

С. А. Филимонов, к.т.н.

Черкасский государственный технологический университет  
б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина  
[sa.filimonov@mail.ru](mailto:sa.filimonov@mail.ru)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ СКАНЕРОВ ЗОНДОВЫХ МИКРОСКОПОВ

*Работа посвящена актуальным вопросам создания совершенствованных моделей пьезокерамических сканеров для сканирующих зондовых микроскопов. Проведен системный анализ существующих моделей конструкций пьезокерамических сканеров, определены основные их достоинства и недостатки.*

*Предложена новая модель пьезокерамических сканеров на основе биморфных пьезоэлементов. Спроектирована эквивалентная модель одного актуатора на основе биморфного пьезоэлемента с помощью пакетов программ FemLab. Установлено, что взаимосвязь между биморфными элементами (актуаторами), которые создают колебания по координатам X, Y, Z, в разработанных моделях пьезокерамических сканеров практически отсутствует. Кроме того, использование биморфных пьезоэлементов в качестве актуаторов способствует увеличению чувствительности сканера.*

**Ключевые слова:** нанотехнологии, сканирующий зондовый микроскоп, пьезосканер.

Сканирующая зондовая микроскопия позволяет анализировать на атомном уровне структуры самых разных материалов – стекла, керамики, пластика, металлов, полупроводников. Измерения можно проводить не только в вакууме, но и на воздухе, в среде любого газа и даже в капле жидкости. Этот метод незаменим и для исследования биологических объектов. Кроме исследовательских функций, сканирующая зондовая микроскопия может выполнять еще и активные – обеспечивать захват отдельных атомов, перенос их в новую позицию, атомарную сборку проводников шириною в один атом, локальные химические реакции, манипулирование отдельными молекулами и др. [1–3].

Основным элементом сканирующей зондовой микроскопии, который обеспечивает возможность работы прибора в режимах атомных разрешений и который существенно влияет на качество получаемого изображения, является пьезокерамический сканер [1].

В сканирующей зондовой микроскопии широкое распространение получили сканеры на основе трубчатых пьезоэлементов [1–4]. Недостатком таких сканеров является то, что при сканировании соседние секции сканера оказывают влияние друг на друга, что ухудшает точность измерений, уменьшает их достоверность, снижает предельное разрешение прибора. Кроме того, секции трубчатого ска-

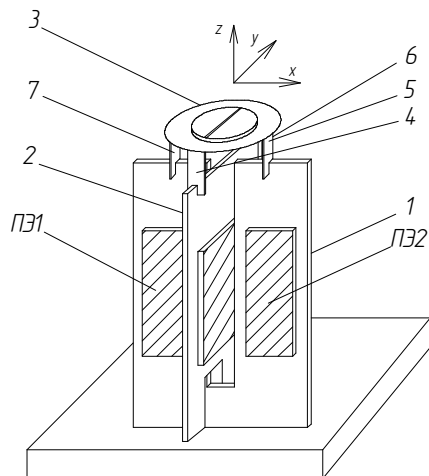
нера, не участвующие в перемещении, препятствуют изгибу пьезокерамического сканера в нужном направлении, что уменьшает диапазон сканирования.

Выполнение этого сканера в виде цилиндрического биморфного элемента, разделенного на секции (актуаторы), позволяет увеличить чувствительность и уменьшить связь между перемещениями по координатам X и Y, однако технология изготовления сканера становится более сложной [4, 5].

Широкое распространение получили также сканеры на основе плоских биморфных пьезоэлементов. Биморфный пьезоэлемент (БПЭ), как известно [6–10], представляет собой два пьезоэлемента или пьезоэлемент и металлическую пластину, соединенных между собой с помощью эпоксидного клея или легкоплавкого припоя [8, 9]. При воздействии электрического напряжения биморфный пьезоэлемент совершает изгибные колебания, что используется для перемещения зонда относительно объекта исследований или объекта исследований относительно зонда.

В литературе [3] описан трехкоординатный сканер на основе трех круглых биморфных пьезоэлементов (трипод). Недостатком этой модели сканера является сильная асимметрия конструкции, а также связь между перемещениями по координатам.

Для устранения указанных недостатков предложено использовать модель конструкции трехкоординатного пьезокерамического сканера на основе биморфного планарного камертона, которая представлена на рис. 1 [11].



**Рис. 1. Пьезокерамический сканер на основе биморфного планарного камертона:**

- 1, 2 – актуаторы по координатам X и Y;  
3 – актуатор по координате Z;  
4–7 – плоские упругие пластины

Отличительной особенностью данной модели конструкции от предложенных выше сканеров является уменьшенное количество актуаторов, которое стало возможным благодаря изменению их взаимного расположения. Кроме того, это отличие дает возможность поворота сканера вокруг своей оси, что позволяет использовать его в случае использования массива зондов в виде линейки или матрицы, и соответственно, массива наноэлементов, например, в запоминающих устройствах.

Кроме модели конструкции, представленной на рис. 1, разработана модель на основе плоских биморфных пьезоэлементов [12].

Было определено также влияние колебаний одного из биморфных пьезоэлементов на другие биморфные пьезоэлементы. На вход этого пьезоэлемента подается электрическое напряжение на резонансной частоте данного биморфного пьезоэлемента (886 Гц для БПЭ по координатам XY и 1340 Гц для БПЭ по координате Z) и измеряется перемещение на этом и других биморфных пьезоэлементах.

Как показали эксперименты, колебания одного биморфного пьезоэлемента (актуатора) практически не оказывает влияние на другие биморфные пьезоэлементы сканера.

Во всех предложенных (разработанных) моделях конструкций металлическая пластина, на которой закреплен пьезоэлемент, представляет собой балку равного сечения [13, 14].

Проведя анализ балки равного сечения, можно сделать вывод. С помощью сечения балки можно существенно влиять на ее собственную частоту. Уменьшение толщины балки с целью увеличения чувствительности приводит к эквивалентному уменьшению собственной частоты колебаний упругого элемента. Характеристики материала влияют на чувствительность так же, как и в других случаях.

Возможен и другой вариант формы упругого элемента – это балка равного сопротивления изгибу (рис. 2).

Упругий элемент такой формы отличается от предыдущих тем, что величина напряжений как для верхнего слоя металла в балке, так и для нижнего не зависит от выбора сечения, постоянно по длине балки и равна напряжению в заделке. Поэтому конструктивный коэффициент чувствительности такого упругого элемента не зависит ни от координат сечения, ни от полноты использования зоны деформаций. Его величина для всех случаев постоянна, изменяется только его знак в зависимости от того, какие деформации используются: верхних или нижних слоев материала.

Прогиб конца балки определяется выражением  $\delta = \frac{6l^3}{bh^3 E} F$ . Для определения собственной частоты консольной балки равного сопротивления изгибу воспользуемся соотношением

$$f_0 = 0.159 \frac{B}{l^2} \sqrt{\frac{E J_0}{m_0}}, \quad (1)$$

где  $J_0$  – момент инерции у заделки,  $m_0$  – масса единицы длины балки у заделки;

$$B = \sqrt{\frac{(1-\eta)(2-\eta)}{2(C_1 - C_2)}};$$

$$C_1 = \frac{1}{4-\eta} - \frac{1+\eta}{6};$$

$$C_2 = \frac{1}{3-\eta} \left[ 0.5 - \frac{1}{(4-\eta)(5-\eta)} \right] - \frac{3\eta+2}{24};$$

$\eta$  – показатель, характеризующий изменение жесткости в зависимости от текущей координаты X, изменяющейся в направлении длины балки (начало координат расположено в заделке).

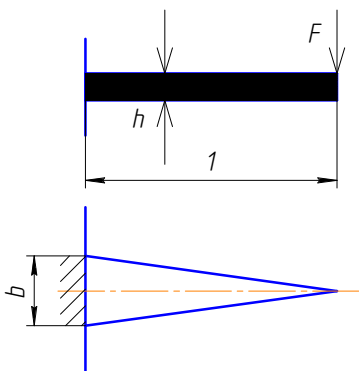


Рис. 2. Балка равного сопротивления изгибу

Из формулы видно, что при  $\eta = 1$  величина  $B = 0$ , что не соответствует физическим представлениям. Действительно, если построить график зависимости  $B(\eta)$ , то вблизи единицы ветви этой функции будут существенно расходиться. Таким образом, предложенная математическая модель дает возможность расчета  $B$  только при  $\eta < 1$  или  $\eta > 1$ . Для получения значений  $\eta = 1$  строят обе кривые и выполняется графическая интерполяция, которая при  $\eta = 1$  дает значение  $B = 0,88$ . Подставляя значение в формулу и производя аналогичные предыдущим преобразования, получим

$$f_0 = \frac{0.136h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

Таким образом, рассмотренные конструкции упругих элементов имеют функцию преобразования и чувствительность, которые определяются конструктивными размерами, модулем упругости и конструктивным коэффициентом чувствительности. Конструктивный коэффициент чувствительности определяет не только величину чувствительности, но и ее знак, которые зависят от координат сечения, характера деформации и степени использования зон деформаций.

Анализируя выражения для собственных частот всех рассмотренных конструкций, можно сделать следующие основные выводы:

1. Собственная частота упругого элемента определяется некоторым числовым коэффициентом, одним конструктивным параметром (обобщенным параметром длины упругого элемента) и двумя характеристиками материала (модулем упругости и плотностью).

2. Собственная частота тем больше, чем больше отношение модуля упругости мате-

риала к плотности и меньше обобщенный параметр длины упругого элемента.

Кроме этого, при помощи пакетов программ FemLab 3.2 проведено моделирование одного из биморфных элементов разработанной модели пьезокерамического сканера на основе плоских биморфных пьезоэлементов. В одном варианте использована металлическая пластина равного сечения, а в другом – равно-го сопротивления изгибу. Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4.

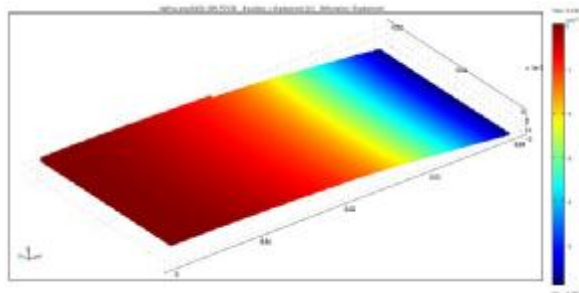


Рис. 3. Биморфный пьезоэлемент, в основе которого положена металлическая пластина равного сечения

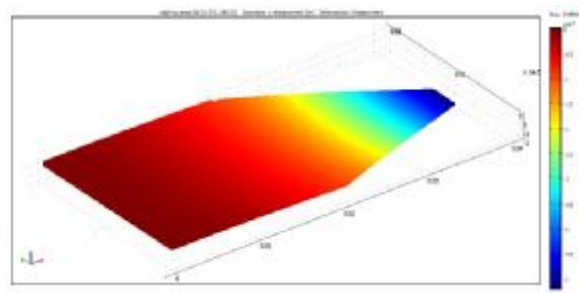


Рис. 4. Биморфный пьезоэлемент, в основе которого положена металлическая пластина равного сопротивления изгибу

Из рис. 3, 4 можно сделать вывод, что при использовании металлической пластины равного сопротивления изгибу резонансная частота увеличивается на 45 %, амплитуда колебаний незначительно уменьшилась (на 7 %).

Данные результаты соответствуют теории сопротивления материалов, согласно которой, как известно, при изгибе балки с зашечленным концом максимальные перемещения возникают на свободном конце балки, тогда как максимальные напряжения – в месте зашечления. Соответственно металлическую пластину для биморфного пьезоэлемента рационально использовать такую, у которой на конце используется минимальная площадь сечения, а в месте ее зашечления – максимальная.

**Выводы:**

1. Предложена и исследована модель конструкции пьезокерамического сканера на основе плоских биморфных пьезоэлементов трапецидальной формы для зондовых наномикроскопов.

2. Верификация эквивалентной модели пьезокерамического сканера осуществлялась при помощи пакетов программ FemLab 3.2 и подтвердила теоретические и практические результаты усовершенствованной модели. При использовании металлической пластины равного сопротивления изгибу в биморфных элементах пьезокерамических сканеров, которые создают колебания по координатам X, Y, Z, резонансная частота увеличивается на 45 %, амплитуда колебаний незначительно уменьшилась (на 7 %), что позволило уменьшить влияние внешних вибраций.

3. Оригинальность предложенной модели подтверждена патентом Украины.

**Список литературы**

1. Binnig G. Scanning tunneling microscopy / G. Binnig, H. Rohrer // *Helv. Phys. Acta.* – 1982. – Vol. 55, № 6. – P. 726–735.
2. Нанотехнологии в электронике / [под ред. Ю. А. Чаплыгина]. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
3. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2004. – 144 с.
4. Sharapov V. Bimorph cylindrical piezoceramic scanner for scanning probe nanomicroscopes / V. Sharapov, A. Vladi-shauskas, S. Filimonov // *Ultrasound.* – Kaunas: Technologija, 2009. – Vol. 64, № 4.
5. Патент України № 22600. МПК G12B 21/20, H01L 41/00. П'єзосканер / В. М. Шарапов, А. М. Гуржій, С. О. Філімонов. – Бюл. № 5, 2007.
6. Домаркас В. Пьезоэлектрические преобразователи для измерительных устройств / В. Домаркас, Р. Кажис. – Вильнюс: Минтис, 1975. – 258 с.
7. Кажис Р. Й. Ультразвуковые информационно-измерительные системы / Р. Й. Кажис. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 216 с.
8. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

9. Sharapov V. Piezoceramic sensors / V. Sharapov. – Springer Verlag, 2011. – 498 p.
10. Шарапов В. М. Датчики / [Шарапов В. М. и др.; под ред. В. М. Шарапова и Е. С. Полищука]. – Черкассы: Брама, 2008. – 1072 с.
11. Шарапов В. М. Совершенствование пьезо-керамических сканеров для зондовых микроскопов / В. М. Шарапов, С. А. Филимонов // *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. IX Междунар. конф., Минск, 2012.* – С. 172–176.
12. Патент України №22601. МПК G12B 21/20, H01L 41/00. П'єзосканер / В. М. Шарапов, А. М. Гуржій, С. О. Філімонов. – Бюл. № 5, 2007.
13. Ландау Л. Д. Теоретическая физика: в 10 т.: учеб. пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – [4-е изд., испр. и доп.]. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – Т. VII. Теория упругости. – 248 с.
14. Смирнов А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами: учеб. пособие / А. Б. Смирнов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.

**References**

1. Binnig, G. and Rohrer, H. (1982) Scanning tunneling microscopy. *Helv. Phys. Acta*, 55 (6), pp. 726–735.
2. Nanotechnologies in electronics (2005). In: Yu. A. Chaplygin (Ed.). Moscow: Technosfera, 448 p. [in Russian].
3. Mironov, V. L. (2004) Fundamentals of scanning probe microscopy. Moscow: Technosfera, 144 p. [in Russian].
4. Sharapov, V., Vladishauskas, A. and Filimonov, S. (2009) Bimorph cylindrical piezoceramic scanner for scanning probe nanomicroscopes. *Ultrasound*, 64 (4). Kaunas: Technologija.
5. Patent of Ukraine № 22600 (2007). Piezoscanner. Sharapov, V. M., Gurgii, A. N., Alpatov, A. P. and Filimonov, S. A. Cl. G12B 21/20 H01L 41/00; Bull. № 5 [in Ukrainian].
6. Domarkas, V. and Kazys, R. (1975) Piezoelectric transducers for measuring devices. Vilnius: Mintis, 258 p. [in Russian].

7. Kazys, R. (1986) Ultrasonic information-measuring systems. Vilnius : Mokslas, 216 p. [in Russian].
8. Sharapov, V. M., Musienko, M. P. and Sharapova, E. V. (2006) Piezoelectric transducers. Moscow: Technosfera, 632 p. [in Russian].
9. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Springer Verlag, 498 p.
10. Sharapov, V. M. et al. (2008) Gauges. In: V. M. Sharapov and E. S. Polishuk (Eds). Cherkassy: Brama, 1072 p. [in Russian].
11. Sharapov, V. and Filimonov, S. (2010) Improvement of piezoceramic scanners for probe microscopes. *Metodologicheskiye aspekty skaniruyushej zondovoj mikroskopii*: collection of reports of the IX Internat. conf. Minsk, pp. 172–176 [in Russian].
12. Patent of Ukraine № 22601 (2007). Piezoscanner. Sharapov, V. M., Gurgii, A. N., Alpatov, A. P. and Filimonov, S. A. Cl. G12B 21/20 H01L 41/00; Bull. № 5 [in Ukrainian].
13. Landau, L. D. and Livshits, E. M. (1987) Theoretical physics. In 10 t. T.VII. Elasticity theory. 4<sup>th</sup> ed. Moscow: Nauka, gl. red. fiz.-mat. lit., 248 p. [in Russian].
14. Smirnov, A. B. (2003) Mekhatronics and robotics. Systems of microsupply with piezoelectric actuators. St. Petersburg: Izd-vo SPbGPU [in Russian].

**S. A. Filimonov, Ph.D.**

Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
[sa.filimonov@mail.ru](mailto:sa.filimonov@mail.ru)

#### IMPROVEMENT OF PIEZOCERAMIC SCANNERS OF PROBE MICROSCOPES

*The work is devoted to topical issues of the creation of improved models of piezoceramic scanners for scanning probe microscopes. A system analysis of the existing models of piezoceramic scanners design is made, their basic pros and cons are determined.*

*To remove shortcomings, which are the effect of structure model asymmetry and the relationship between the actuators along X, Y, Z coordinates, a new model of piezoceramic scanners based on bimorph piezoelectric elements is offered. Equivalent model of one actuator based on bimorph piezoelectric element using software packages FemLab is designed. As a result of the study it has been found that using a metal plate of uniform strength to bending the resonance frequency is increased by 45 %, and the oscillation amplitude, i.e. the movement, is reduced by 7 %, that allows to reduce the effect of external vibrations.*

*As a result of the pilot study it has been determined that the relationship between bimorph elements (actuators), which create oscillations along X, Y, Z coordinates in developed models of piezoceramic scanners virtually doesn't exist. Furthermore, the use of bimorph piezoelectric elements as actuators increases the sensitivity of the scanner.*

**Keywords:** nanotechnologies; scanning probe microscopy; piezoscanner.

*Рецензенты: В. А. Ващенко, д.т.н., профессор,  
М. П. Мусиенко, д.т.н., профессор*