

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СКАНИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЗОНДОВЫХ МИКРОСКОПОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2012 г. Е.Н. ИВАШОВ, М.П. КНЯЗЕВА, С.В. СТЕПАНЧИКОВ

Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ
e-mail: akmika@rambler.ru

Во многих технологических процессах и оборудовании необходимо контролировать рабочее расстояние зонд-образец и осуществлять перемещения зонда в плоскости образца с высокой точностью (на уровне долей ангстрема). Эта задача решается с помощью специальных манипуляторов - сканирующих элементов (пьезосканеров). Сканирующие элементы зондовых микроскопов изготавливаются из пьезоэлектриков –

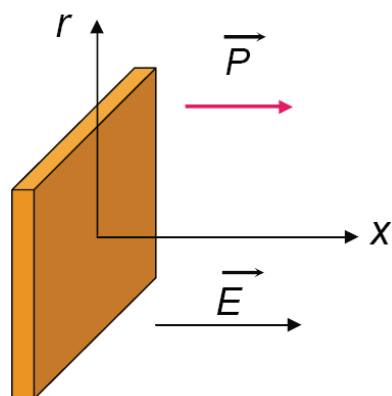


Рис. 1. Пластина из пьезокерамики во внешнем электрическом поле.

материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрики изменяют свои размеры во внешнем электрическом поле. Уравнение обратного пьезоэффекта для кристаллов записывается в виде [1,2]:

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k,$$

где U_{ij} - тензор деформаций, E_k - компоненты электрического поля, d_{ijk} - компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов. Вид тензора пьезоэлектрических коэффициентов определяется типом симметрии кристаллов.

Рассмотрим плоскую пластину из пьезокерамики (Рис. 1) во внешнем поле. Пусть вектор поляризации \vec{P} и вектор электрического поля \vec{E} направлены вдоль оси X. Тогда, обозначая $d_{||} = d_{33}$ и $d_{\perp} = d_{31}$, получаем, что деформации пьезокерамики в направлении, параллельном полю, равна $u_{xx} = d_{||} \cdot E_x$, а в

перпендикулярном полю направлению $u_{rr} = d_{\perp} \cdot E_x$.



Рис. 2. Трубчатый пьезоэлемент.

Широкое распространение получили трубчатые пьезоэлементы (Рис. 2). Они позволяют получать достаточно большие перемещения объектов при относительно небольших управляющих напряжениях. Трубчатые пьезоэлементы представляют собой полые тонкостенные цилиндры, изготовленные из пьезоэлектрических материалов. Обычно электроды в виде тонких слоев металла наносятся на внешнюю и внутреннюю поверхности трубки, а торцы трубки остаются непокрытыми [1,3].

Под действием разности потенциалов между внутренним и внешним электродами трубка изменяет свои продольные размеры. В этом случае продольная деформация под действием радиального электрического поля может быть записана в виде:

$$u_{xx} = \frac{\Delta x}{l_0} = d_{\perp} E_r,$$

где l_0 - длина трубки в недеформированном состоянии.
 Абсолютное удлинение пьезотрубки равно

$$\Delta x = d_{\perp} \frac{l_0}{h} V,$$

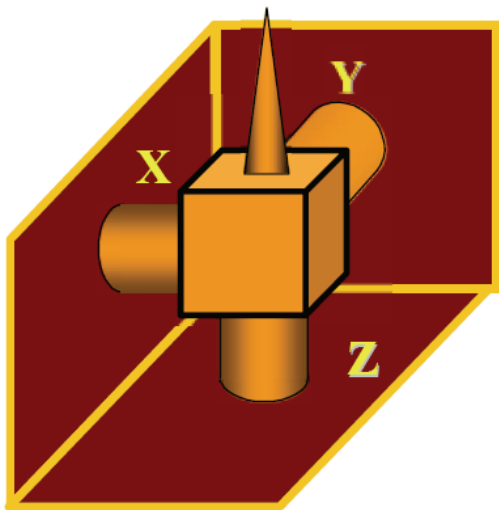


Рис. 3. Сканирующий элемент в виде трипода, собранный на трубчатых пьезоэлементах.

где h – толщина стенки пьезотрубки, V – разность потенциалов между внутренним и внешним электродами. Таким образом, при одном и том же напряжении V удлинение трубки будет тем больше, чем больше ее длина и чем меньше толщина ее стенки [1,5].

Соединение трех трубок в один узел (Рис. 3) позволяет организовать прецизионные перемещения зонда микроскопа в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Такой сканирующий элемент называется триподом.

Недостатками такого пьезосканера являются сложность изготовления и сильная асимметрия конструкции. На сегодняшний день наиболее широко используются пьезосканеры, изготовленные на основе одного трубчатого элемента. Общий вид трубчатого пьезосканера и схема расположения электродов представлены на Рис. 4. Материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации.

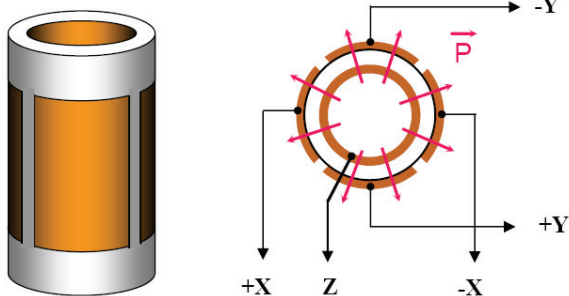


Рис. 4. Трубчатый пьезосканер.

Внутренний электрод обычно сплошной. Внешний электрод сканера разделен по образующим цилиндра на четыре секции. При подаче противофазных напряжений на противоположные секции внешнего электрода (относительно внутреннего) происходит сокращение участка трубки в том месте, где направление поля совпадает с направлением поляризации, и

удлинение там, где они направлены в противоположные стороны. Это приводит к изгибу трубки в соответствующем направлении. Таким образом, осуществляется сканирование в плоскости X,Y. Изменение потенциала внутреннего электрода относительно всех внешних секций приводит к удлинению или сокращению трубки по оси Z.

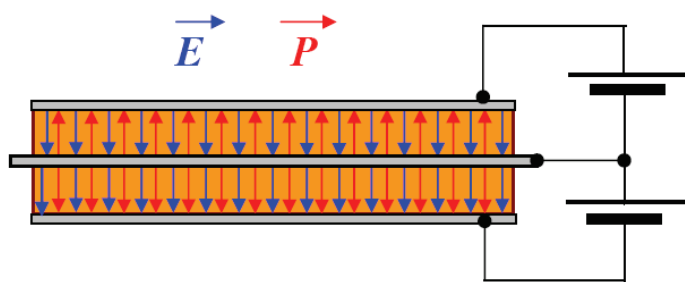


Рис. 5. Устройство биморфного пьезоэлемента.

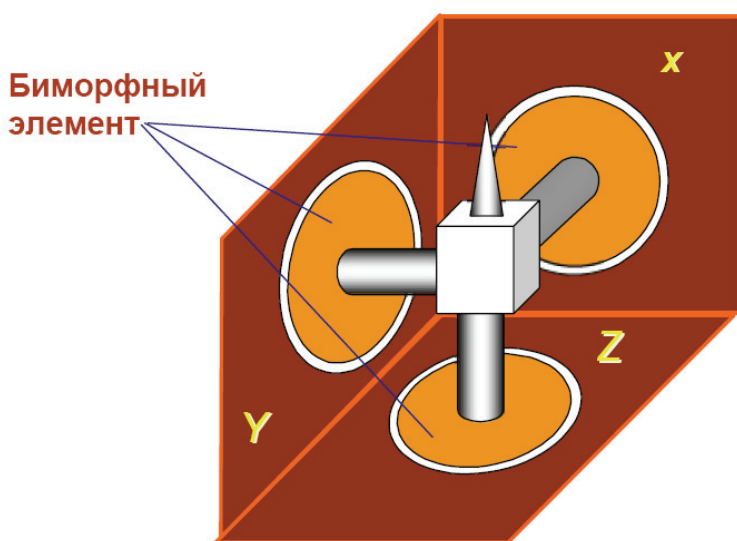


Рис. 6. Трёхкоординатный сканер на трех биморфных элементах.

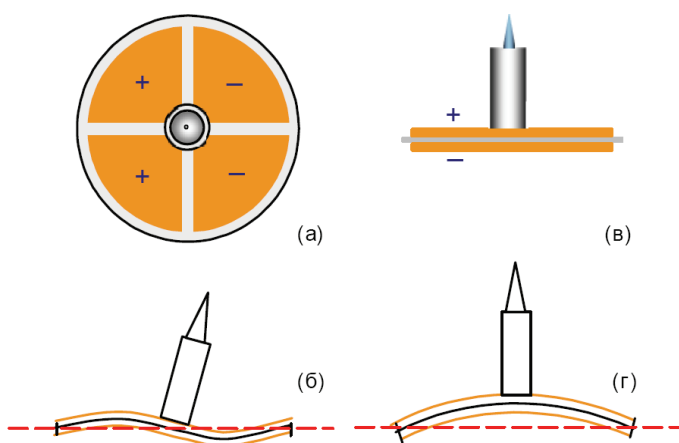


Рис. 7. Схематическое изображение работы биморфного пьезосканера.

Таким образом, можно реализовать трехкоординатный пьезосканер на базе одной пьезотрубки. Реальные сканирующие элементы имеют часто более сложную конструкцию, однако принципы их работы остаются теми же самыми [1,4].

Широкое распространение получили также пьезосканеры на основе биморфных пьезоэлементов. Биморф представляет собой две пластины пьезоэлектрика, склеенные между собой таким образом, что вектора поляризации в каждой из них направлены в противоположные стороны (Рис. 5). Если подать напряжение на электроды биморфа, как показано на Рис. 5, одна из пластин будет расширяться, а другая сжиматься, что приведет к изгибу всего элемента. В реальных конструкциях биморфных элементов создается разность потенциалов между внутренним общим и внешними электродами так, чтобы в одном элементе поле совпадало с направлением вектора поляризации, а в другом было направлено противоположно.

Изгиб биморфа под действием электрических полей положен в основу работы биморфных пьезосканеров. Объединяя три биморфных элемента в одной конструкции, можно реализовать трипод на биморфных элементах (Рис. 6).

Если внешние электроды биморфного элемента разделить на четыре сектора, то можно организовать движение зонда по оси Z и в плоскости X, Y на одном биморфном элементе (Рис. 7).

Действительно, подавая противофазные напряжения на противоположные пары секций внешних электродов, можно изгибать биморф так, что зонд

будет двигаться в плоскости X,Y (Рис. 7а, б). А изменяя потенциал внутреннего электрода относительно всех секций внешних электродов, можно прогибать биморф, перемещая зонд в направлении Z (Рис. 7в, е).

Рассмотрим две конструктивные схемы нанотехнологических устройств с пьезоприводами.

Нанотехнологическое устройство (Рис. 8) содержит неподвижное основание 1, связанный с ним основной пьезопривод 2 и основной зонд 3, электрически связанный с подложкой 4. Устройство снабжено дополнительным зондом 5, причем основной 3 и дополнительный 5 зонды закреплены на биморфах 6, 7, которые жестко связаны с основным пьезоприводом 2. Острия 8, 9 зондов 3, 5 направлены друг к другу, а между остриями 8, 9 расположена подложка 4, закрепленная на подложкодержателе 10.

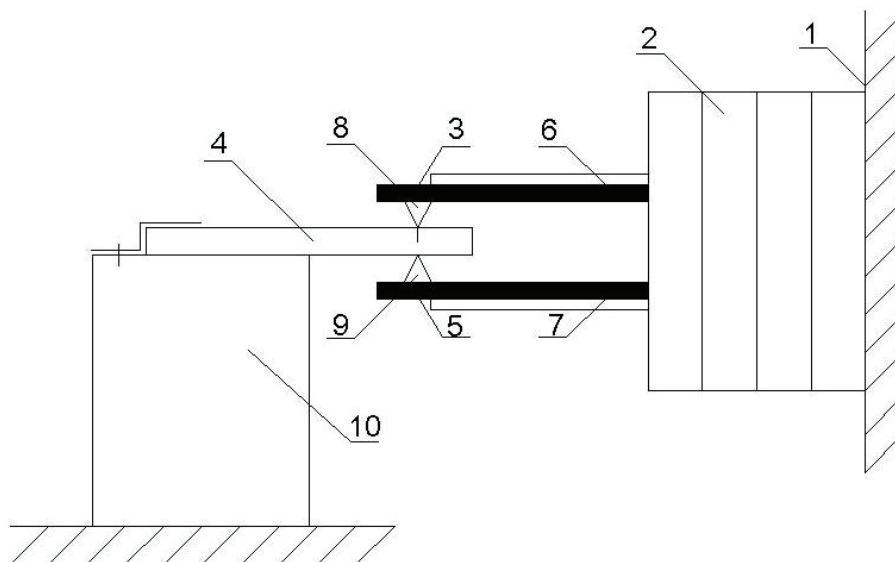


Рис. 8. Схема нанотехнологического устройства.

Нанотехнологическое устройство перемещений работает следующим образом.

При подаче напряжения на подложку 4 и зонды 3, 5 между остриями 8, 9 и подложкой 4 образуется электрическое поле. Молекулы рабочего газа (условно не показан) ионизируются и оседают на двух поверхностях (верхней и нижней) подложки. Таким образом, реализуется двухсторонняя обработка (сверху и снизу) поверхности подложки 4.

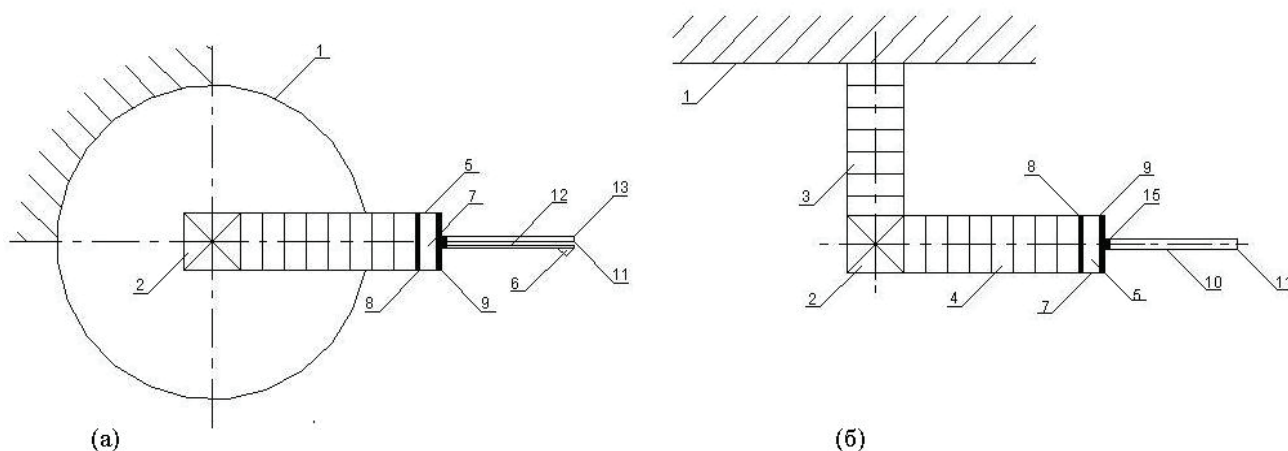


Рис. 9. Схема нанотехнологического устройства перемещений.

Применение предлагаемого нанотехнологического устройства позволяет обеспечить возможность двухсторонней обработки пластин посредством зондов.

Нанотехнологическое устройство перемещений (Рис. 9а, б) содержит модули 3, 4 перемещения по координатным осям X, Y, выполненные пьезоэлектрическими, и третий модуль 5 перемещения по координатной оси Z выполнен в виде конденсатора 7, одна пластина 8 которого связана со вторым модулем 4, а другая 9 – с балкой 10, на свободном конце 11 которой выполнена сквозная прорезь 12, разделяющая балку 10 на две части: жесткую 13 и упругую 14, на которой консольно закреплен зонд 6.

Нанотехнологическое устройство перемещений работает следующим образом.

При подаче напряжения на модули 3, 4 по координатным осям X, Y происходит их механическая деформация, вызванная явлением обратного пьезоэффекта. При этом зонд 6 перемещается вдоль осей X и Y. При подаче напряжения различной величины на третий модуль перемещения 5, выполненный в виде конденсатора 7, происходит увеличение или уменьшение сил электростатического взаимодействия между упругой 14 и жесткой 13 частями балки 10, а вследствие этого, происходит явление отталкивания между жесткой 13 и упругой 14 частями балки 10.

Применение предлагаемого нанотехнологического устройства перемещений позволяет увеличить быстродействие зонда, связанного с третьим модулем привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. // Институт физики микроструктур, г. Нижний Новгород, 2004 г. – 110 с.
2. *Антамошкин А.Н.* др. Системный анализ: Проектирование, оптимизация и приложения. // Учебное пособие. В 2-х томах. т. 2. – Красноярск: Сибирская аэрокосмическая академия, 1996. – 290 с.
3. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений. // М.: Наука, 1978.
4. *Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю.* Стереометрическое устройство для наноперемещений. Патент РФ на ПМ №36924. Опубликовано 27.03.2004 Б.И. №9.
5. *Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Степанов М.В.* Привод для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №40538. Опубликовано 10.09.04, Б.И. №25.