УДК 536.248; 621.382.8

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ

Ивашов Е.Н., Федотов К.Д.

ФГАОУ ВПО «Московский институт электроники и математики НИУ «Высшая школа экономики»», Москва, e-mail: eivashov@hse.ru, ienmiem@mail.ru

Приведено описание пакетных пьезоактюаторов, формулы для расчета абсолютных и относительных деформаций пьезоактюаторов в первом и втором приближениях. Показан пример модификации машинных методов для более точного расчета анизотропных тел, а именно, пьезокерамики. Предложено решение трехкоординатного пьезоактюатора, а так же приведено описание его работы. Указаны недостатки пакетных пьезоактюаторов и методы их устранения.

Ключевые слова: пьезокерамика, пьезоактюаторы, нанотехнологии, сканирующая зондовая микроскопия, механика твердого тела

MULTIAXIS PIEZO ACTUATORS DESIGNING FEATURES

Ivashov E.N., Fedotov C.D.

FGAEU HPE «Moscow institute of electronics and mathematics The National research university «High school of economics», Moscow, e-mail: eivashov@hse.ru, ienmiem@mail.ru

Description of batch piezo actuators, formulas for calculation of absolute and relative deformations in first and second approximation are brought. Example of modification of machine methods for more accurate calculation of anisotropic solids and more specifically of piezo ceramics is shown. Triaxial piezo actuator solution is suggested and it's work scheme is described. Disadvantages of batch piezo actuators and methods of their removal are shown.

Keywords: piezo ceramics, piezo actuators, nanotechnologies, scanning probe microscopy, mechanics of solids

Развитие современных нанотехнологий во многом диктуется возможностями сканирующих технологий, позволяющих изучать наноструктуры на субатомном уровне с использованием туннельного эффекта. Для технологического обеспечения данного процесса используются пьезоактюаторы, собранные в общем случае из поочередно спеченных тонких металлических пленок и пьезоколец. Последние, благодаря обратному продольному пьезоэффекту, позволяют добиться точного позиционирования зонда в сканирующей зондовой микроскотии

Проектирование пьезоактюаторов возможно с использованием достаточно точного математического аппарата. В первом приближении необходимо вычисление абсолютного удлинения отдельного пьезоэлемента. Взаимосвязь пьезоэлектрических и механических свойств материала [1] позволяет получить выражение для абсолютного удлинения:

$$\Delta l = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E_3 l}{d_{33} Y_z} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U}{d_{33} Y_z},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость пьезокерамики, ε_0 — электрическая постоянная, E_3 — напряженность электрического поля вдоль направления деформации пьезоактюатора, l — длина элемента пьезоактюатора,

 d_{33} – пьезомодуль для продольного пьезоэффекта, Y_z – модуль Юнга для пьезокерамики вдоль направления деформации пьзоактюатора, $U=E_3l$ – напряжение между металлическими пластинами.

При подаче одинакового напряжения на одинаковые элементы пьезоактюатора, достаточно для вычисления абсолютного удлинения всей конструкции умножить найденное абсолютное удлинение одного элемента на количество элементов в конструкции.

Во втором приближении значения относительной продольной и поперечной деформаций можно определить по обобщенному закону Гука:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{Y_z} \Big[\sigma_z - \mu_z (\sigma_x + \sigma_y) \Big],$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{Y_r} \left[\sigma_r - \mu_r (\sigma_\tau + \sigma_z) \right],$$

где $\varepsilon_{\rm g}$, $\varepsilon_{\rm r}$ — относительные продольные и поперечные деформации, σ — напряжения, возникающие в материале, $Y_{\rm z}$ и $Y_{\rm r}$ модули Юнга для пьезоматериала по высоте и по радиусу цилиндра, составленного из пьезоколец, соответственно, а $\mu_{\rm z}$ и $\mu_{\rm r}$ — коэффициенты Пуассона для пьезоматериала. К сожалению, на сегодняшний день механическим свойствам пьезокерамики уделяется мень-

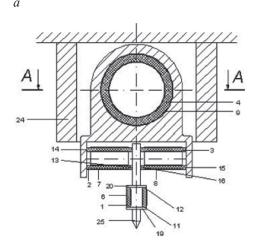
ше внимания, чем пьезоэлектрическим, следовательно, найти точные значения как модулей Юнга, так и коэффициентов Пуассона для различных пьезокерамик крайне сложно.

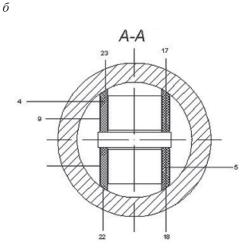
В общем случае необходимо учитывать анизотропную природу пьезокерамики и использовать для непосредственного расчета систему алгебраических уравнений.

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} = a_{11}\sigma_{x} + a_{12}\sigma_{y} + a_{13}\sigma_{z} + a_{14}\tau_{yz} + a_{15}\tau_{zx} + a_{16}\tau_{xy}, \\ \varepsilon_{y} = a_{21}\sigma_{x} + a_{22}\sigma_{y} + a_{23}\sigma_{z} + a_{24}\tau_{yz} + a_{25}\tau_{zx} + a_{26}\tau_{xy}, \\ \dots \\ \gamma_{xy} = a_{61}\sigma_{x} + a_{62}\sigma_{y} + a_{63}\sigma_{z} + a_{64}\tau_{yz} + a_{65}\tau_{zx} + a_{66}\tau_{xy}, \end{cases}$$

где σ — продольные напряжения, возникающие в материале, τ — касательные напряжения, возникающие в материале, а — упругие константы, зависящие от свойств материала. Данные расчеты можно реализовать с помощью машинных методов, в частности, модифицировать уже существующий метод конечных элементов.

Для расширения функционала пьезоактюаторов, при проектировании устройств туннельной микроскопии, необходимо увеличивать число степеней подвижности до трех и более. Примером подобного устройства может послужить следующий трехкоординатный пьезоактюатор [2].





Виды трехкоординатного пьезоактю атора в разрезе сбоку (а) и сверху (б)

Трехкоординатный пьезоактюатор (рисунок а, б) содержит набор пьезотрубок 1, 2, 3, 4, 5 с электродами 6, 7, 8, 9, 10 и параллельными торцами 11, 12, 13, 14, 15,16, 17, 18, причем пьезотрубки связаны между собой посредством соединительных элементов 19, 20, 21, 22, 23, последний из которых связан с неподвижным основанием 24, а первый с зондом 25.

Трехкоординатный пьезоактю атор работает следующим образом.

При подаче напряжения на электрод 6, происходит механическая деформация пьезотрубки 1, вызванная явлением обратного пьезоэффекта. При этом зонд перемещается вдоль оси Z. При подаче напряжения на электроды 7, 8, происходит механическая деформация пьезотрубок 2, 3. При этом зонд перемещается вдоль оси X. При подаче

напряжения на электроды 9, 10, происходит механическая деформация пьезотрубок 4, 5. При этом зонд перемещается вдоль оси Y.

Введение в устройство пьезоактюатора пьезотрубок, оси которых находятся в перпендикулярных плоскостях и скрещиваются, позволяет создать устройство, имеющее три степени свободы.

Следует также отметить, что использование вышеупомянутых многослойных пьезоактюаторов (в отличие от обыкновенных, отдельных пьезотрубок), позволяет увеличить диапазон получаемых перемещений при меньших напряжениях, но в то же время такая конструкция имеет некоторые недостатки, например, высокую электрическую емкость, обусловленную соединением большого количества конденсаторов из слоев керамики (диэлектрик) и металлических

пластин (обкладки конденсатора). По этой причине пакетные пьезоактюаторы обладают меньшим быстродействием. Для увеличения быстродействия необходимо уменьшить амплитуду управляющего сигнала, уменьшить деформирующие усилия.

На сегодняшний день существует множество пьезокерамик, выпускаемых и отечественными, и зарубежными производителями. Для примера приведем таблицу, в которой указаны отечественные пьезоматериалы и их свойства [3].

Таким образом, современный технический опыт и научные результаты могут существенно ускорить и облегчить внедрение пьезоактю это может обеспечить упрощение исследований на молекулярном уровне,

совершить новый технологический прорыв в этой области.

Список литературы

- 1. Федотов К.Д. Взаимосвязь пьезоэлектрических и механических свойств материала [Текст] / К.Д. Федотов // Материалы НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ. М.: РИО МИЭМ 2013. 316 с. (с. 233).
- 2. Федотов К.Д. Трехкоординатный пьезопривод для сканирующей туннельной микроскопии [Текст] / Е.Н. Ивашов, К.Д. Федотов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC 2012) : матер. XI Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 3-7 дек. 2012 г. М.: МИРЭА, 2012. Ч. 3. С. 165-168.
- 3. Бобцов А.А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В Григорьев // СПб.: ГУ ИТМО. 2011. 131 с.
- 4. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы состояние разработок и применение // Перспективные материалы. $2001.- \text{N}_{\text{\tiny 2}} 6.$