

М.Г. АЗАРЯН

**ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ С НАНОМЕТРОВОЙ ТОЧНОСТЬЮ В  
ШИРОКОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ**

Предлагается простой способ осуществления линейного позиционирования с нанометровой точностью в динамическом диапазоне, не имеющем принципиального ограничения. Приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие нанометровые шаговые перемещения в динамическом диапазоне, превосходящем шаг в  $10^7$  раз.

**Ключевые слова:** линейное позиционирование, радиус спирали, преобразователь вращения в линейное перемещение, стэнд, нанометровые шаговые перемещения, динамический диапазон.

**Введение.** Нанотехнологические исследования предполагают наличие технических способов и средств, позволяющих синтезировать, наблюдать, активно исследовать и манипулировать наноразмерными структурными объектами. Это обстоятельство выдвигает специфичную техническую задачу по реализации многократных и повторяемых перемещений от одной структурной единицы к другой с возможностью фиксации у каждой. При этом диапазон перемещений в X,Y- плоскости, задающий площадь обзора исследуемой поверхности (ИП), может простирается от мм до см (например, в микроэлектронике).

Работа зондовых микроскопов (ЗМ) – пожалуй, самых совершенных и востребованных приборов для нанотехнологии, неразрывно связана с подобными трехмерными пространственными перемещениями кончика используемого зонда относительно ИП [1-3]. В них для обеспечения наноперемещений используются наиболее приемлемые и отработанные на сегодняшний день движители – пьезоэлементы. Пьезоприводы, управляемые электрическим напряжением, принципиально позволяют совершать очень малые элементарные перемещения (шаги) [4].

Не так давно задаваемые пьезосканерами размеры сканируемых областей в ЗМ были относительно малы ( $\sim$  мкм), и для расширения области исследуемого обзора ИП необходимо было последовательное перемещение области сканирования в смежные участки (из таких отдельных отсканированных областей может составляться картина всей ИП). Такие перемещения реализуются достаточно сложными конструкциями [5-6]. Однако их работа не всегда надежна – она зависит от ориентации в пространстве перемещаемого объекта, формы управляющих сигналов, поступающих на пьезопривод, качества трущихся поверхностей рабочих элементов ИД [7]. Это приводит к тому, что даже при удачном конструиро-

вании повторяемость перемещений нестабильна, и со временем их функциональность ухудшается. На сегодня разработаны сканирующие системы с пьезоприводом, позволяющие исследовать с атомарным разрешением области с линейными размерами в сотни микрометров (например, ЗМ AIST-NT). Уже известны фирмы, специализирующиеся на производстве миниатюрных пьезодвигателей, обеспечивающих динамический диапазон позиционирования в 20 мкм с шагом 50 нм [8]. Однако не всегда и не все исследовательские коллективы обладают финансовой возможностью для приобретения такой техники. В силу отмеченных обстоятельств поиск новых (возможно, более доступных для исследовательских лабораторий) технических решений поставленной задачи представляется вполне обоснованным.

**Принципы, заложенные в функционирование стенда.** Предлагается описание лабораторного испытательского стенда, демонстрирующего принципиальную возможность многократного и повторяемого линейного перемещения (шаг  $\sim 4$  нм) в обоих направлениях на расстояния, превосходящие сам шаг в  $10^7$  раз.

В основе функционирования ключевого узла стенда лежит простая идея. В шаговом двигателе (ШД) любую фиксированную позицию вращающегося вала ШД можно многократно повторять. Провернуть же из фиксированного положения вал ШД возможно лишь при подаче напряжения, превышающего определенный пороговый уровень, т.е. достигнутая позиция неизменна в пассивном состоянии ШД. Такой ШД-привод, используя некий механизм трансформации угла ( $\Theta$ ) вращения вала ШД в линейное перемещение ( $\Delta$ ) (преобразователь –  $\Theta/\Delta$ ), может осуществлять и повторяемое линейное позиционирование.

В этом ключевом узле главная "роль" принадлежит разработанному и реализованному специальному преобразователю –  $\Theta/\Delta$ . Именно он обеспечил отмеченные выше параметры позиционирования.

Функционирование преобразователя основано на том, что радиус рулона  $r$  ленты толщиной  $d$  при вращении несущего рулон вала с каждым оборотом изменяется на  $d$ , а знак изменения зависит от направления вращения.

На рис. 1 приведено схематическое изображение ключевого узла стенда, в котором были проведены экспериментальные испытания выдвинутой идеи.

Рисунок иллюстрирует как работу преобразователя, так и узел регистрации результирующего линейного перемещения. Как видно из рисунка, упор регистрирует изменение радиуса рулона, формируемого на ведущем вале. Шток (с упором) же может служить одновременно и приводом нужного линейного перемещения.

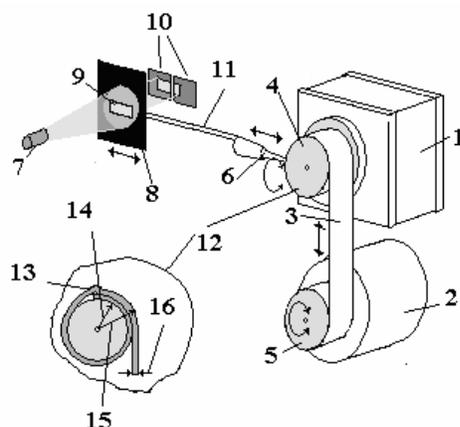


Рис. 1. Иллюстрация работы стенда: 1 – шаговый двигатель, 2 - микродвигатель, 3 - лента, 4 - бобина 1, 5 - бобина 2, 6 - упор, 7 - излучатель, 8 - шторка, 9 - прорезь, 10 - рабочие площадки фотоприемника, 11 - шток, связывающий упор со шторкой, 12 - вал, на котором формируется ленточный рулон, 13 - первичное утолщение, 14 - радиус  $r_0$  вала, на котором формируется рулон, 15 -  $r=r_0+2d$ - прирост радиуса после одного оборота вала, 16 -  $d$  ленты

Для осуществления этого перемещения в обоих направлениях в таком преобразователе необходимо предусмотреть (компактный) узел обеспечения многократной возможности как намотки, так и размотки ленты с рулона. Отслеживаемый изменяющийся радиус  $r$  рулона с этой бобины 1 собственно и есть преобразователь вращения в линейное перемещение. Микродвигатель (МД) постоянного тока обеспечивает необходимый натяг ленты и когда направление вращения таково, что на бобину 1 (закреплена на вале ШД) производится намотка, и когда обратное – размотка с нее. При изменении вращения вала ШД на обратное необходимо обеспечить теперь уже намотку ленты на закрепленную на вале МД бобину 2. Для этого на МД всегда поддерживается управляющее напряжение  $U_{м.д}$  того знака, при котором на бобину 2 лента должна наматываться. Величина  $U_{м.д}$  подобрана так, что развиваемый ШД крутящий момент всегда превосходит крутящий момент МД. В этом ключевом узле ШД ведущий, а МД – ведомый.

Регистрирующий узел сформирован излучателем и подвижной шторкой с прямоугольной прорезью, которая формирует световое пятно. Площадь этого пятна несколько меньше суммы рабочих площадок фотоприемника (ФП) и перекрывает обе эти смежно расположенные площадки. Шторка жестко связана с упором (в стенде – наконечник от шариковой ручки), упруго прижимаемым к поверхности рулона бобины 1. Усиленный разностный сигнал  $U_p$  с этих площадок пропорционален перемещению светового пятна по рабочим поверхностям ФП.

Испытательский стенд компьютеризирован. Для сопряжения стенда с компьютером использовались компьютерные карты NI 6221 и Advantech 1723. Взаимодействие со стендом осуществляется посредством виртуального исследовательского прибора, созданного в программной среде LabVIEW. Он обеспечивает: ручное инициирование каждого шага ШД, непрерывный режим его вращения, изменение направления движения, при необходимости, отображение (на графопостроителе прибора) зависимости  $U_p$  от количества шагов, совершенных ШД, и запись его в файл.

**Обсуждение результатов.** На рис. 2 приведены полученные типичные экспериментальные зависимости прямого и обратного ходов.

Повторяющиеся пики на кривых 1,2,3,4 рис. 2а отображают периодичность прохождения (под упором регистрирующей системы) поверхности того сектора рулона вращающейся бобины, в котором формируется достаточно резкий "скачок"  $d$ . Его образование связано с некоторым изначальным локальным утолщением на первом слое формируемого лентового рулона. Из-за круглой формы исходного вала возрастание радиуса рулона происходит скачкообразно (см. поясняющую вкладку на рис. 1). По мере увеличения слоев намотки этот пик "размывается" (кривые 3 и 4 иллюстрируют сказанное). Сам ход кривых на повторяющихся отрезках (прямой - 1,3 и обратной - 2,4) зависимостей незначительно отличается друг от друга. Это можно приписать несовершенству механического взаимодействия шарика упора с податливым материалом используемой здесь ленты (магнитофонная лента). Используемая пленка имела толщину  $d=1,5$  мкм, значит, расстояние по оси ординат между пиками пропорционально 1,5 мкм.

На графике приведена также кривая, полученная независимой калибровкой (с использованием стрелочного микрометра) регистрирующего узла. Сравнение с ней демонстрирует, что, на самом деле, расстояние между пиками равно 1,5 мкм.

Некоторая негладкость хода между скачками, по всей вероятности, связана с несовершенством созданных в лабораторных условиях узлов стенда. Вместе с тем даже такой макет позиционера уже может быть использован, например, в зондовых микроскопах в качестве двигателя для быстрого предварительного подвода зонда к исследуемой поверхности и ввода в область "захвата" обратной связью микроскопа (например, в лабораторном туннельно-токовом стенде **Z**-динамический диапазон пьезосканера порядка 1 мкм [9]).

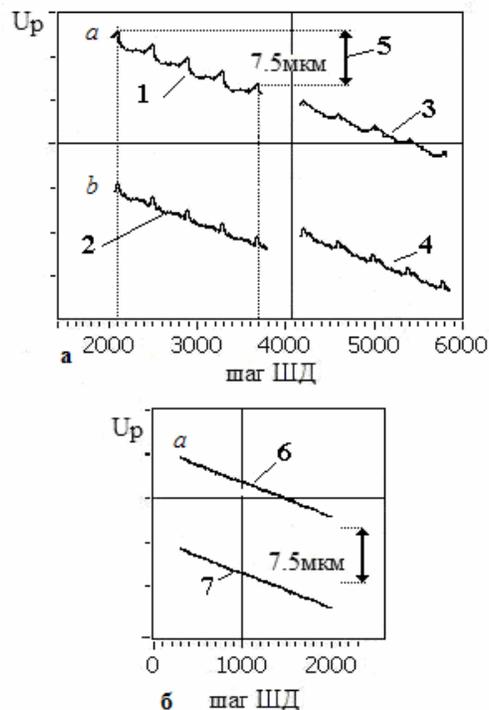


Рис. 2. Зависимости  $U_p$  (шаг ШД), полученные при прямом (а) и обратном (б) направлениях вращения ШД: 1,2 - прямая и обратная зависимости при невысоком количестве сформированных слоев рулона; 3,4 - прямая и обратная зависимости при большем количестве сформированных слоев (форма вала - окружность); 5 - калибровочная кривая, 6,7 - прямая и обратная зависимости (форма вала приближена к спиралевидной)

С целью придания исходному валу рулона формы, близкой к спиралевидной, используя акриловый клей в качестве тонкослойного наполнителя с соответствующей визуальной коррекцией его толщины, была проведена предварительная формовка первого слоя рулона. Результат испытания уже с таким самодельным валом приведен на рис. 2б. Он демонстрирует значительно улучшенную характеристику.

Если форма исходного вала, на котором формируется рулон (бобина 1), спиралевидна, то элементарное изменение  $\Delta r = d/n$  ( $n$  – число "шагов" ШД, необходимое для поворота вала на  $360^\circ$ ). Так как количество шагов, обеспечивающее один оборот стенового ШД, равно 386, то можно ожидать, что один шаг приводит к перемещению в среднем на  $0,004 \text{ мкм}$  ( $1,5 \text{ мкм}/386$ ). Для фактической регистрации подобных нанометровых изменений требуется значительное усове-

шенствование электронного усилителя для  $U_p$ . На наш взгляд, такая работа (в данном случае – испытание самой идеи) не обязательна, так как простота логики функционирования стенда самодостаточна для подтверждения столь рекордного значения шага.

Естественно, повторяемость шага такого масштаба задается однородностью используемой ленты (в смысле отклонений толщины  $d$  вдоль длины используемой ленты) и плотностью намотки на ведущую бобину.

**Выводы.** Функциональность созданного в лабораторных условиях такого позиционера с наномасштабным шагом перемещения подтверждена экспериментально. При соответствующей технологии разработки всех ответственных узлов приведенного механизма (например, отработка формирования исходного вала в виде спирали) можно будет создать более совершенный позиционер на таком принципе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия // ПТЭ. - 1989.- 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.-393с.
3. Неволин В.К.Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. - 159с.
4. Сканирующий туннельный микроскоп на основе монолитного пьезоэлемента крестообразного сечения / В.К. Адамчук, А.В Ермаков, И.В Любинецкий и др.// ПТЭ.- 1989. -5.- С.182-184.
5. А.с.SU,1541741 А1. Пьезоэлектрическое устройство перемещения / А.О. Голубок, Д.Н. Давыдов, В.А. Тимофеев, С.Я. Типисцев. - 1988.
6. An ultrahigh scanning tunneling microscope for surface studies / D.M. Zeglinski, D.F. Ogletree, Jr T.P. Beebe et al // Rev.Sci. Instrum. –1990.–61, No12.-P.3769-3774.
7. Azaryan M.H. Device for investigation of semiconductor nanostructures // Proc. of the third National Conf.10-12 September.- Sevan,2001.-P. 283-288.
8. Самарин А.А.Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели // КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ.- 2006. – N10.- С.310.
9. Азарян М.Г. Реализация микроскопирования в лабораторном туннельно-токовом стенде // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.- 2009.- Т.62, N4.-С. 441-449.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 12.05.2012.

Մ.Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ

ԼԱՅՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ ՆԱՆՈՄԵՏՐԱԿԱՆ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ  
ԴԻՐՔԱՎՈՐՈՒՄ

Ներկայացված է պարզ եղանակ՝ իրականացնելու համար գծային տարածական դիրքավորում, որի դինամիկ տիրույթը սկզբունքորեն չունի արգելակում: Բերված են փորձնական արդյունքներ, որոնք ցուցադրում են նանոմետրական քայլերով տեղափոխություն դինամիկ տիրույթում, որը գերազանցում է այդ քայլը  $10^7$  անգամ:

**Առանցքային բառեր.** Գծային դիրքավորում, պարույրի շառավիղ, պտույտ-գծային տեղափոխության փոխակերպիչ, ստենդ, նանոմետրական քայլային տեղաշարժումներ, դինամիկ տիրույթ:

M.H. AZARYAN

POSITIONING WITH NANOMETER ACCURACY IN VERY LARGE-SCALE  
DYNAMIC RANGE

A simple method for linear positioning with nanometer accuracy in the dynamic range having no principal limiting is proposed. The testing bench based the law of variation for spiral radius change is described and realized. The experimental results exhibiting nanometer stepping transference in dynamic range exceeding the step by  $10^7$  times obtained by use of the bench are presented.

**Keywords:** linear positioning, spiral radius, method, bench, nanometer stepping transference, dynamic range.