

УДК 53.097

**НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ СКАНЕРОВ-
ПОЗИЦИОНЕРОВ СКАНИРУЮЩИХ ЗОНДОВЫХ
МИКРОСКОПОВ И ЕЕ КОМПЕНСАЦИЯ ПОСРЕДСТВОМ
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

И. А. КАЧАН, Н. А. ЮРИН

ОАО «Оптоэлектронные системы»

Минск, Беларусь

UDC 53.097

**NON-LINEARITY OF THE PIEZOCERAMICS OF SCANNER-
POSITIONERS OF SCANNING PROBE MICROSCOPES AND ITS
COMPENSATION BY CLOSE LOOP FEEDBACK**

I. A. KACHAN, N. A. YURING

Аннотация

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) – устройство способное воспроизводить топографию поверхности образца с очень большим разрешением, вплоть до атомного уровня. Ранние АСМ при сканировании поверхности работали в режиме без обратной связи. Это приводило к погрешностям восстановления изображения поверхности из-за присущих артефактов пьезостола (гистерезис, нелинейность, ползучесть, температурный дрейф). Сегодняшние АСМ используют обратную связь для минимизации эффектов гистерезиса, ползучести, температурного дрейфа. В данной работе приведены подходы к реализации коррекции нелинейности пьезостола при сканировании в направлениях ХУ, использующиеся в сканирующем зондовом микроскопе СЗМ-200.

Ключевые слова:

емкостно-цифровой преобразователь, нелинейность, артефакты.

Abstract

The Atomic Force Microscope (AFM) – is a device capable of reproducing the topography of sample surface with extremely high resolutions, up to the atomic level. Early AFMs were operated in open loop. As a result, they were susceptible to piezoelectric creep, thermal drift, nonlinearity, hysteresis. These effects tend to distort the generated image. Recently a new generation of AFMs are equipped with feedback close loops that work to minimize the adverse effects of hysteresis, piezoelectric creep and thermal drift. In this paper we illustrate approaches to the implementation of the correction of the piezoelectric nonlinearity when scanning in the XY directions that uses in scanning probe microscope SPM-200.

Key words:

capacity-digital converter, non-linearity, artefacts.



Введение

Электронная промышленность в настоящее время испытывает потребность в контроле интегральных микросхем с нанометровой топологией.

Существует проблема, сдерживающая разработку и изготовление интегральных схем с топологическими элементами в нанометровом диапазоне размеров, решая которую неприменимо использовать традиционные оптические методы для контроля линейных размеров по пространственным координатным осям. Сканирующая зондовая микроскопия, в частности атомно-силовая микроскопия (АСМ), в отличие от оптических и электронных микроскопов, позволяет получать трехмерные изображения поверхности образцов в реальном пространстве от атомных размеров до десятков микрон.

При производстве микросхем контроль линейных размеров является одной из основных технологических операций и АСМ выступает здесь как метрологическое средство измерения геометрических характеристик рельефа. В связи с этим следует уделить особое внимание изучению артефактов и их последующего исключения из измерений. Главными источниками погрешностей и ошибок являются нелинейность преобразований в аппаратной части прибора (игла-кантилевера, образец, пьезосканер) и нелинейность, заложенная в числовых алгоритмах программного обеспечения микроскопа [1].

Целью работы является аппаратно-программная реализация коррекции нелинейности движения пьезосканера в направлении ХУ.

Пьезоэлектрическая керамика

Для перемещения иглы кантилевера на малые расстояния в СЗМ-200 используются пьезоэлектрические двигатели. В большинстве случаев пьезоэлектрические двигатели работают с использованием обратного пьезоэффекта.

В СЗМ в качестве пьезоматериала используется пьезокерамика, обладающая высоким пьезомодулем. Пьезокерамика состоит из монокристаллических зерен с типичным размером 0,5–50 мкм.

Химический состав большинства пьезокерамик представляет собой $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (цирконат-титанат свинца, ЦТС) с различными добавками. В качестве добавок используются Nb, Sn, Bi, La – легирующие добавки (менее 5 %) и Sn, Ba, La – модифицирующие примеси (более 5 %). В неполярной керамике зерна и, соответственно, полярные оси их доменов ориентированы хаотично, что обуславливает ее квазиизотропное поведение. Для получения необходимых свойств (обратный пьезоэффект), необходимо произвести поляризацию пьезокерамики [2]. Этот процесс заключается в нагреве материала до температур выше температуры Кюри T_c и последующем охлаждении во внешнем электрическом поле до комнатных температур. После снятия внешнего электрического поля в материале остается остаточная поляризация [3]. При дальнейшем использовании пьезокерами-

ки осуществлять ее нагрев выше точки Кюри нельзя, т. к. при этой температуре пьезокерамика деполяризуется. В СЗМ-200, выпускаемом ОАО «Оптоэлектронные системы», пьезокерамика выбрана от производителя Physik Instrumente(PI).

В идеальном случае механическое напряжение в пьезокерамике линейно зависит от прикладываемого электрического потенциала:

$$\sigma = d \cdot E,$$

где σ – механическое напряжение; E – напряженность электрического поля; d – коэффициент деформации [4]. Коэффициент деформации является характеристикой данного пьезоэлектрического материала. На практике механическое напряжение пьезоэлектрической керамики на приложенное электрическое поле отличается от идеальной линейной по причине наличия таких негативных явлений, как собственная нелинейность, гистерезис, ползучесть (крип), температурный дрейф, старение пьезокерамики. Нелинейность пьезокерамики приводит к тому, что объекты одинакового размера в начале и в конце сканируемого образца будут иметь различные линейные размеры.

Корректировка нелинейности пьезокерамики

Существует несколько способов коррекции нелинейности пьезокерамики в СЗМ.

Наиболее надежный, но и наиболее дорогостоящий подход к решению этой проблемы заключается в прямом измерении мгновенного положения сканера и коррекции нелинейности в режиме реального времени посредством цепи обратной связи. В качестве датчиков смещения в СЗМ-200 используются емкостные преобразователи перемещения [5].

Наиболее простой способ заключается в использовании нелинейных напряжений возбуждения пьезокерамики так, чтобы результирующее смещение сканера было приблизительно линейным. Для этого СЗМ сканер должен быть предварительно откалиброван, т. е. найдена функция смещения Δl от приложенного напряжения U : $\Delta l = f(U)$. Калибровку сканера осуществляют с использованием образцов, имеющих периодические структуры с известными размерами.

В данной работе был использован наиболее надежный способ, т. е. с использованием цепи обратной связи. На рис. 1 представлена структурная схема цепи обратной связи.



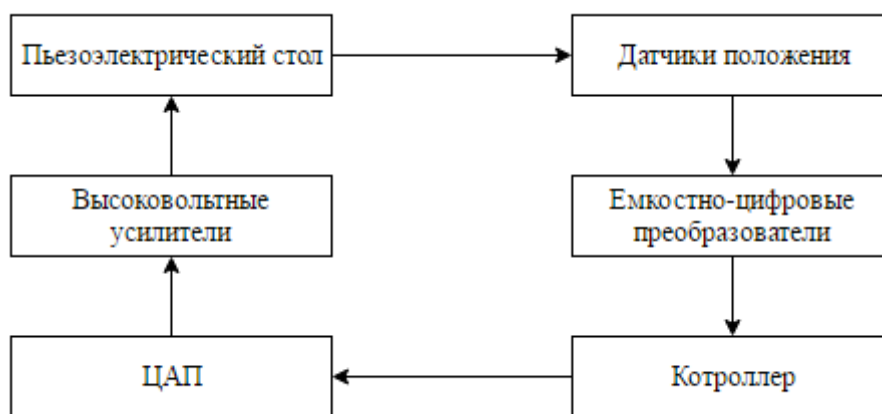


Рис. 1. Структурная схема цепи обратной связи коррекции нелинейности пьезокерамики

Программная коррекция нелинейности заключается в математическом описании формы кривой движения пьезостола. Для этого в большинстве случаев описывают полиномом n -степени. В СЗМ-200 используется коррекция нелинейности полиномом 3 степени.

На рис. 2 представлено движение сканера по заданной оси при подаче управляющего напряжения треугольной формы с использованием (без использования) программной нелинейной коррекции полиномом 3 степени.

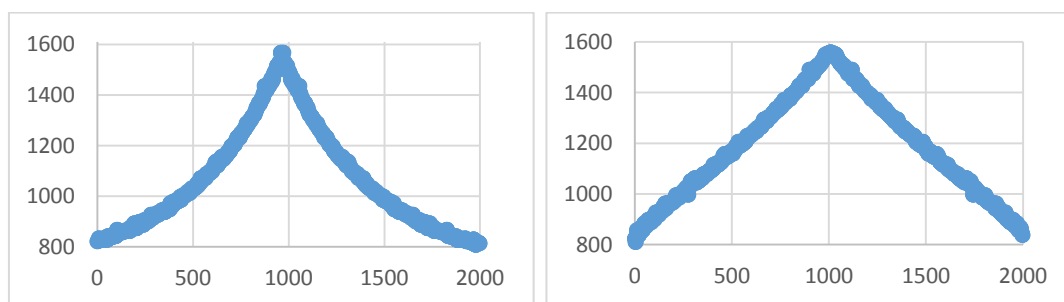


Рис. 2. Движение без коррекции (слева) нелинейности, движение с коррекцией (справа) нелинейности

При недостаточности вычислительных ресурсов ядра формировать управляющие потенциалы для управления пьезостолом можно без аппроксимации полиномом. Для этого развертка по ЦАП изменяется итеративно так, что за n -ое число итераций движение сканера станет линейным.

На рис. 3 приведены результаты итеративной коррекции нелинейности, т. е. разность между линией (к которой необходимо приближаться) и реальной кривой. Из графика видно, что уже за 10–11 итераций разность между линией (к которой нужно приближаться) и реальной кривой стремится к нулю. Реальная кривая получается при каждом прямом ходе пьезостека и представляет собой результаты измерений емкостно-цифрового преобразователя.

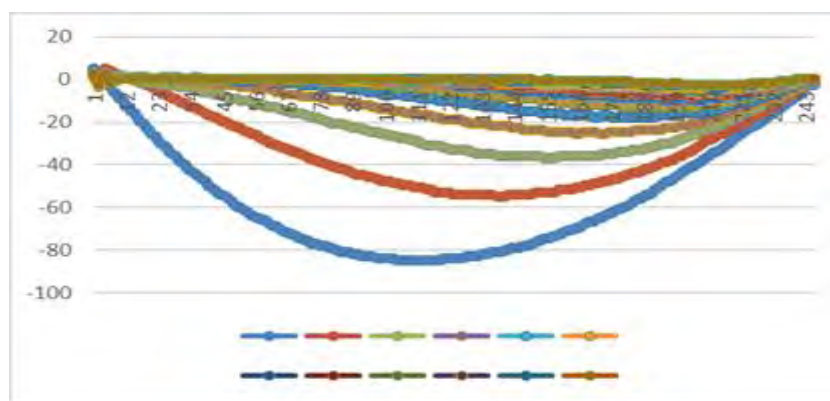


Рис. 3. Разностная кривая между идеальной и реальной кривой

Заключение

Реализован аппаратно-программный способ коррекции нелинейности пьезостола в направлениях XY в микроскопе СЗМ-200. Полученные алгоритмы позволяют значительно повысить точность позиционирования пьезосканера в плоскости XY, минимизировав разницу шага между точками измерения в матрице сканирования в различных ее областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Certus Standard. Сканирующий зондовый микроскоп с оптическим видеомикроскопом. – Россия : ООО «Нано Скан Технология», 2011. – 141 с.
2. Peter Eaton, Paul West. Atomic force microscopy // Oxford University Press. – 2010.
3. **Миронов, В. Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород : ИФМ РАН, 2004. – 114 с.
4. **Тихомиров, А. А.** Основы сканирующей зондовой микроскопии и методы ее применения в современных научных исследованиях / А. А. Тихомиров // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». – 2009. – №4.
5. 2010 Saint Jean M., Hudlet S., Guthmann C., Berger J. Van der Waals and capacitive forces in atomic force microscopies // J. Appl. Phys. – 1999. – v.86(9). – P. 5245–5248.