

КОМПАКТНЫЙ 3D-НАНОПОЗИЦИОНЕР СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА, РАБОТАЮЩИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 4.2–300 К

© 2012 г. А. М. Трояновский, D. Roditchev*

Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

**CNRS and University Pierre et Marie Curie*

Paris 6, 4 pl. Jussieu, 75252 Paris, France

E-mail: troyan@kapitza.ras.ru

Поступила в редакцию 13.04.2012 г.

Описано простое компактное устройство позиционирования по трем координатам иглы сканирующего туннельного микроскопа, предназначенного для работы в сверхвысоком вакууме и в диапазоне температур от комнатной до гелиевой (4.2 К). Нанопозиционер содержит два независимых шаговых пьезодвигателя. Один из них предназначен для подвода иглы к образцу (ось Z), а другой — для позиционирования в плоскости образца (X, Y). Точность позиционирования по оси Z составляет до 10 нм, в плоскости (X, Y) — до 40 нм при температуре 4.2 К. Максимальная амплитуда импульсов управления ± 250 В для Z -пьезодвигателя и 140 В для (X, Y)-позиционера (при 4.2 К). Прибор выполнен из немагнитных материалов и допускает прогрев до 150°C для работы в сверхвысоком вакууме.

Важной частью конструкции любого сканирующего туннельного микроскопа (с.т.м.) является система грубого подвода иглы к образцу. Это устройство должно обеспечить приближение иглы с.т.м. к образцу с расстояния порядка ≥ 1 мм до расстояния, обеспечивающего работу цепи обратной связи по вертикали к плоскости образца (координата Z) и составляющего несколько сотен нанометров при низких температурах. Однокоординатная система подвода иглы к образцу позволяет исследовать поверхность в пределах, задаваемых диапазоном развертки сканера. Если же надо исследовать различные участки образца на площади, превышающей диапазон сканирования, то необходимо обеспечить перемещение иглы с.т.м. в плоскости поверхности образца (координаты X и Y) на расстояния, значительно большие диапазона сканера. Создание такого устройства особенно актуально для низкотемпературных приборов, поскольку сканеры с.т.м. изготовлены обычно из пьезокерамики ЦТС (цирконат-титанат свинца), электромеханические коэффициенты которой при охлаждении от комнатной до температуры жидкого гелия (4.2 К) уменьшаются в ~ 5 раз.

Для позиционирования по оси Z иглы с.т.м. широкое применение получили конструкции на основе шаговых пьезодвигателей с поочередным перемещением опор [1, 2] или с использованием принципа инерционного движения [3, 4]. В литературе описаны конструкции, в которых используются две концентрические пьезотрубки для обеспечения всех перемещений в с.т.м. [5].

Для достижения надежной работы при низких температурах была предложена конструкция на основе двухфазного [6] или трехфазного [7] устройства перемещения. Последняя показала надежную работу при низких температурах. Прибор получился компактным и устойчивым к внешним вибрациям, что позволило проводить чувствительные с.т.м.-эксперименты [8] непосредственно в транспортном дюаре с простой виброизоляцией. В такой конструкции подвижный шток держался тремя прижимными пластинками, расположенными через 120° , которые могли перемещаться пьезокерамикой вдоль вектора требуемого направления. При этом каждая пластинка в идеале создает силу трения покоя, равную $\sim 1/3$ от общей величины, и перемещение одной пластинки не приводит к движению штока — только совместное перемещение двух пластинок обеспечивает его движение.

С аналогичным принципом работы известны и более сложные конструкции, например с шестью держателями подвижной части, выполненной в виде трехгранной призмы [9]. Описаны и конструкции для позиционирования иглы в низкотемпературных с.т.м. на основе электромагнитных систем [10]. К основным достоинствам электромагнитных систем относятся небольшое управляющее напряжение, < 100 В, и практически не зависящие от температуры шаги. К недостаткам можно отнести большую величину импульса управляющего тока, который может достигать 10 А при

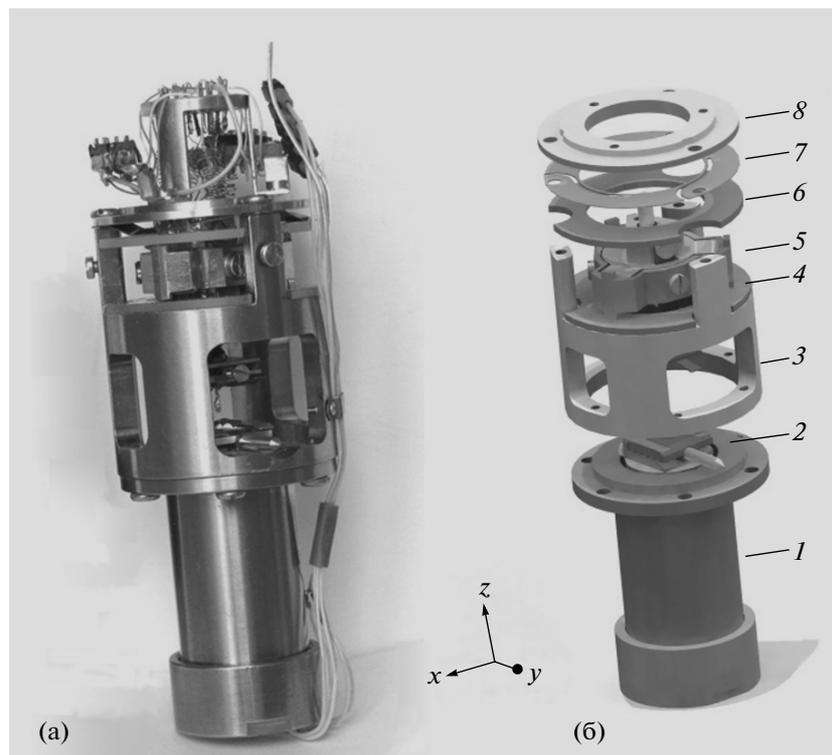


Рис. 1. Общий вид сканирующего туннельного микроскопа (а) и его конструкционная схема (б). 1 – модуль сканера; 2 – столик образца; 3 – корпус модуля нанопозиционера; 4 – опорное кольцо (сапфир); 5 – подвижная часть позиционера; 6 – прижимное кольцо (сапфир); 7 – прижимная пружина (бронза); 8 – верхняя крышка модуля позиционера.

длительности 20–200 мкс, а также бóльшую по сравнению с пьезодвигателями величину шага.

В данной работе представлен разработанный нами компактный позиционер иглы по трем координатам для туннельного микроскопа, работающего в широком диапазоне температур, от комнатной до сверхнизких (до 0.3 К), с максимальным диапазоном перемещений 3.5 мм. Точность позиционирования составляет 10 нм по оси Z и 50 нм в плоскости поверхности образца. Конструкция предназначена для работы в условиях сверхвысокого вакуума, собрана из вакуумно-чистых материалов и допускает прогрев до 150°C. Прибор выполнен из немагнитных материалов и может работать в сильных магнитных полях.

Разработанный туннельный микроскоп состоит из двух функциональных модулей – сканера и позиционера. Оба модуля имеют одинаковые узлы крепления монтажного столика для образца (или иглы с.т.м.). Замена образца возможна с использованием манипулятора в условиях сверхвысокого вакуума *in situ*. Модульная конструкция позволяет использовать разные сканеры с одним нанопозиционером. Общий вид туннельного микроскопа с 3D-нанопозиционером представлен на рис. 1а, на рис. 1б приведена его схема. Модуль сканера 1 крепится к корпусу модуля нанопозиционера 3 шестью винтами. К корпусу позицио-

нера приклеено сапфировое кольцо 4, на которое опирается подвижная часть позиционера 5, поджатая сверху через аналогичное кольцо из сапфира 6 пружиной 7. В сборе конструкция держится крышкой 8. На крышке расположены электрические разъемы и предусмотрена возможность крепления емкостного двухкоординатного датчика положения. Внешний диаметр корпуса модуля позиционера 30 мм, полная высота (с учетом разъемов и крепления датчика перемещения) 50 мм.

На рис. 2 показана конструкция подвижной части позиционера. Чтобы лучше показать ее детали, этот узел представлен в перевернутом относительно рис. 1 виде. Позиционер содержит два независимых шаговых двигателя: один – для перемещения по координате Z , другой – для позиционирования в плоскости X, Y . Шаговый двигатель оси Z аналогичен хорошо зарекомендовавшему себя трехфазному шаговому пьезодвигателю [7]. В описываемом приборе используются три сборки 4 из двух пьезопластинок каждая, работающие на сдвиг, типа P-111.01 производства компании PI Ceramic [11]. Их пьезокоэффициент составляет ~2 нм/В при комнатной температуре. Использование пьезоблоков позволяет уменьшить напряжение питания и увеличить надежность работы привода. Два таких пьезоблока приклеены к фигурному вырезу в основании 1 подвижной части

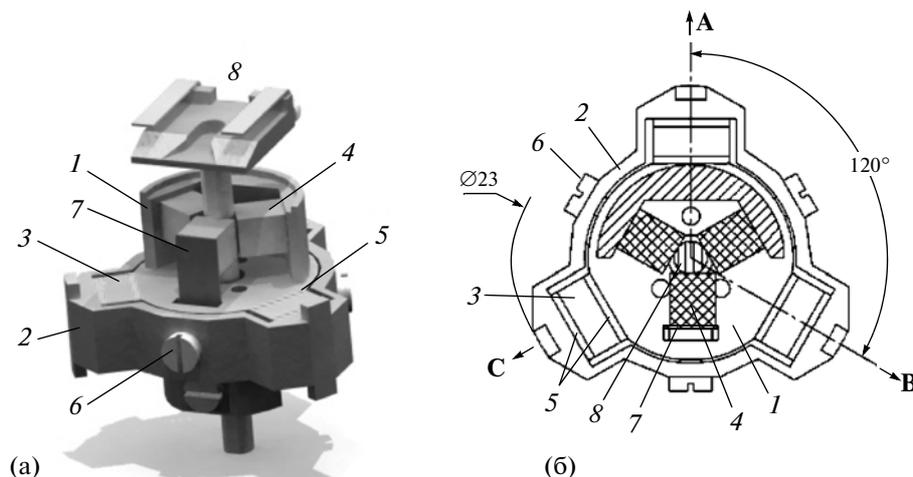


Рис. 2. Схема подвижной части нанопозиционера. 1 – основание позиционера; 2 – внешний корпус-пружина (бронза); 3 – пьезоблок (X, Y)-привода; 4 – пьезоблок Z -привода; 5 – прокладки (сапфир); 6 – винт натяжения пружины; 7 – пружина Z -привода; 8 – держатель образца (иглы) с подвижным стержнем. Направление перемещения показаны векторами **A**, **B** и **C**.

позиционера, изготовленном из титанового сплава ВТ1-0. Третий пьезоблок приклеен к пружине 7, которая прижимает подвижный стержень и обеспечивает необходимую силу трения. Все три пьезосборки расположены под углом 120° друг к другу. Подвижный цилиндрический стержень Z -привода выполнен из бронзы. К концу стержня приклеен держатель монтажного столика 8 для образца или иглы. Для предотвращения вращения стержня в процессе работы одна сторона стержня сошлифована на глубину ~ 0.2 мм.

Для перемещения по координатам X, Y предназначен трехфазный шаговый привод оригинальной конструкции, который крепится на основании 1 (см. рис. 2). Пьезоэлементы, задающие движение в плоскости X, Y , работают с линейным расширением. В конструкции используются три пьезоблока типа PL055 производства компании PI Ceramic, расположенные под углом 120° друг к другу и прижатые к основанию через сапфировые прокладки 5. Согласно технической документации на пьезоблоки PL055, для их нормальной работы рекомендуется создавать предварительную нагрузку, поэтому пьезоблоки поджаты бронзовой пружинкой 2, которая одновременно служит обоймой подвижной части позиционера. Сжатие пьезоблоков регулируется тремя винтами 6, расположенными между блоками, величина прижима определяется по наводимому заряду пьезоблоков.

Опишем работу позиционера на примере перемещения в направлении **A** (см. рис. 2б). Сначала на верхний пьезоблок подается скачок напряжения, приводящий к удлинению этого пьезоблока. В результате связанная с ним “нога”, образованная выступами в обойме, зажата между кольцами 4 и 6 (см. рис. 1б), проскальзывает относительно колец в направлении **A**. Далее поочередно подаются на-

пряжения на два других пьезоэлемента, приводящие к их укорочению и соответствующему проскальзыванию связанных с ними “ног”. Затем напряжение со всех трех пьезоблоков возвращается к исходному значению, и основание (X, Y)-привода смещается на один шаг. Далее цикл повторяется нужное число раз. Комбинируя направления изменения напряжения (сжатие или растяжение этих блоков), можно обеспечить перемещение подвижной части позиционера на один шаг за цикл в любом из шести направлений (с учетом реверса) под углами 120° . На рис. 2 эти направления обозначены векторами **A**, **B** и **C**. При внешнем диаметре корпуса модуля позиционера 30 мм максимальное перемещение в плоскости (X, Y) составляет ~ 3.5 мм. Если увеличить внешний диаметр корпуса модуля, то можно увеличить и диапазон перемещения в плоскости (X, Y). По оси Z величина перемещения ограничена только длиной движущегося стержня. В нашем варианте прибора она составляет ~ 4 мм.

Для управления работой нанопозиционера используются два электронных блока, которые управляются по сигналам от внешнего регистра компьютера. Для связи с компьютером использовался блок производства National Instruments [12], подключаемый через USB-разъем, программа управления написана в среде LabView [12].

Блок управления Z -позиционера такой же, как в предыдущей работе [7]. Он состоит из трех электронных ключей на базе n -м.о.п.-транзисторов с максимальной амплитудой импульсов до ± 250 В. Блок управления (X, Y)-позиционера содержит четыре ключа на основе м.о.п.-транзисторов с p - и n -каналом. Упрощенная схема двух каналов представлена на рис. 3а. Преобразователи уровней D_1 и D_2 с оптоэлектронной развязкой форми-

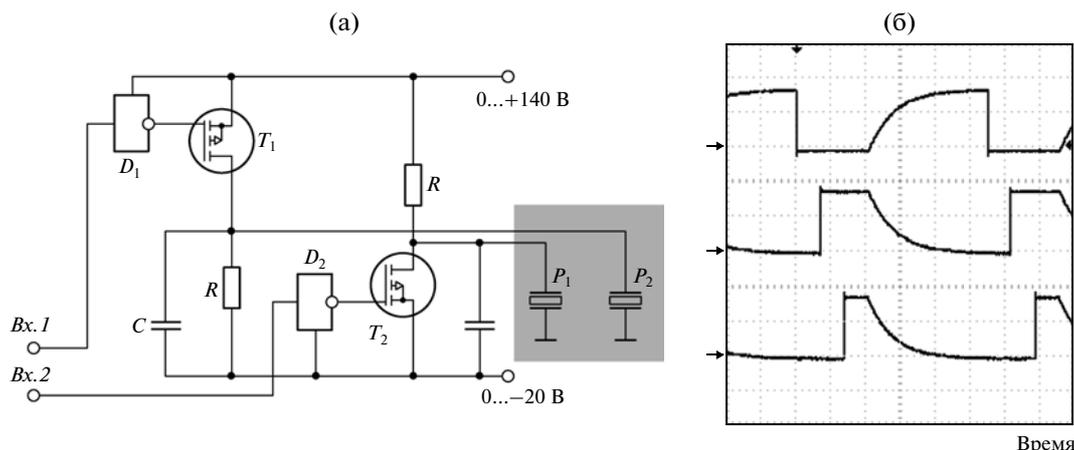


Рис. 3. а – схема формирования импульсов, подаваемых на пьезодвигатели, для двух каналов, управляющий регистр подключается к входам *Vx.1*, *Vx.2*; *D*₁, *D*₂ – преобразователи уровней; *T*₁ – *p*-м.о.п.-транзистор IRF9630; *T*₂ – *n*-м.о.п.-транзистор IRFBE20; *R* – 75 кОм; *C* – 0.1 мкФ; *P*₁, *P*₂ – пьезоблоки. б – осциллограмма напряжений на пьезоблоках, вся развертка по горизонтали 100 мс. Для наглядности выходные напряжения сдвинуты друг относительно друга по вертикали, размах импульсов ~38 В.

руют из выходных TTL-сигналов необходимые уровни для работы затворов полевых транзисторов. Коммутация подключения пьезоблоков для изменения направления осуществлялась механическими переключателями (направление и реверс). Максимальное напряжение, прикладываемое к пьезоблокам PL055 при комнатной температуре, согласно технической документации, должно быть в пределах от +110 до –20 В. При низких температурах возможно использование большего напряжения, в нашем случае оно было ограничено диапазоном от +140 до –20 В. Напряжение можно менять ступенчато, с шагом примерно 35 В. Тем самым регулируется величина шага позиционера. Быстрое перемещение “ноги” позиционера происходит при открытии канала полевого транзистора, медленное – при заряде или разряде пьезоблока через сопротивление 75 кОм. Для задания времени заряда–разряда служит дополнительный конденсатор $C \sim 0.1$ мкФ, подключаемый параллельно пьезоблоку. Собственная емкость одного пьезоблока при температуре 4.2 К равна ~ 35 нФ, таким образом, общая емкость конденсатора RC цепочки будет равна ~ 135 нФ. При комнатной температуре емкость пьезоблока составляет ~ 500 нФ,

поэтому постоянная времени увеличивается. Следует отметить, что, измеряя емкость пьезоблока, можно судить о температуре прибора. На рис. 3б приведена осциллограмма импульсов на пьезоблоках при последовательном задании двух шагов. Для наглядности время между короткими фронтами импульсами увеличено, частота цикла (время одного шага) ~ 50 мс.

В качестве сканера использовалась пьезотрубка из материала ЦТС-19 диаметром 10 мм и длиной 32 мм. Пьезоблоки Р-111.01 изготовлены из материала PIC255 (по номенклатуре PI Ceramic[11]). Изготовитель пьезокерамики приводит параметры продукции только для промышленного диапазона температур и лишь сообщает, что при низких температурах параметры ухудшаются. Поэтому были выполнены собственные измерения параметра K_Z – коэффициента между величиной деформации пьезоэлемента и напряжения, приложеного к его электродам. При температуре жидкого гелия перемещение нанопозиционера определялось с помощью туннельного микроскопа, сканер которого был прокалиброван по высоте атомных ступеней и по изображениям атомной решетки графита и NbSe₂. Калибровка позволила определить параметры пьезоблоков из керамики PIC255 по перемещению *Z*-движителя при медленном изменении напряжения одновременно на всех трех пьезоблоках, т.е. без шагового перемещения. При работе при температуре 300 К был хорошо замечен гистерезис, составляющий $\sim 14\%$. Значения параметра K_Z пьезотрубки из материала ЦТС-19 для деформации вдоль оси *Z* (ось трубки) и сдвиговой деформации преобразователей Р-111.01 при температурах 4.2 и 300 К представлены в таблице. Из таблицы видно, что параметр K_Z для обоих пьезоматериалов изменяется в ~ 4.8 раза

Температура, К	Параметр K_Z , нм/В	
	пьезотрубки ЦТС-19	преобразователя Р-111.01
300	5.8	1.3
4.2	1.3	0.25
Отношение	4.46	5.2

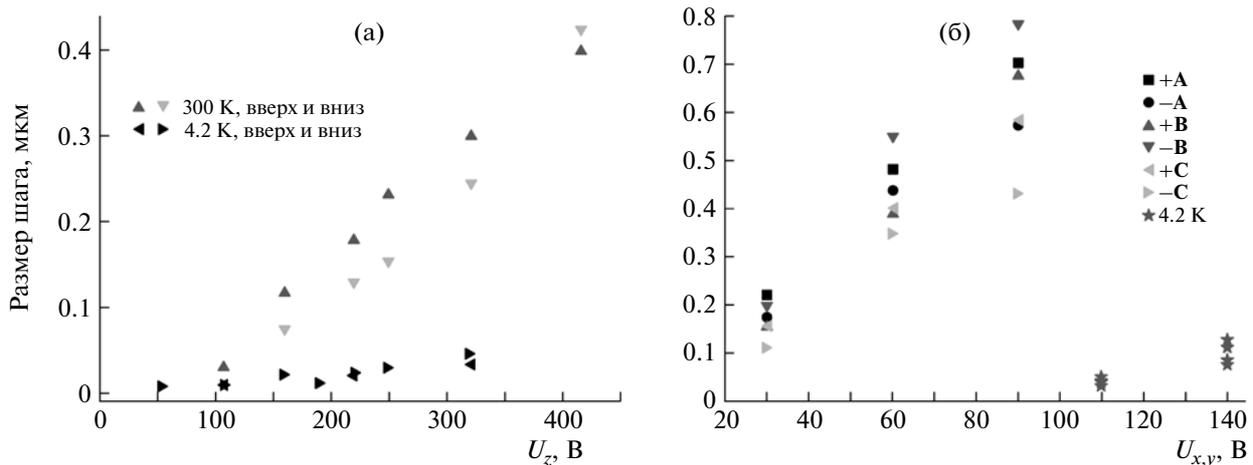


Рис. 4. Величина шага пьезопозиционера: **а** — для Z -пьезодвигателя при температурах 4.2 К и 300 К; **б** — для (X, Y) -позиционера для направлений $\pm A$, $\pm B$ и $\pm C$ (в одну и другую сторону) при 300 К, звездочкой даны усредненные данные для температуры 4.2 К по всем трем направлениям.

при охлаждении от комнатной до температуры жидкого гелия. При температуре 300 К для пьезоблока P-111.01 получена максимальная амплитуда ~ 0.65 мкм при размахе напряжения ± 250 В (500 В), что несколько меньше, чем данные изготовителя пьезоблоков $-1_{+50\%}^{-30\%}$ мкм. Возможно, это

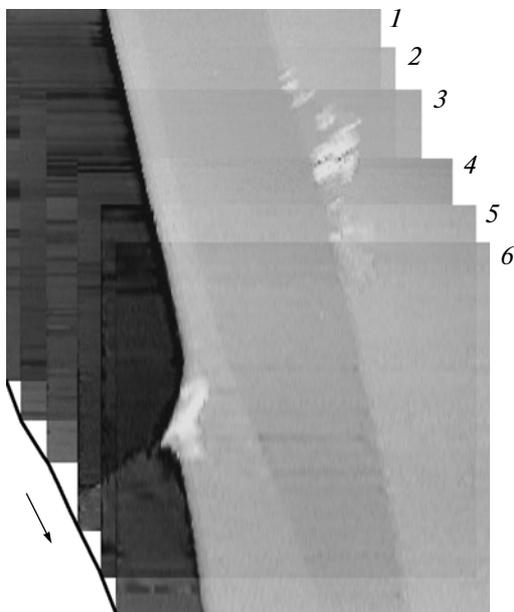


Рис. 5. Последовательные с.т.м.-изображения поверхности пиролитического графита, полученные между перемещениями (X, Y) -позиционера в одном направлении. Размер каждого кадра $\sim 0.67 \times 0.67$ мкм, температура 4.2 К. Между изображениями 1–6 было сделано соответственно: 2-2-3-2-2 шагов. Направление движения показано стрелкой. Левые нижние углы кадров соединены прямыми. Амплитуда импульсов 120 В.

связано с проскальзыванием подвижной части шагового двигателя.

Величина усредненного шага пьезодвигателей при комнатной температуре определялась по измеренному с помощью оптического микроскопа перемещению движущейся части после задания большого количества шагов. Шаги при низких температурах измерялись с помощью туннельного микроскопа. Для определения шагов (X, Y) -привода снималось с.т.м.-изображение поверхности большого размера ($\sim 1 \times 1$ мкм), затем задавалось некоторое количество шагов (обычно 1–3 шага), и повторно снималось с.т.м.-изображение. Полученные изображения обрабатывались редактором изображений и накладывались друг на друга так, чтобы характерные дефекты на поверхности образца совмещались. По получившемуся сдвигу изображения вычислялся шаг позиционера по горизонтали. Шаг по вертикали измерялся по задаваемому сканером смещению по оси Z на расстояние, обеспечивающее поддержание туннельного тока после каждого шага. Полученные результаты представлены на рис. 4. Анализ рис. 4а показывает, что величина шага при 4.2 К примерно в 10 раз меньше, чем при 300 К. Для (X, Y) -позиционера изменение величины шага еще больше и достигает ~ 15 раз. Значительное уменьшение величины шага при понижении температуры связано, по-видимому, с проскальзыванием движущейся части, которое практически не должно зависеть от температуры.

На рис. 5 показаны снятые последовательно с.т.м.-изображения поверхности пиролитического графита между шагами (X, Y) -позиционера при движении в одном направлении. Количество сделанных шагов было 2-2-3-2-2 соответственно номерам изображений. Привязка изображений осуществлялась по видимым дефектам на поверхно-

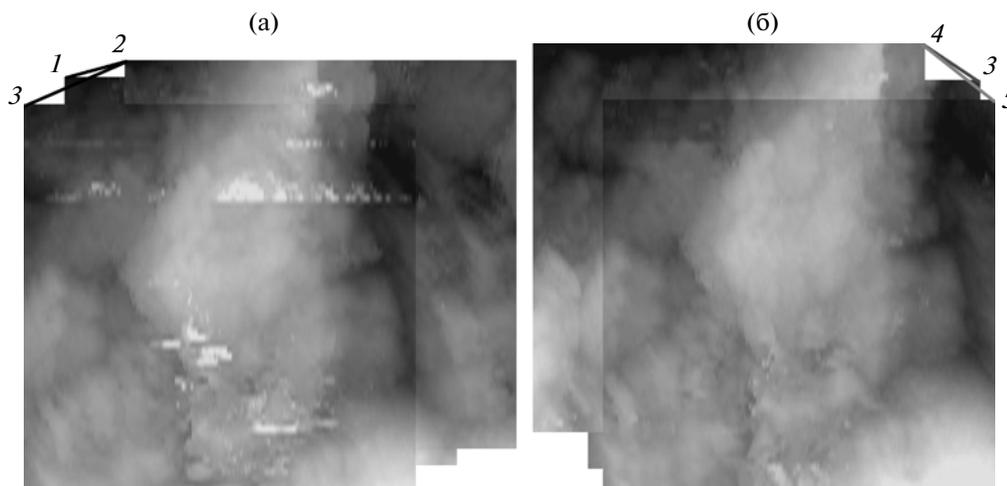


Рис. 6. Последовательные с.т.м.-изображения поверхности поликристаллического графита, полученные между перемещениями (X , Y)-позиционера в двух направлениях. Размер одного изображения $\sim 0.75 \times 0.75$ мкм, температура ~ 4.2 К. Последовательность действий: **а** – исходное изображение 1; два шага в направлении **А**, изображение 2; два шага в направлении $-\mathbf{A}$, изображение 3; **б** – исходное изображение 3; два шага в направлении **В**, изображение 4; два шага в направлении $-\mathbf{B}$, изображение 5. Изображения 3а и 3б эквивалентны. Амплитуда управляющих импульсов 140 В.

сти образца. По размеру кадров 670×670 нм определены величины шагов, получены соответственно значения: 37, 43, 45, 47 и 38 нм, средняя величина составила 42 ± 4 нм. На рис. 5 заметно отклонение перемещения от задаваемого направления на $\sim 11^\circ$.

На рис. 6 представлены с.т.м.-изображения, полученные на поликристаллическом графите. На рис. 6а показано перемещение вдоль одного направления туда и обратно: между изображениями 1 и 2 было сделано два шага в направлении **А**, средняя величина шага составила ~ 58 нм. Затем было сделано два шага в обратном направлении ($-\mathbf{A}$) и получено изображение 3. Величина шага сразу после реверса оказалась больше и составила ~ 103 нм. На рис. 6б показаны с.т.м.-изображения, полученные при перемещении в направлении другой рабочей координаты позиционера. Величины шагов составили 62 нм в направлении туда и 85 нм – обратно. На представленных изображениях была сделана оценка углов отклонения перемещений относительно горизонтальной оси вправо (по часовой стрелке): **А** $\sim -17^\circ$, $-\mathbf{A}$ $\sim 157^\circ$, **В** $\sim -150^\circ$ и $-\mathbf{B}$ $\sim 37^\circ$, угол поворота относительно задаваемого направления в первом случае составляет 174° , во втором – 187° . Усредненная разница в направлениях **А** и **В** составляет 126° . В обоих случаях величина шага после реверса направления оказалась больше предыдущего, что можно объяснить дополнительной силой, которая может возникнуть из-за действия прижимной пружины 7 (см. рис. 1). Другая возможная причина разности шага – коммутация управляющих напряжений при изменении направления движения. При изменении направления происходит переключе-

ние пьезоблоков, что приводит к дополнительным импульсам в момент переключения и смещению подвижной части позиционера. Из сравнения с.т.м.-изображений, снятых до и после переключения напряжения, получаем величину смещения ~ 20 нм. Программа управления создана так, что только при одной полярности движения все выходные напряжения в момент остановки равны нулю, при противоположном направлении на одном выходе блока управления присутствует управляющий потенциал. При использовании управляющего электронного блока с электронной коммутацией можно избежать появления дополнительных импульсов при переключении направления, введя в программу управления обнуление потенциалов при любой коммутации выходов.

Подвижную часть 5 (см. рис. 1б) (X , Y)-позиционера можно поворачивать вокруг оси Z на некоторый угол, который ограничен стойками корпуса позиционера 3. При смене образца происходит смещение подвижной части позиционера в крайнее положение, что служит для установки (X , Y)-позиционера в исходное положение. В данной статье описана модель нанопозиционера без датчика положения, однако конструкция модуля позиционера предусматривает установку двухкоординатного датчика положения (X , Y)-позиционера емкостного типа [13] на крышку 8 (см. рис. 1б).

Кроме приведенных в данной работе изображений поверхности поликристаллического графита большого масштаба, были получены изображения небольших участков с атомным разрешением при температуре жидкого гелия, что подтверждает стабильность устройства и доста-

точную для проведения чувствительных с.т.м.-экспериментов жесткость конструкции.

Авторы признательны А.Ф. Андрееву за интерес к работе и В.С. Эдельману за полезные советы и обсуждения, В.Е. Трофимову за тщательное изготовление деталей прибора в мастерской ИФП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gerber Ch., Binnig G., Fuchs H. et al.* // Rev. Sci. Instr. 1986. V. 57. P. 221.
2. *Pohl D.W.* // Surf. Sci. 1987. V. 181. P. 174.
3. *Эдельман В.С.* // ПТЭ. 1989. № 4. С. 149.
4. *Edelman V.S., Troyanovskii A.M., Khaikin M.S. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. 1991. V. B 9(2). P. 618.
5. *Dubuois C., Bisson P.E., Manuel A.A. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2006. V. 77. P. 043712.
6. *Altfeder I.B., Volodin A.P.* // Rev. Sci. Instr. 1993. V. 64. P. 3157.
7. *Володин А.П., Трояновский А.М.* // ПТЭ. 1997. № 5. С. 148.
8. *Troyanovski A.M., Aarts J., Kes P.H.* // Nature. 1999. V. 399. P. 665.
9. *Pan S.H., Hudson E.W., Davis J.C.* // Rev. Sci. Instr. 1999. V. 70. P. 1459.
10. *Офицеров А.В., Эдельман В.С.* // ПТЭ. 2005. № 2. С. 133.
11. http://www.physikinstrumente.com/en/products/linear_actuator/index.php
12. <http://www.ni.com/>
13. *Kolb P.W., Decca R.S., Drew H.D.* // Rev. Sci. Instr. 1998. V. 69. P. 310.