

М.Г. АЗАРЯН

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО МИКРОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Описываются способ микропозиционирования и реализующий его стенд. Приведены некоторые результаты испытаний осуществления как горизонтального, так и вертикального микроперемещений, необходимых и в зондовой микроскопии.

Ключевые слова: позиционирование, пьезоэлементы, стенд, двигатель, электромагнит, постоянный магнит, пластинка-держатель.

Введение. Работа зондового микроскопа сопряжена с изначальным X,Y,Z - позиционированием кончика твердотельного зонда, укрепленного на подвижном держателе, относительно выбранной области исследуемой поверхности (ИП) на расстоянии в несколько десятков нанометров от нее. Такое позиционирование призвано обеспечить регистрацию информативного сигнала, используемого в данном типе зондового микроскопа.

В конструкцию механизмов обеспечения достаточно тонкого достижения этой стартовой позиции необходимо привлечь механические редукторы перемещений [1-3]. Они преобразуют вращательное движение, которое обеспечивается электродвигателем или ручным управлением, в поступательное. Однако есть ситуации, в которых требуется проведение такой операции в труднодоступных условиях (например, высокого вакуума). Здесь предпочтительно дистанционное управление процессом перемещений. По этой причине прибегают к электрическим шаговым (с использованием вакуумно-совместимого специального редуктора), паучковым [4,5] и инерционными двигателям [6,7].

Работа с инерционными двигателями показала, что перемещение (в результате инерционного акта) держателя столика (или зонда), требуя поперечной, по отношению к направлению перемещения, фиксации (под собственным весом в направляющем пазе – горизонтальная конфигурация двигателя [8] или упругим цанговым прижимом – вертикальная конфигурация [9]), зависит и от сцепления с направляющими элементами. Оно диктуется фиксирующей силой, состоянием трущихся поверхностей держателя и направляющей, а это приводит к нестабильной работе двигателя. Решение же задачи обеспечения в одном инерционном двигателе и ортогональных X,Y - перемещений вовсе затруднительно, поскольку требует значительных конструктивных усложнений, что трудно совместить с необходимой малогабаритностью электромеханики тела микроскопа. Такая же зависимость от состояния рабочей поверхности присуща и "паучковым" двигателям с электростатической фиксацией.

В работе предлагается описание простого принципа работы и конструкции стенда и двигателя, способного обеспечить также и X,Y-перемещения. При его разработке учитывались следующие требования:

- двигатель должен работать и в вертикальной конфигурации;

- принцип его работы должен позволить организацию большого диапазона ортогональных перемещений;
- в позиции, уже достигнутой перемещением, фиксация должна обеспечиваться без привлечения электрического тока.

Эти условия можно удовлетворить, если в конструкцию двигателя, наряду с электромагнитами (ЭМ), ввести и постоянный магнит (ПМ), а держатель выполнить в виде пластинки. ЭМ реализуют "лапки", которые при подаче тока на катушки ЭМ "захватывают" сцеплением держатель для "протаскивания" его относительно поверхности ПМ. После завершения такого перемещения над ПМ сцепление с ЭМ приводится к нулю, в то время как новое положение пластинки-держателя фиксируется неизменным сцеплением с ПМ. Таким образом, функция ПМ заключается в удержании перемещаемого держателя в статической позиции. Само перемещение обеспечивается стандартным для подобных двигателей способом – исполнительный элемент (ИЭ) под действием приложенного электрического сигнала увеличивается (уменьшается) в размерах, что приводит к смещению закрепленного на нем ПМ из первоначального положения. Так как, по определению, держатель в зондовых микроскопах малогабаритен, удержание его и в вертикальной конфигурации ПМ вполне осуществимо.

Конструкция стенда. Для экспериментальной проверки выдвинутой идеи были сконструированы стенды однокоординатных перемещений с пьезокерамическим и электромагнитным ИЭ. Конструктивно они отличаются лишь используемыми ИЭ. Стенд с электромагнитным ИЭ, имеющим большую амплитуду колебаний упругой мембраны (ИЭ был сформирован на базе электромеханики телефона), с легкостью реализовывал перемещение. Однако из-за предпочтительности использования в реальных зондовых микроскопах пьезодвижителей после проработки технических, конструктивных и функциональных особенностей конфигурации был сконструирован стенд с пьезоэлектрическим ИМ.

На рис.1 приведена схема конструкции этого стенда. Здесь одна из двух жестких массивных стоек 1, скрепленных с основанием 2 несущей конструкции из кварцевого стекла (условие, приближающее к конструктивным особенностям реального зондового микроскопа), служит упором, и к ней крепится ИЭ 3. На его противоположной, свободной стороне прикреплен "удерживающий" ПМ 4. К внешним сторонам этой и второй стойки приклеены ЭМ 5. Столовые поверхности сердечников ЭМ и ПМ находятся в одной плоскости. К ним плотно прилегает предварительно отшлифованная поверхность перемещаемой пластинки – держателя 6. На рисунке изображена также система, позволяющая записывать ход кривой, отображающей движение держателя. Это - светодиод 7 и фотоприемник 8, зафиксированные относительно перемещаемого держателя, оптическая связь которых меняется заслоняющим излучением светодиода непрозрачным флажком 9. Он представляет собой треугольный отрезок фотобумаги, который свободно крепится к внешней поверхности держателя прижимным магнитиком. Такой прием позволяет легко зафиксировать флажок на держателе в таком месте, чтобы граница тени его располагалась в середине динамического диапазона ($\approx 0,5$ мм) этого опторегистратора.

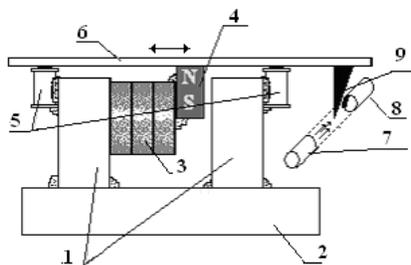


Рис.1. 1 – стойки; 2 - основание; 3 - стопка пьезодисков, приклеенных к одной из стоек, реализующих ИЭ; 4 - ПМ; 5 - скрепленные со стойками ЭМ; 6 -перемещаемая пластинка-держатель; 7 - светодиод и 8 - фотоприемник, организующие оптопару; 9 - флажок

В конструкции этого исследовательского макета в качестве ИЭ выступают собранные в стопку 3 дисковых пьезоэлемента с внутренним и внешними диаметрами d , D и толщиной h ($d = 12,8$ мм, $D = 23$ мм, $h = 5,5$ мм). Суммарная величина смещения этого ИЭ доведена до $\approx 1,2$ мкм (расширение пьезопакета) и $\approx 0,8$ мкм (сжатие пьезопакета) при величине прикладываемого к стопке напряжения ≈ 390 В. В стендах использовались ЭМ от РЭС-9, имеющие сопротивление ≈ 526 Ом. Это потребовало для его питания транзисторное усиление тока с встроенной карты цифро-аналогового преобразования до величины ≈ 30 мА.

Алгоритм работы стенда. В исходном состоянии ЭМ обесточены, и пластинка - держатель покоится на поверхности торцов сердечников ЭМ и ПМ. После подачи на ИЭ соответствующего сигнала ПМ (а значит, и держатель, сцепленный магнитной силой ФПМ только с ним), скользя по поверхностям сердечников ЭМ, совершает перемещение. Для фиксации достигнутого перемещения (шага) на ЭМ подается ток такой величины, чтобы формирующаяся сумма сил сцепления ЭМ - пластинка - держатель $2F_{ЭМ}$ превзошла силу ФПМ. После этого с ИЭ убирается сигнал, что возвращает ПМ в исходное положение. Однако, благодаря обеспечению условия $2F_{ЭМ} \gg F_{ПМ}$, держатель не сдвигается с новой позиции, а ПМ лишь "проскальзывает" под ним. Последний этап – сведение к нулю сил $F_{ЭМ}$. Таким образом, совершается элементарный шаг движения.

Испытания его подсказали необходимость увеличения величины перемещения ПМ (в шаге) для реализации нужного движения. Причина – плохое удовлетворение условия $2F_{ЭМ} \gg F_{ПМ}$, что являлось причиной неэффективного "протаскивания" над ПМ и частичного проскальзывания держателя над сердечниками ЭМ.

Для исключения явления остаточного магнетизма в сердечниках ЭМ сведение к нулю $F_{ЭМ}$ проводится с учетом его гистерезисной природы. С этой целью обнуление тока обмоток ЭМ производится по закону знакопеременного затухающего колебания. Эта операция, будучи наиболее длительной среди этапов движения, является основным ограничителем скорости движения.

Измерительный прибор, позволяющий организовать необходимую последовательность операций, организующих движение, управлять параметрами их этапов и отображать поведение отслеживающего сигнала, оформлен в виде программы (LabVIEW).

На рис.2 и.3 приведены типичные результаты измерений.

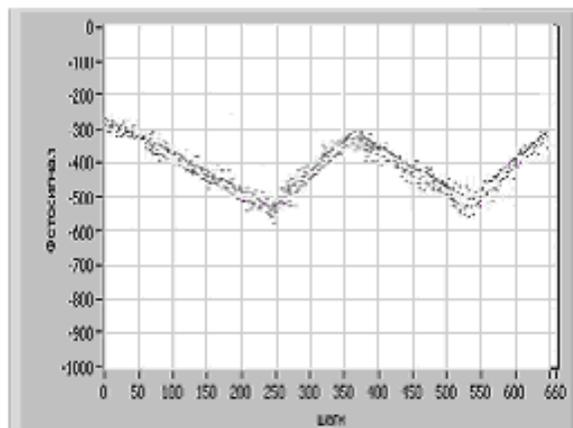


Рис.2. Ход зависимости сигнала с фотоприемника от количества шагов двигателя в прямом и обратном направлениях в горизонтальной конфигурации

Как видно на рис.2, максимуму изменения фотосигнала соответствует перемещение в горизонтальном направлении на расстояние около 150 мкм. В одном направлении для достижения этого результата понадобилось 120 "шагов", а в другом – 210. Варьированием амплитудой сигнала на ИМ можно менять и величину шага (для конкретно используемого ПМ).

Наблюдаемая асимметрия в перемещении вызвана неодинаковостью сжатия и расширения примененной пьезокерамики. Если роль такой операции сводится лишь к надежному осуществлению осторожного подвода (и отвода) зонда (в технике зондовой микроскопии) к поверхности исследуемого объекта на расстояние, при котором происходит устойчивая регистрация информативного сигнала, то такая асимметрия не столь существенна. Однако осуществление X,Y-перемещений (для позиционирования зонда над выбранной областью ИП в зондовой микроскопии) потребует, используя более совершенный ИЭ, свести к минимуму это явление.

Ход сигнала на рис.3 получен при работе стенда в вертикальной конфигурации.

Хорошо проявляющийся наклон трех (одинаковых по количеству шагов) этапов движения (подъем и опускание) объясняется необходимостью преодоления силы тяжести на этапе подъема и, наоборот, суммированием с ней при опускании. Вес используемой в стенде пластинки держателя ≈ 14 г. В этом случае длина диапазона относительного перемещения составляла около 230 мкм. На результатах измерения сказывается и нелинейность опторегистратора.

Приведенное измерение демонстрирует стабильность и надежность работы двигателя и в вертикальном положении.

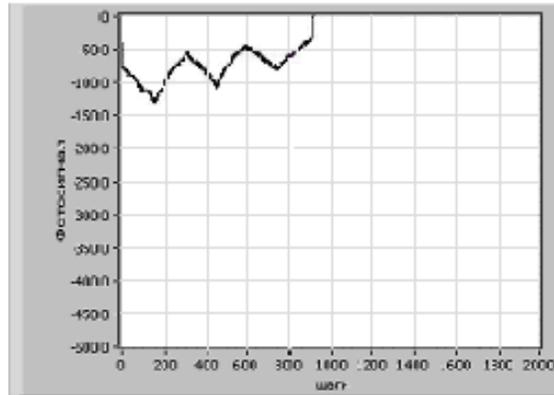


Рис.3. Ход зависимости сигнала с фотоприемника от количества шагов при подъеме и опускании пластинки

Таким образом, экспериментальное опробование предлагаемого способа операции предварительного позиционирования продемонстрировало его эффективность и простоту осуществления.

Из описанного следует, что перемещение диктуется направлением и направленностью изменения размеров ИЭ. Следовательно, используя ИЭ, реализующий ортогональные смещения (например, актюатор ортогональных смещений PISA-Shear Piezo Actuator, P-111.01. с характерными размерами 3х3х3.5 мм), можно создать малогабаритный двигатель X,Y-позиционирования предметных столиков зондовых микроскопов. Из принципа функционирования такого двигателя следует, что диапазон обеспечиваемых им перемещений ограничивается лишь размерами пластинки-столика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Эдельман В.С.** Сканирующая туннельная микроскопия // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.25-49.
2. **Быков В.А.** Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследований и модификации поверхностей: Дис. ... докт.техн.наук. - М., 2000.- 393 с.
3. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии / РАН ИФМ.-2004.-110с.
4. **Адамчук В.К., Ермаков А.В., Любинецкий И.В.** и др. Сканирующий туннельный микроскоп на основе монолитного пьезоэлемента крестообразного сечения // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.182-184.
5. **Coratger R., Beauvillain J., Ajustron F. et al** A stage for submicron displacements using electromagnetic coils and its application to scanning tunneling microscopy // Rev.Sci. Instrum. -1991.- 62, № 3.- P.830-831.
6. **Zeglinski D.M., Ogletree D.F., Beebe T.P., Hwang R.Q., Somorjai G.A., Salmeron M.B.** An ultrahigh scanning tunneling microscope for surface studies // Rev.Sci. Instrum .-1990. – 61, №.12.- P.3769-3774.
7. А.с. SU, 1541741 A1. Пьезоэлектрическое устройство перемещения / **А.О. Голубок, Д.Н. Давыдов, В.А. Тимофеев, С.Я. Типисцев.** – Оpubл. 21.12.1987.

8. **Azaryan M.H.** Device for investigation of semiconductor nanostructures //National Conf, Sevan.-10-12 September,-2001.-P. 283-288.
9. **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.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 01.12.2006.

Մ.Հ ԱԶԱՐՅԱՆ

ՄԻԿՐՈՂԻԲԱՎՈՐՈՒՄ ԻՐԱԿԱՆԱՑՆՈՂ ՄԵԹՈՂ ԵՎ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄ

Նկարագրվում են միկրոդիրքավորում իրականացնող մեթոդ և սարքավորում: Բերված են զոնդային միկրոսկոպիային անհրաժեշտ հորիզոնական և ուղղահայաց միկրոտեղաշարժեր իրականացնող փորձերի որոշ արդյունքներ:

Առանցքային բառեր. դիրքավորում, պիեզոէլեմենտ, ստենդ, շարժիչ, էլեկտրամագնիս, հաստատուն մագնիս, թիթեղակալ:

M.H. AZARYAN

TECHNIQUE AND DEVICE FOR MICROPOSITIONING

The technique and the stand realizing micropositioning are represented. Some results of test accomplishing the operation of horizontal and vertical microdisplacement that are necessary for probe microscopy are given.

Keywords: positioning, piezoelement, stand, engine, electromagnet, constant magnet, plate-holder.