

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ПО ОСИ Z АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

А. В. ЗАБЛОЦКИЙ*, В. А. ШАРОНОВ, В. С. БОРМАШОВ*,
А. С. БАТУРИН*, П. А. ТОДУА****

**Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия, e-mail: zalexh@gmail.com*

***Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума,
Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru*

Исследована нелинейность емкостных датчиков по оси Z атомно-силового микроскопа с использованием тестовых структур, содержащих элементы рельефа высотой 300 – 1200 нм. Установлена зависимость результатов измерений высоты от величины перемещения трубчатого пьезосканера в диапазоне 10 – 90 % от максимально возможного значения. Выявлено, что нелинейность емкостных датчиков перемещений в направлении, перпендикулярном к исследуемой поверхности составляет 1,5 – 3 %.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, емкостные датчики, калибровка.

The nonlinearity of capacity sensors along the Z-axis of atomic force microscope was studied using test structures with relief elements of a height of 300 – 1200 nm. The dependence of height measurements results from tubular piezo-scanner displacement value is established in the range of 10 – 90 % of maximum displacement. It was revealed that the nonlinearity of capacity displacement sensors is 1,5 – 3 % normal to the investigated surface direction.

Key words: atomic force microscope, capacity sensors, calibration.

Основная область применения атомно-силовых микроскопов (АСМ) – получение достоверных данных о высоте микрорельефа путем сканирования поверхности образца зондирующим острием малого радиуса, размещаемого на краю плоской пружины, называемой кантелевером. Измерения проводятся путем регистрации отклонений кантелевера, вызываемых изменением силового взаимодействия между острием и исследуемым образцом [1]. Они могут регистрироваться различными датчиками перемещений: туннельными, оптическими или емкостными. Первые АСМ имели значительные недостатки, связанные, в основном,

с особенностями поведения пьезоэлементов сканеров, включая крип, гистерезис и неортогональность, зависящих от геометрии сканера [2]. В современных приборах большинство этих эффектов компенсируется или учитывается либо с помощью электронных устройств в системе обратной связи, либо программным способом. Большинство современных приборов снабжаются емкостными датчиками перемещений, обладающими высокой чувствительностью и облегчающими компенсацию большинства вышеперечисленных недостатков [3].

Принцип работы подобных датчиков состоит в следующем: одна из обкладок плоского конденсатора датчика закрепляется на свободном конце сканера, положение второй обкладки фиксируется. При перемещениях сканера меняется зазор между обкладками конденсатора, при этом на выходе подключенной к конденсатору электронной схемы генерируется напряжение, величина которого обратно пропорциональна емкости конденсатора. Таким образом, если пренебречь краевыми эффектами и непараллельностью обкладок конденсатора, выходное напряжение можно полагать пропорциональным величине зазора, т. е. перемещению сканера по соответствующей оси. Этот сигнал используется для коррекции положения сканера по оси Z в цепи обратной связи АСМ.

Заявляемые производителями датчиков характерные величины нелинейности (при определенных ограничениях на условия использования) составляют порядка 0,01 % от номинального измеряемого диапазона. Однако при их встраивании в конкретную систему позиционирования неизбежно возникает проблема неидеальности связи между точкой нахождения зонда, и положением подвижной обкладки датчика. Также появляются паразитные вращения обкладок датчиков, малые дополнительные смещения зонда или образца (например, вследствие термодрейфа), которые не регистрируются. Все это может привести к заметному ухудшению свойств системы.

Распространенные методики калибровки Z -сканера АСМ также не учитывают потенциальную нелинейность емкостных датчиков [4 – 6]. Цель настоящей работы заключается в определении нелинейности емкостных датчиков по оси Z АСМ, т. е. установление зависимости измеряемых данных от величины перемещения в этом направлении трубчатого пьезосканера и определение степени влияния данного эффекта на итоговые результаты.

В рамках эксперимента были исследованы характеристики АСМ Ntegra Aura компании NT-MDT, оснащенного сканером с полем сканирования 90×90×5 мкм. Такой сканер обеспечивает два независимых движения образца относительно кантилевера: сканирование вдоль поверхности образца (в плоскостях X , Y) и перемещение в направлении, перпендикулярном к поверхности (по оси Z).

В ходе работ измерялись высоты нескольких рельефных структур, изготовленных методом анизотропного травления из монокристаллического кремния [7], с высотой элементов рельефа 300 – 1200 нм, условно обозначенных как КРН–АСМ. Также использовали меру утвержденного типа TGZ3 компании «НТ-МДТ» с высотой рельефных элементов порядка 560 нм. Для каждой структуры последовательно измеряли одну и ту же область с одними и теми же параметрами сканирования в полуконтактном режиме, за исключением степени выдвижения пьезотрубки Z -сканера. Этот параметр варьировался от 10 до 90 % (минимальное и максимальное безопасные выдвижения, соответственно).

Результаты измерений. После сканирования для каждого кадра проводили вычитание плоскости по трем точкам для компенсации наклона образца. Далее строили гистограмму распределения высот точек полученного изображения, по которой определяли высоту рельефного элемента. Результаты измерений для разных структур приведены в таблице.

Из приведенных результатов следует, что нелинейность емкостных датчиков перемещений в направлении Z -сканера АСМ Ntegra Aura,

Измерения высоты боковой стенки экспериментального образца

Степень выдвижения пьезотрубки Z -сканера, %	Высота объекта, измеренная по гистограмме, нм			
	КРН-АСМ1	TGZ-03	КРН-АСМ2	КРН-АСМ3
90	342±1	559±1	975±1	1177±1
70	339±2	558±1	965±1	1170±1
50	337±1	555±1	961±1	1164±1
30	335±2	551±1	946±1	1151±3
10	334±1	549±1	942±1	1137±1
Разброс значений, нм (%)	8 (2,3)	10 (1,8)	33 (3,4)	40 (3,4)

перпендикулярном к исследуемой поверхности составляет 1,5 – 3 %. При этом разброс в измерении высоты рельефных структур субмикронного и микронного диапазона может достигать десятков нанометров. Таким образом, необходимо нормировать положение сканера (величину выдвигания пьезотрубки), используемое при калибровке вертикальной оси сканирования АСМ и использовать его для прецизионных измерений.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7022) с использованием оборудования центра коллективного пользования МФТИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Binning G., Quate C. F., Gerber Ch.** //Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930.
2. **Миронов В. Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н. Новгород: Изд-во ИФМ РАН, 2004.
3. **Дедкова Е. Г. и др.** Приборы и методы зондовой микроскопии. М.: Изд-во Можайский полиграфический комбинат, 2011.
4. **Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А.** Калибровка атомно-силовых микроскопов //Известия РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73. № 4. С. 473 – 484.
5. **ГОСТ Р 8.635–2007.** ГСИ. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки.
6. **Suzuki M.** Standardized procedure for calibrating height scales in atomic force microscopy on the order of 1 nm // J. Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1996. V. 14. N 113. P. 1228 – 1232.
7. **Новиков Ю. А. и др.** Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии //Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36 – 76.

Дата принятия 19.11.2012 г.