alpha = 0$, apply an algorithm for automatic stitching of images to the received frames. After that, based on the obtained SPM image, the actual mismatch angle α , the step size along the two axes of the piezo stage, and

the number of piezo stage steps required to compensate for the mismatch angle are calculated. Adjustment of the 2D piezo table is that when the table is moved along one of the axes, a corrective movement along the second axis is also carried out, which compensates for the misalignment angle α . Fig. 8 shows a diagram for calculating the adjustment parameters of the piezoelectric table using the example of two overlapping SPM images. The right image was obtained after moving the piezo stage along one of the directions by a given number of steps N. It can be seen that between the scanning direction (1) and the direction of movement of the piezo stage (2) there is a mismatch angle $\alpha \neq 0$. Distance S (nm), at whuch the probe moved, and the mismatch angle α are determined as a result of image stitching (Fig. 8), while the step size of the piezo stage along the selected axis is calculated by the formula (5), the angle α is determined by the expression (6):

$$\operatorname{Step}_{x} = \frac{S}{N},$$
(5)

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{|AB|}{|OA|}\right).$$
(6)

The step size Step_y of piezo stage along the other axis is determined in the same way.

In each new scanning on the frame grid, the calculation is carried out to obtain the number of steps (N_x, N_y) of the piezo stage to performe in order for the probe to move to the specified distance L in the piezoscanner coordinate system. The calculation is carried out according to the predetermined sizes of the steps of the piezoelectric stage along two axes and mismatch angles α , using standard formulas for the transition from one coordinate system to another:

$$N_x = \operatorname{round}\left(\frac{S\cos\alpha}{\operatorname{Step}_x}\right),\tag{7}$$

$$N_{y} = \left(\frac{S\sin\alpha}{\operatorname{Step}_{y}}\right),\tag{8}$$

where Step_x and Step_y are the sizes of the steps of the piezo stage, round is the rounding operation.

The piezo stage is adjusted in the second direction in a similar way.

Fig. 9. Examples of images obtained with a compact SPM head.

a — image of a fragment of a diffraction grating on Si with Au coating, obtained in the STM mode, the probe is a tungsten tip, $V_t = 1 \text{ V}$, $I_t = 0.5 \text{ nA}$;

b — an image of a DNA molecule on the surface of mica, obtained in a semicontact force mode, probe sensor is "self-sensing" Si-cantilever

Fig. 10. An example of an increase in the viewing area during SPM visualization of an ensemble of erythrocytes on a glass substrate by using the program for automatic stitching of two overlapping scans (a) and (δ), obtained in a semicontact force mode, into an overview image (B).

Probe sensor is "self-sensing" cantilever in the form of a piezotube with a W-needle

RESULTS AND CONCLUSIONS

Figures 9, 10 show SPM images obtained using compact SPM heads.

Thus, the research has shown that the electric capacity of piezo packages allows storing energy in them at relatively low electric voltages, which is sufficient to create movers that use the inertial principle of travel. It has been experimentally demonstrated that the scatter of the size of a single step of a linear inertial mover is determined by the structure of the surfaces of the friction pairs used. The linear inertial piezoelectric mover presented in this paper provides movement over distances of up to 10 mm with a minimum step in the range of 4-18 nm. This opens up prospects for the development of compact SPM heads operating in tunneling and semicontact power modes. The minimization of the dimensions of the SPM head is due to several factors: firstly, the use of piezoelectric packages makes it possible to reduce the dimensions by combining the functions of the TS actuator and the node of approaching the probe with the sample in one unit; secondly, small-sized automated twocoordinate stages can be realized on the basis of piezo packages; thirdly, the size reduction is achieved by replacing the Si-cantilevers with optical measurement scheme for "self-sensing" cantilevers. An algorithm for automatic stitching of several overlapping scan frames is proposed. It is shown that, within the framework of the SPM image stitching algorithm, it is possible to minimize the angle of misalignment, arising from design errors between the directions (X, Y) in the coordinate systems associated with the scanner and the stage. It is shown that the use of an algorithm for automatic stitching of SPM images together with minimization of the mismatch angle makes it possible to increase the area of the survey SPM visualization of the sample surface. Compact SPM heads are of interest, for example, when combining SPM with optical and electron microscopes or when carrying out low-temperature SPM studies in cryostats with cryoliquids.

REFERENCES

- Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E. Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl Phys Letts*, 1982, vol. 40, is. 2, pp. 178–180. DOI: 10.1063/1.92999
- Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Phys Rev Lett.* 1982, vol. 49, is. 1, pp. 57–61. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.57
- Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy. Surface Science. 1983, vol. 126, is. 1-3, pp. 236–244. DOI: 10.1016/0039-6028(83)90716-1
- 4. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy --

from birth to adolescence: Nobel Lecture. Stockholm December 8, 1986.

- Wiesendanger R. Scanning probe microscopy and spectroscopy: methods and applications. Cambridge University Press, 1994. DOI: 10.1017/CBO9780511524356
- Voigtländer B. Scanning probe microscopy. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-45240-0
- Bykov V.A., Golubok A.O., Sapozhnikov I.D., Kotov V.V. *Inercionnyj dvigatel*'. Patent RU2 297 072C1. [Patent for the Invention Inertial motor]. Proritet 2005. (In Russ.).
- Golubok A.O., Sapozhnikov I.D. Skaniruyushchij zondovyj mikroskop. Patent RU2366008C2. [Patent for the Invention Scanning probe microscope]. Proritet 2006. (In Russ.).

Contacts: Gorbenko Olga Markovna, gorolga64@gmail.com

- Bausells J. Piezoresistive cantilevers for nanomechanical sensing. *Microelectronic Engineering*, 2015, vol. 145, is. 1, pp. 9–20. DOI: 10.1016/j.mee.2015.02.010
- Bykov V.A., Golubok A.O., Sapozhnikov I.D., Kotov V.V. Zond na osnove p'ezokeramicheskoj trubki. Patent RU2 300 150C1. [Patent for the Invention Piezoceramic tube-based probe]. Prioritet 2005. (In Russ.).
- Vasiliev A.A., Kerpeleva S.Yu., Kotov V.V., Sapozhnikov I.D., Golubok A.O. [Local force and tunneling interaction sensor for a scanning probe microscope]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2005, vol. 15, no. 1, pp. 62–69.

URL: http://iairas.ru/mag/2005/abst1.php#abst7 (In Russ.).

Article received by the editorial office on 27.03.2021