ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2009. Т. LXII, № 1.

удк 621.315

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

М.Г. АЗАРЯН

ЗАДАЧА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ

Предлагается техническое решение задачи вертикального прецизионного позиционирования для лабораторных зондовых микроскопов. Приведены некоторые результаты испытаний созданного такого движителя.

Ключевые слова: шаговый двигатель, инерционный двигатель, позиционирование, исполнительный элемент, туннельный зазор, стенд, комбинированный движитель.

Введение и постановка задачи. Исследования в нанотехнологии немыслимы без специальной наноизмерительной техники. По всей видимости, наиболее универсальным наноисследовательским устройством является зондовый микроскоп (3M) [1]. Уже налажен промышленный выпуск разнообразных микроскопов этого класса. С каждой новой моделью, как правило, повышаются их функциональные возможности и сервис. Однако их довольно высокая стоимость значительно сужает круг научных коллективов и лабораторий, имеющих возможность проводить необходимые исследования. Кроме того, сам процесс исследований предполагает возможные нестандартные задачи, которые требуют приспособления к ним измерительной техники. Сложность, специфичность, закрытость доступа к функциональным узлам, наконец, сама, опять-таки, дороговизна такой техники не могут способствовать их адаптирующему конструктивному и программному видоизменению. Выходом из сложившейся ситуации могут быть разработка и конструирование самими исследователями собственных лабораторных микроскопов – наноисследовательских стендов [2-6].

На этом пути возникает необходимость создания всего комплекса работающих узлов, обеспечивающих нужное функционирование лабораторного стенда. Одним из таких узлов является двигатель предварительного позиционирования. Желательно, чтобы он позволял автоматически позиционировать твердотельный зонд на расстоянии порядка микрометров от исследуемой поверхности (ИП) и после этого с предельно малыми шагами-подвижками вводить кончик иглы в ближнеполевую область (в которой осуществляется устойчивая регистрация информативного для данного типа ЗМ сигнала).

Одним из таких решений и является предлагаемая работа.

В лабораторном исследовательском туннельно-токовом стенде [7] необходимо было обеспечить возможность вертикальных прецизионных перемещений в достаточно большом динамическом диапазоне и с высокой точностью. Испытания этого стенда стимулировали поиск, разработку и проверку на практике разнообразных принципов и

конструкций подобных двигателей [8,9]. Специфичность задачи нанопозиционирования требует совершения многократных поступательно-возвратных вертикальных перемещений.

Для использования в стенде ранее созданного движителя [10] было необходимо значительно уменьшить габаритные размеры как самой конструкции, так и используемых в нем исполнительных элементов. Помимо этого, возникает необходимость заняться созданием и доводкой малогабаритных фиксирующих и направляющих деталей конструкции.

С учетом вышеизложенного был создан движитель на базе ШД. В этом новом движителе используется специально сконструированный редуктор-трансформатор вращения вала (РТВ) ШД в линейное перемещение.

Диапазон Z-перемещений применяемого в стенде трубчатого сканера -2 мкм. Это позволяет его использовать в алгоритме управления процессом организации туннельного зазора с обеспечением "запаса" динамического диапазона порядка 1 мкм (для устойчивого поддержания следящей системой достигнутого зазора зондповерхность). Однако, несмотря на его использование, практика работы со стендом продемонстрировала значительные трудности ввода кончика зонда в ближнеполевую область. Как правило, зонд соударялся с поверхностью. Если учесть, что ближнеполевая область для туннельного тока реально может иметь размеры порядка нескольких причина этого соударения, вероятно, кроется в нанометров, то величине обеспечиваемого ШД движителем шага позиционирования (~450 нм).

По всей видимости, система обратной связи не успевает с необходимой резкостью "отдернуть" поверхность от скачкообразно приближающегося в шаге зонда и предотвратить столкновение.

Исходя из этой картины, для разрешения возникшей проблемы следовало значительно уменьшить величину шага. Повышению редукции РТВ препятствовала технологическая сложность создания (в лабораторных условиях) малогабаритной прецизионной механики с микромасштабной фиксацией рабочих деталей конструкции.

Необходимую величину шага может обеспечить инерционный движитель (ИД).

Однако эксперименты с инерционными двигателями для вертикального перемещения разных конструкций (с применением также циклоидальных управляющих сигналов [10]) продемонстрировали труднодостижимое, многократное и стабильное осуществление подъема (отвода) зонда.

Было принято решение, воспользовавшись легкодостижимой ИД операцией спуска (подвода) зонда, объединить ИД с ШД движителем. В таком комбинированном движителе ШД должен обеспечивать грубый отвод/подвод в динамическом диапазоне, ограниченном лишь длиной вала ЩД, а ИД - только операцию тонкого подвода.

Созданный ИД образован исполнительным приводом и перестраиваемой системой фиксации перемещаемого тела (ПСФТ). Организация инерционного движения предполагает:

 относительно медленное смещение на величину ∆ несущей детали совместно с перемещаемым телом (без изменения силы их сцепления) из исходного положения; резкий возврат в исходное положение несущей детали и проскальзывание перемещаемого тела (за счет инерции, изменения силы сцепления).

Величина акта смещения зависит от массы тела, силы сцепления с несущей деталью, величины Δ . Исходя из последнего, в качестве привода используется биморфный пьезоэлемент. Закрепленный одним концом на редукторе-преобразователе, он, при достаточно малых прилагаемых напряжениях U⁶, обеспечивает такую величину Δ , которая делает ощутимым остаточный сдвиг перемещаемого тела относительно несущей детали в результате каждого акта.

Перемещаемое тело представляет собой полированный сапфировый цилиндрик (диаметром 5 *мм* и длиной 40 *мм*) с микродержателем зонда, закрепленным на нижнем конце.

ПСФТ (рис.1), обеспечивая фиксацию, одновременно служит и направляющей.



1 - сапфировый цилиндрик, 2 – перемещемый цилиндрический стержень, 3 – упругий прижимной элемент, 4 – винт регулировки прижима, 5 – держатель ПСФТ,
6 – дополнительная пружинка, 7 – фиксатор упругого прижимного элемента,
8 – свободный конец биморфного пьезоэлемента

Цилиндрическая форма передвигаемого тела упругим прижатием его к дугообразному ложу детали из кварцевой трубки (диаметр 5,5 *мм*, длина 12 *мм*) фиксирует его в поперечных направлениях. В то же время такая деталь свободна для вертикальных перемещений. Силы сцепления (поверхность прижимающей детали– цилиндрическое тело–дугообразное ложе) диктуются давлением упругого элемента на прижимающую деталь. Для тонкости регулировки давления воздействие регулировочного винта на упругий элемент проводится посредством дополнительной спиральной пружинки.

На рис.2 приведена схема созданного движителя.

Габаритные размеры позволяют легко интегрировать его в электромеханическую конструкцию туннельно-токового стенда.



Рис.2:

1 – ШД, 2 – вал, 3 - направляющие для РТВ, 4 - корпус РТВ, 5 - биморфный пьезоэлемент, 6 - прижимная фиксирующая система для ИД, 7 – кварцевая трубка, 8 - зонд

Для исследования работы комбинированного движителя применялась ранее использованная техника. Весь комплекс экспериментальных исследований проведен с привлечением виртуального стенда, созданного в LabVIEW-среде.

Результаты испытаний и их обсуждение. На рис.3 представлена одна из экспериментальных кривых, иллюстрирующая реализованные комбинированным движителем операции, необходимые для вертикального позиционирования передвигаемого стержня в нужном месте. Это достигается попеременным использованием ШД и ИД.



Рис.3: 1 - включение ШД, 2 - обеспечиваемое ШД перемещение, 3 - выключение ШД, 4-калибровочный сигнал, 5 - обеспечиваемое ИД перемещение

В процессе работы стенда необходимо, по возможности, свести к минимуму количество находящихся под управляющим напряжением элементов, поддерживающих туннельный зазор. Они - источники возможных помех. По этой причине необходимо отключить электрическое питание после отработки ШД своей функции (хорошо видно пространственное смещение из-за включения питания катушек ШД (отрезок І). После некоторого ожидания (полочка на кривой) запускается работа ШД по вертикальному перемещению (подъем) из позиции А в позицию Б (отрезок 2 кривой). Отключается питание ШДЗ. Величина смещения заметно разнится от 1. Это связано с нелинейностью использованного регистратора перемещений. Калибровочная метка формируется задаваемой величиной пространственного смещения незакрепленного конца пьезобиморфа (совместно с ПСФТ) $\Delta_{6\phi}$. Экспериментально определенная зависимость $\Delta_{6\phi}$ от напряжения управления пьезобиморфом позволяет масштабировать перемещения в любой позиции. На приведенной кривой высота пика 4 эквивалентна 15 мкм.

Наконец, с помощью ИД проведено позиционирование (опускание) перемещаемого объекта в исходную позицию А*5*.

На рис.4 демонстрируется управление самим финишным "тонким" ИД-позиционированием.

В момент 1 запускается работа ИД с амплитудой управляющего пилообразного сигнала U_{6.пилы1}= ·kвву (kвву – коэффициент усиления используемого высоковольтного усилителя). Отрезок 2 кривой указывает на возросшую скорость опускания (U_{6.пилы2} = 2·U_{6.пилы1}). Скорость перемещения на отрезке 3 наиболее высокая (U_{6.пилы} = 4·U_{6.пилы1}). "Излом" 4 может быть обусловлен относительно плохим качеством полировки поверхности на данном отрезке перемещаемого тела.





1 – ИД-перемещение с наименьшим шагом, 2 возрастание шага перемещения,

3 – максимальный шаг перемещения, 4 – перемещение в условиях ущербной поверхности



На рис.5 приведен интересный результат – процесс тонкого перемещения зонда ИД-двигателем в туннельном зазоре. Он получен в следующих условиях.



На первом этапе с помощью ШД зонд визуально позиционировался на достаточно малом (~*мкм*) расстоянии от поверхности исследуемого объекта (пирографит). На втором этапе был приведен в действие ИД. Варьируя амплитудой пилообразного напряжения, поступающего на исполнительный элемент ИД, удалось зарегистрировать перемещение зонда (в результате многократного повторения актов "ИД-шагания") в весьма малом (~ десятков нм) зазоре. В этом случае в качестве контрольного сигнала выступил регистрируемый усилителем-преобразователем стенда туннельный ток. Зонд, закрепленный на конце ПТ, перемещается в наноразмерной области, а используемый в стенде усилитель-преобразователь тока в напряжение регистрирует уже возникший туннельный ток. Запись велась при отключенной системе отслеживания постоянства величины туннельного тока. Достаточно долгое "некасание" зонда поверхности (из-за случайных механических и акустических помех), по всей видимости, обусловлено принятыми предосторожностями - электромеханика стенда накрыта вакуумным стеклянным колоколом (звукоизоляция) и помещена на специальную пассивную виброгасящую систему. Если исходить из того, что весь "видимый" на приведенной зависимости зазор порядка десятка нанометров, то картинка демонстрирует результат функционирования ИД в наномасштабном пространстве.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют полноценную функциональность созданного движителя для вертикального позиционирования в зондовых микроскопах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.25-49.
- 2. Володин А.П., Степанян Г.А., Хайкин М.С., Эдельман В.С. Сканирующий туннельный микроскоп с большим полем зрения, совместимый с растровым электронным микроскопом // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.185-187.
- Ермаков А.Б., Адамчук В.К. Атомно-силовой/туннельный микроскоп и его применение для исследования диэлектрического пробоя алмазной пленки на кремнии// Письма в ЖТФ.-1992. -Т.25, вып.5. - С.80-86.
- Azaryan M.H. Device for investigation of semiconductor nanostructures //National Conf.- Sevan.-10-12 September, 2001.-P. 283-288.
- 5. **Гуляев П.В., Шелковников Е.Ю., Осипов Н.И., Кизнерцев С.Р., Гудцов Д.В.** Компактный сканирующий туннельный микроскоп // Материалы докладов НТК «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства».- Ижевск, 2006.– С.150-152.
- 6. Kemiktarak U., Ndukum T., Schwab K. C. & Ekinci K.L. Radio-frequency scanning tunnelling microscopy.- 1 November 2007. Vol 450.- doi:10.1038.-Nature 06238.
- 7. Азарян М.Г., Лалаян А.А., Арутюнян В.М., Арзуманян Г.М., Белушкин А.В. К созданию зондового микроскопа сверхвысокого оптического разрешения // Ядерная физика и нанотехнологии: Сборник статей ОИЯИ.- Дубна, 2008.- С.190-197.
- А.с. SU,1541741 А1. Пьезоэлектрическое устройство перемещения / А.О. Голубок, Д.Н. Давыдов, В.А. Тимофеев, С.Я. Типисцев. - Опубл. 08.10.1989.
- Renner Ch., Niederman Ph., Kent A.D., Fischer E. A vertical piezoelectric inertial slider // Rev.Sci.Instr. –1990.- 61, N.3.-P.965-967.
- 10. **Азарян М.Г.** Способ и устройство микропозиционирования // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.-2007. - Т.60, N3.- С. 504-509.
- ЕГУ. Материал поступил в редакцию 13.07.2007.

Մ.Հ. ԱՉԱՐՅԱՆ ՈՒՂՂԱՀԱՅԱՅ ԴԻՐՔԱԲԵՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐԸ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐ ՉՈՆԴԱՅԻՆ ՄԱՆՐԱԴԻՏԱԿՈՒՄ

Առաջարկվում է զոնդային լաբորատոր մանրադիտակների ուղղահայաց պրեցիզիոն դիրքաբերման խնդրի տեխնիկական լուծումը։ Բերված են ստեղծված շարժիչի ֆունկցիոնալ հնարավորություններն ապացուցող փորձնական որոշ տվյալներ։

Առանցքային բառեր. քայլային տեղափոխիչ-շարժիչ, իներցիոն շարժիչ, դիրքաբերում, կատարողական տարր, թունելային բացակ, ստենդ, համակցված շարժիչ։

M.H. AZARYAN VERTICAL POSITIONING PROBLEM IN LABORATORY PROBE MICROSCOPES

The technical problem solution of vertical precision positioning for laboratory probe microscopes is described. Test results depicting the functional possibilities of the devised thruster are presented.

Keywords: stepper driver, inertia driver, positioning, correlate effecter, tunnel gap, stand, combined driver.