

# Пьезодвигатели в технологическом оборудовании микросварки

Для технологического оборудования микросварки разработаны пьезодвигатели, обеспечивающие возможность программирования перемещения с высоким разрешением и минимальным техническим обслуживанием.

Владимир Ланин, профессор

vlanin@bsuir.by

Игорь Петухов

petuchov@kbtm.by

## Устройство пьезодвигателей и принцип их работы

В современном электронном машиностроении одной из актуальных задач является реализация управляемых микроперемещений модулей технологического оборудования микроэлектроники и систем мехатроники. Погрешность линейных перемещений с учетом современных требований должна обеспечиваться на уровне десятков нанометров при длине перемещений до сотен микрометров. Сравнительный анализ современного сборочного оборудования мировых производителей, таких как Samsung (Корея), KLA-Tencor (США), ACCRETECH (Япония), SET (Франция), Kulicke & Soffa (Германия), ГНПО «Планар» (Беларусь) и др., показал, что достигнутая в серийном сборочном оборудовании микроэлектроники точность позиционирования составляет  $\pm 2 \dots \pm 5$  мкм, максимальная скорость перемещений равна 1–1,2 м/с, а максимальное ускорение — 10–30 м/с<sup>2</sup>.

Одним из эффективных, надежных и технологичных путей в реализации микроперемещений является применение пьезодвигателей, работа которых основана на обратном пьезоэффекте, а именно на изменении геометрических размеров активных элементов из пьезокерамики при наложении внешнего электрического поля. На рис. 1 показаны деформации растяжения и сжатия пьезоэлемента под действием приложенного напряжения  $U$ . Величина удлинения  $\Delta L$  определяется по формуле [1]:

$$\Delta L = Ed_{ij}L_0, \quad (1)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля;  $d_{ij}$  — пьезоэлектрический коэффициент (пьезомодуль);  $L_0$  — толщина пьезоэлемента.

Значение пьезоэлектрического коэффициента по толщине пьезоэлемента составляет от 250 до 550 пм·В, а по ширине (электрическое поле перпендикулярно вектору поляризации) — от –180 до –210 пм·В. Допустимая напряженность

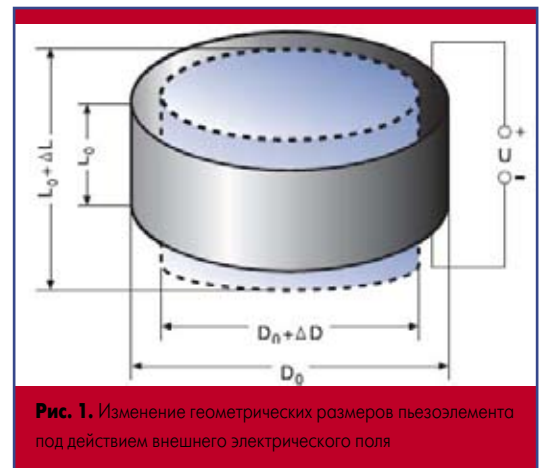


Рис. 1. Изменение геометрических размеров пьезоэлемента под действием внешнего электрического поля

электрического поля для современной пьезокерамики не превышает 2 кВ/мм, соответственно, для достижения перемещений от 1 до 10 мкм требуется напряжение в несколько киловольт.

Для снижения величины подводимого электрического напряжения пьезопреобразователь собирают из большого количества тонких пьезоэлементов, электрически соединенных параллельно и механически стянутых торцевыми накладками с помощью резьбовой шпильки. Такая конструкция обеспечивает перемещения до нескольких десятков микрон при длине пакета 25–40 мм. Современные технологии получения многослойных пьезоструктур позволяют получить перемещения до 100 мкм при относительно низком подводимом напряжении (от 150 до 200 В). Для получения больших перемещений используются механические устройства.

Современные микродвигатели обычно имеют два уровня перемещений — грубые и точные. Первые осуществляются в относительно больших зонах (20–40 мм) на скорости до 10 мм/с и при разрешении 0,1 мм за счет ручного или электромеханического приводов, в состав которых входят электродвигатели и механические передачи (реечные, винтовые). Точные перемещения (ход до 1–2 мм) при максимальном разрешении 0,2 мкм осуществляются с помощью

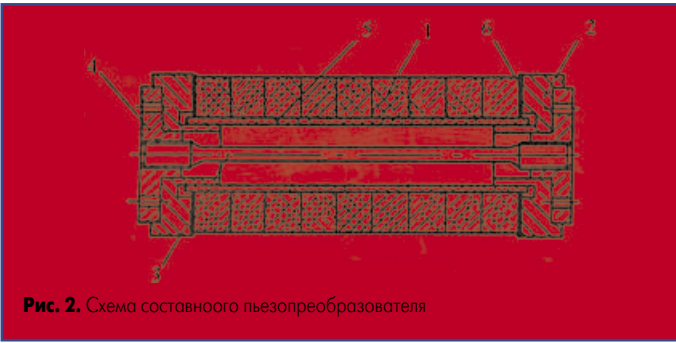


Рис. 2. Схема составного пьезопреобразователя

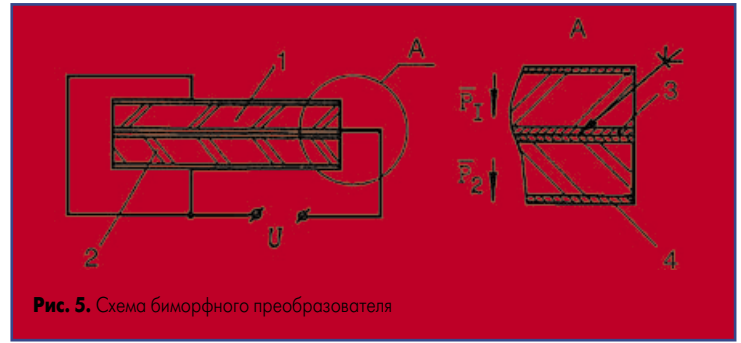


Рис. 5. Схема биморфного преобразователя

модулей, установленных на приводах грубых перемещений, включающих электромеханические приводы с червячными, рычажными и ленточными передачами, или с мембранными объемными гидравлическими передачами. Эти микроманипуляционные системы имеют по три степени свободы на модулях грубого и точного перемещений.

Для получения точных перемещений (в зоне до 0,1 мм по каждой степени свободы) в пьезодвигателях используются составные пьезоэлектрические преобразователи (ПП), состоящие из набора пьезокерамических шайб. Составной ПП (рис. 2) состоит из пакета тонких пьезокерамических шайб (1) (ПКШ), по концам — два фланца (2), стянутых винтовой шпилькой (3) с тонкой средней частью посредством двух гаек (4). Тонкостенная пластмассовая втулка (5) служит изолятором и элементом, центрирующим весь пакет ПКШ. Слюдяные шайбы (6) являются изоляторами, которые обладают высокой жесткостью при сжатии [2].

Стяжка секций необходима для выборки зазоров и люфтов между ПКШ, повышения жесткости пьезоэлектрического привода и уменьшения петли гистерезиса. Сила стяжки составляет  $2500 \pm 300$  Н. Секция состоит из 10–20 ПКШ толщиной 0,5–1 мм с серебряными электродами, нанесенными на плоские торцевые поверхности, которые электрически параллельно соединены между собой.

Составные ПП фиксируются на механических частях обычно с помощью клеевых или резьбовых соединений. Управляемое перемещение этих звеньев осуществляется за счет изменения формы и (или) размеров ПП, являющихся конструктивными элементами механической цепи манипулятора, и составляет до 200 мкм при напряжении 300 В, при этом максимальное усилие может достигнуть 1,7–10,3 Н.

Пьезокерамические элементы имеют высокую надежность, поэтому применение их в механических системах не снижает общего уровня надежности. Однако их недостаток — хрупкость пьезокерамики. ПП не требуют смазки, они не подвержены коррозии, могут работать при температурах до +400 °С. КПД преобразования электрической энергии в механическую близок к КПД электромагнитных систем.

Для увеличения диапазона перемещений пьезопривода используют принцип мультиплексии — разноплечный рычаг. На рис. 3 показано устройство, состоящее из ПП (1), рычага (2) с упругим шарниром (3) и выходного



Рис. 3. Мультиплексия перемещений пьезопреобразователя

звена (4). Коэффициент мультиплексии этой системы  $k = L/l_p$ . Однако такие конструктивные решения слишком громоздки.

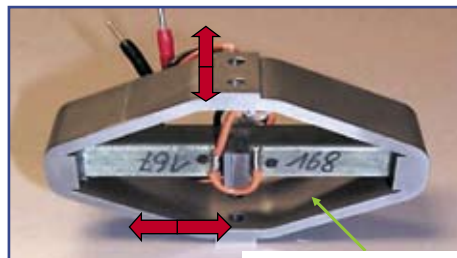


Рис. 4. Мультиплексия перемещений пьезопреобразователя с помощью стяжной пружины в виде параллелограмма

Другим конструктивным решением является установка пакетного пьезоэлектрического преобразователя в диагональ стяжной пружины в виде параллелограмма [3] (рис. 4). Преимущество таких преобразователей — в высоком сдвиговом усилии нагрузки (до 1400 Н).

Для микроманипуляционных систем перспективны биморфные пьезоэлектрические преобразователи (БПП), в которых исполь-

зуются изгибные деформации многослойных структур, состоящих из активных — пьезоэлектрических слоев и неактивных — металлических или полимерных слоев.

При определенном направлении поляризации пьезокерамических элементов в них возникают управляемые изгибные деформации, которые приводят к многократному увеличению перемещений по сравнению с ПП, работающими на растяжении — сжатие. Простейший БПП (рис. 5) состоит из двух склеенных между собой длинных пьезокерамических пластин (1 и 2) с одинаковым направлением векторов поляризации  $P_1$  и  $P_2$ .

Кинематические упругие устройства со встроенными в них БПП становятся активными, то есть кроме обеспечения заданной траектории движения они одновременно преобразуют электрическую энергию в механическую. Наиболее технологична конструкция БПП (рис. 6), состоящая из двух пьезокерамических пластин (1, 2) с одинаковым направлением векторов поляризации  $P_1$  и  $P_2$  и металлической пластины (3), склеенных между собой.

Электрическое напряжение подается от источника на электроды пьезокерамических пластин. Толщина пьезоэлемента  $h_p$  обычно не превышает 1 мм, а толщина металлической пластины  $h_m$  — не более 0,5 мм. Соотношение длин ( $l/L$ ) может меняться от 0,3 до 1.

Повышение быстродействия и увеличение числа степеней свободы до трех может быть получено при крестообразном соединении двух рессор с БПП (рис. 7). На модуле грубых перемещений (1) закреплены параллельно расположенные рессоры (2) с БПП (3), к концам которых прикреплена одна крестообразная рессора (4). В ее центре расположено выходное звено (5), закрепленное с помощью гайки (6) и контргайки. Рессоры с БПП собираются в пакеты с помощью планок (7). Отверстия (8) необходимы для уменьшения жесткости рессор (2). При подаче различных по фазе и амплитуде напряжений на плечи

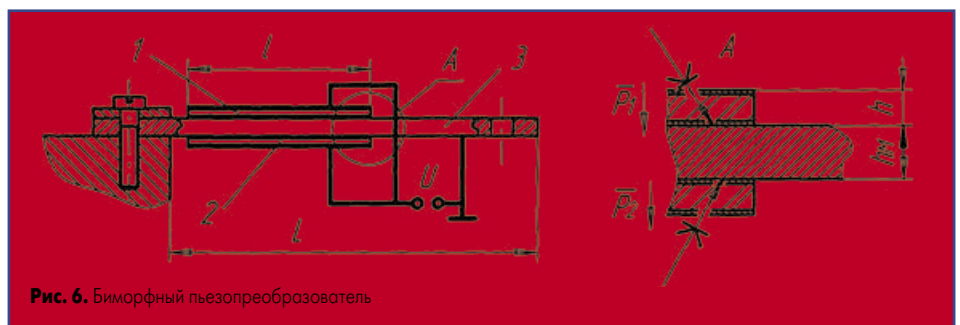


Рис. 6. Биморфный пьезопреобразователь

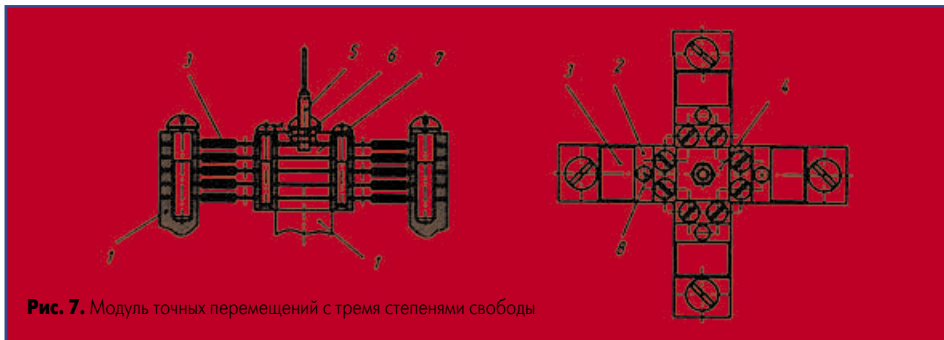


Рис. 7. Модуль точных перемещений с тремя степенями свободы

манипулятора выходное звено (5) может двигаться как в вертикальном направлении, так и качаться вокруг горизонтальных взаимно перпендикулярных осей. Параллельное соединение нескольких рессор с БПП в каждом плече позволяет повысить жесткость системы и компенсировать погрешности перемещения, вызванные гистерезисом пьезокерамики.

Таким образом, с помощью разнообразных упругих систем с БПП можно создать микро-манипуляторы с несколькими степенями свободы, имеющие малые габаритные размеры и высокую точность перемещений [4].

### Технические параметры пьезодвигателей

Технические параметры пьезодвигателей следующие:

- Свободное перемещение (ход) зависит от конструкции, размеров и электрических свойств пьезодвигателя, он может изменяться от единиц до 300 мкм.
- Развиваемая сила (усилие) достигает 5 кН.
- Максимальное значение управляющего напряжения обычно составляет 1000 В для высоковольтных и 100–200 В — для низковольтных пьезодвигателей.
- Погрешность установления требуемого микроперемещения — 0,05–0,1 мкм, они зависят от конструкции пьезопривода, типа применяемого пьезопреобразователя и в существенной степени определяется условиями эксплуатации пьезопривода. В частности, погрешность установления очень чувствительна к уровню механических вибрационных воздействий.
- Значение емкостной нагрузки высоковольтного усилителя (емкость преобразователя) определяет инерционные свойства пьезопривода как объекта управления.

Геометрические характеристики БПП (актюаторов), выпускаемых АО «ЭЛПА», приведены в таблице 1, а их основные параме-

Таблица 1. Геометрические параметры БПП

Тип актюатора	Размер, мм			Масса, г
	Длина	Ширина	Толщина	
ЭП-04-ПЛБ-02	45	15	1,2	6
ЭП-07-ПЛБ-09	100	22	1	17
ЭП-07-ПЛБ-10	40	12	0,6	1,8
ЭП-07-ПЛБ-12	35	2,5	0,6	0,5

Таблица 2. Параметры БПП

Тип актюатора	Емкость, нФ	Управляющее напряжение, В	Свободный прогиб, мм	Рабочая длина, мм	Блокирующее усилие, Н
ЭП-04-ПЛБ-02	32	±300	±0,25	35	1,1
ЭП-07-ПЛБ-09	285	±80	±0,75	85	0,38
ЭП-07-ПЛБ-10	125	±80	±0,58	35	0,34
ЭП-07-ПЛБ-12	20	±150	±0,5	28,5	0,12

тры — в таблице 2. Для них общая длина равна длине пьезопластины:  $L = l_1$  (конструкция БПП не имеет выпуска металлической пластины), а  $T = 2h + hM$ . Под блокирующим усилием понимается максимальная внешняя сила, которую нужно приложить на свободном конце БПП, чтобы его перемещение равнялось 0 при подаче максимального напряжения.

Миниатюрные биморфные пьезоприводы японской компании MURATA на базе пьезокерамики PIEZOTITE обеспечивают при напряжении 200 В перемещение свободного конца пластины не менее 1200 мкм, а сила, удерживающая свободный конец пластины в начальном положении, составляет  $83 \pm 20$  мН. Электрическая емкость равна  $5,7 \pm 2$  нФ. Коэффициент жесткости привода  $cA = 0,07 \times 10^{-3}$  Н/м, а максимальная накопленная энергия  $W_{max} = 0,05$  мДж.

Микродвигатели серии SQL фирмы New Scale Technologies в настоящее время являются самыми миниатюрными и имеют мощность потребления 500 мВт. Их скорость перемещения — 5 мм/с (под нагрузкой 100 г); усилие

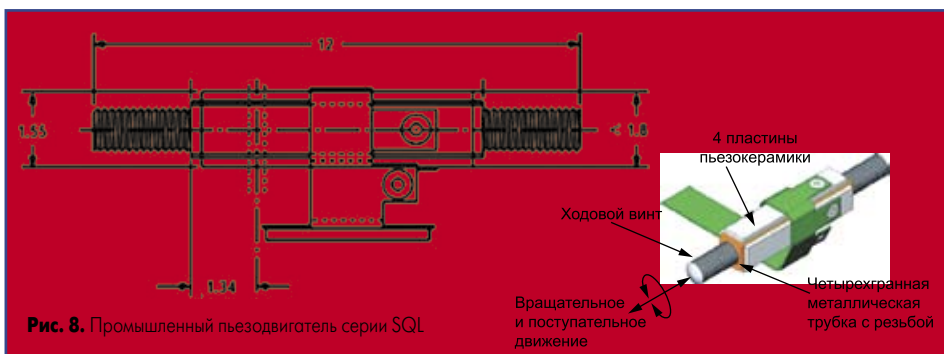


Рис. 8. Промышленный пьезодвигатель серии SQL

перемещения — 200 г; разрешение — 0,5 мкм; рабочий ресурс — 300 000 циклов (при длине хода якоря 5 мм) и вес — 1,7 г (рис. 8). Микросхема драйвера привода содержит преобразователь напряжения и выходные драйверы, работающие на емкостную нагрузку. Входное напряжение — 3 В, уровни выходных напряжений формирователей — до 40 В.

Линейный пьезодвигатель P-652 PLine (рис. 9) имеет скорость движения до 80 мм/с, рабочий ход перемещения каретки 3,2 мм и самофиксацию при останове. Его размеры — 9×6,5×2,4 мм. Благодаря контакту с полоской фрикциона обеспечивается сдвиг подвижной части привода (каретки, платформы, поворотного столика микроскопа) вперед или назад. С каждым периодом колебаний керамического статора выполняется сдвиг каретки на несколько нанометров.



Рис. 9. Пьезодвигатель фирмы PLine:

- 1 — неподвижное основание;
- 2 — алюминиевый наконечник толкателя;
- 3 — керамический пьезоактюатор (неподвижный);
- 4 — подвижная каретка;
- 5 — возбуждающие электроды;
- 6 — приклеенная полоска фрикциона

Движущая сила возникает из продольных колебаний пластины актюатора. При отсутствии сигнала наконечник толкателя прижат к полоске фрикциона, и сила трения, действующая на границе между наконечником и фрикционом, обеспечивает фиксацию каретки.

На рис. 10 показан однокоординатный привод на пьезопреобразователе фирмы CEDRAT RECHERCHE [3].

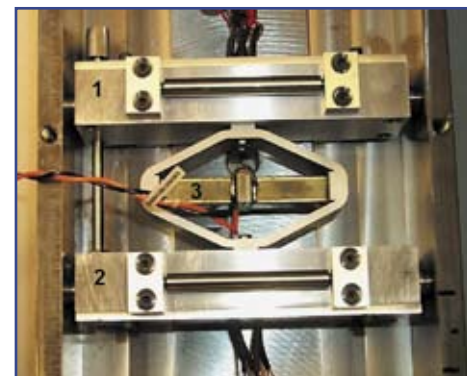


Рис. 10. Однокоординатный пьезопривод

Одно дискретное перемещение пьезоприводов такой конструкции состоит из шести шагов:

- Первый шаг: отключается тормоз (1), тормоз (2) включен, пьезопреобразователь (3) обесточен.



- Второй шаг: на пьезопреобразователь (3) подается напряжение (шаг перемещения задается величиной подаваемого напряжения), в результате пьезопреобразователь удлиняется.
- Третий шаг: включается тормоз (1), пьезопреобразователь активирован.
- Четвертый шаг: выключается тормоз (2), пьезопреобразователь активирован.
- Пятый шаг: выключается напряжение на пьезопреобразователе, его длина принимает исходное положение (уменьшается).
- Шестой шаг: включается тормоз (2), привод зафиксирован и перемещен на один дискретный шаг  $\Delta$ . Далее цикл повторяется. Очевидно, что по этой схеме привод может совершать реверсивное движение.

В настоящее время ультразвуковые пьезопроводы могут обеспечивать движение с ускорением до 20g и скорость движения до 800 мм/с. Усилие привода пьезодвигателя может достигать 50 Н. Приводы PLine могут работать без обратной связи и обеспечивать разрешение 50 нм.

### Управление пьезодвигателями в технологических системах

Управляемый пьезопровод для микроперемещений состоит из пьезопреобразователя, управляемого объекта и чувствительного элемента датчика микроперемещений. Все они объединены в один конструктивный узел. Пьезодвигатель перемещает объект, с которым жестко связана подвижная часть датчика микроперемещений. На рис. 11 приведена функциональная схема управляемого привода для микроперемещений. Управляющее воздействие формируется микропроцессором (МП) и через усилитель подается на пьезопреобразователь. Сигнал, представляющий собой оценку реального положения (и микроперемещения) управляемого пьезопреобразователем объекта, формируется датчиком микроперемещений. В качестве датчика микроперемещений используется емкостной датчик с чувствительным элементом специальной конструкции. Сигнал оценки реального микроперемещения передается в микропроцессор.

Анализ типовой переходной характеристики тонкопленочного пьезопреобразователя ( $\Delta$  — перемещение,  $t$  — время) (рис. 12а) показывает, что колебательный процесс у тонкопленочной керамики сильно подавлен. Объясняется

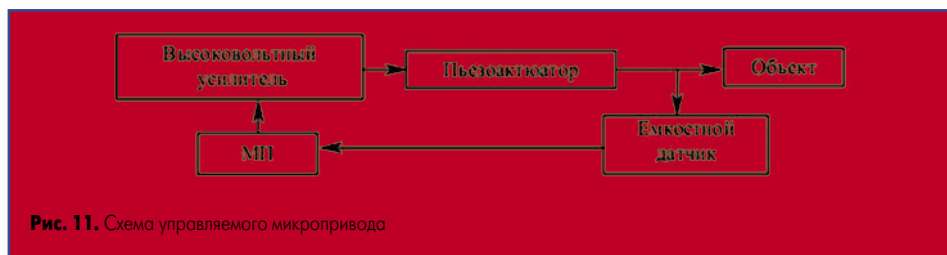


Рис. 11. Схема управляемого микропривода

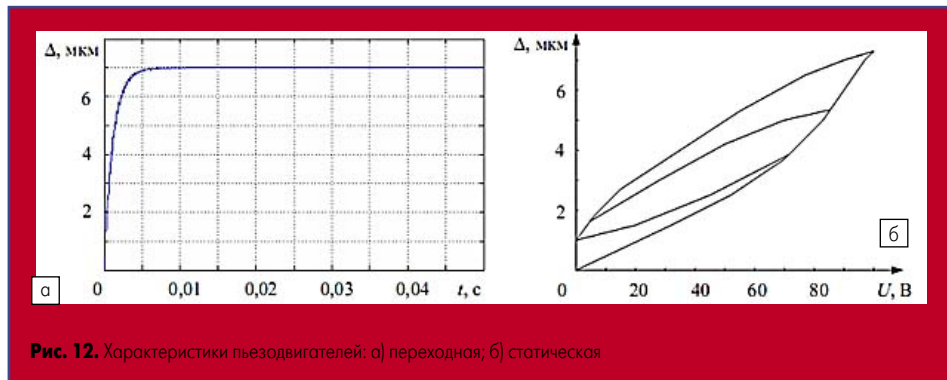


Рис. 12. Характеристики пьезодвигателей: а) переходная; б) статическая

это свойство большой собственной емкостью керамики и высокой вязкостью материала.

На рис. 12б приведена типовая статическая характеристика многослойного пьезопреобразователя, определенная по результатам стендовых испытаний. Максимальная неоднозначность положения объекта при его прямом и обратном перемещениях (гистерезис) получается при перемещении объекта в полном диапазоне работы привода. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергетическим потерям, вызванным внутренним трением слоев керамики, которая характеризует качество применяемого пьезоматериала. Гистерезис статической характеристики может достигать 20–30% от перемещения пьезопреобразователя, что негативно сказывается на динамических и точностных свойствах привода [5].

Поскольку пьезокерамике присуще свойство ползучести, то изменение установившегося значения микроперемещения, реализуемого пьезодвигателем при постоянном входном напряжении высоковольтного усилителя, приводит к снижению точностных свойств привода [6].

### Применение пьезодвигателей в оборудовании микросварки

Для присоединения проводников малого сечения от 20 мкм и менее при пониженной температуре сварки (100...150 °С) при сборке

полупроводниковых приборов и интегральных микросхем требуются новые автоматизированные установки. Они должны содержать прецизионную сварочную головку с программируемым усилием рабочего инструмента на позиции сварки по заданному профилю и прецизионный механизм отрыва-подачи проволоки, что позволит повысить качество изделий [7]. Механизм отрыва подачи любой установки микросварки состоит из привода зажима проволоки (зажимных губок) и привода перемещения зажимных губок относительно сварочного инструмента для цикла отрыва-подачи проволоки.

При разработке оптимальной конструкции механизма зажима/отрыва проволоки исследовались три типа механизмов с различным типом привода [8]: соленоид (рис. 13а), электромагнит с подвижным якорем (рис. 13б) и механизм на биморфных пьезоэлементах изгибного типа (рис. 13в). Управление приводами механизма отрыва-подачи (зажима) при исследовании динамических характеристик осуществлялось с помощью транзисторных ключей для соленоида и электромагнита с подвижным якорем, а для приводов с использованием пьезокерамики использовался мощный операционный усилитель с обратной связью. Динамика работы приводов контролировалась с помощью датчика перемещений на основе датчика Холла.

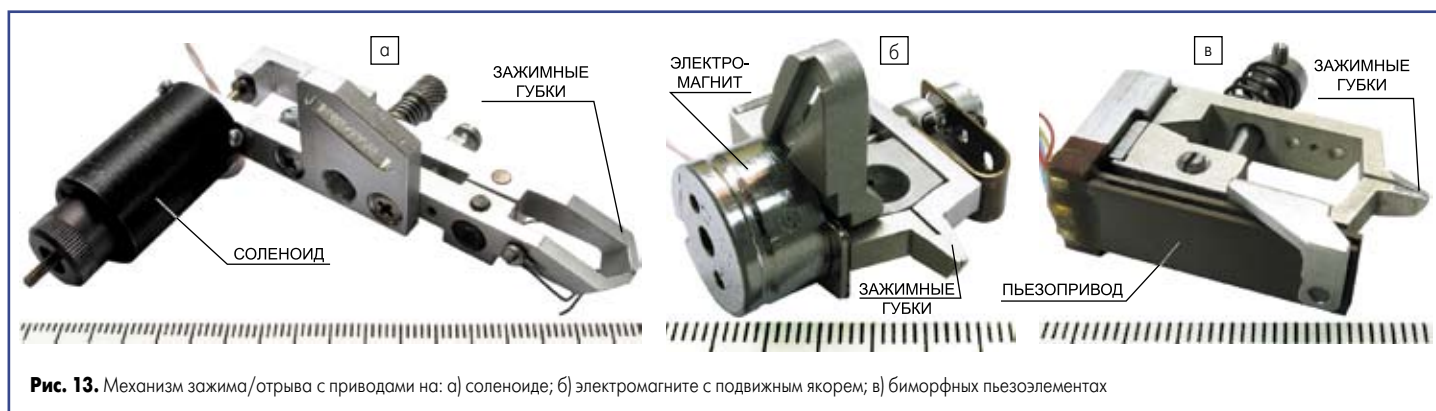


Рис. 13. Механизм зажима/отрыва с приводами на: а) соленоиде; б) электромагните с подвижным якорем; в) биморфных пьезоэлементах

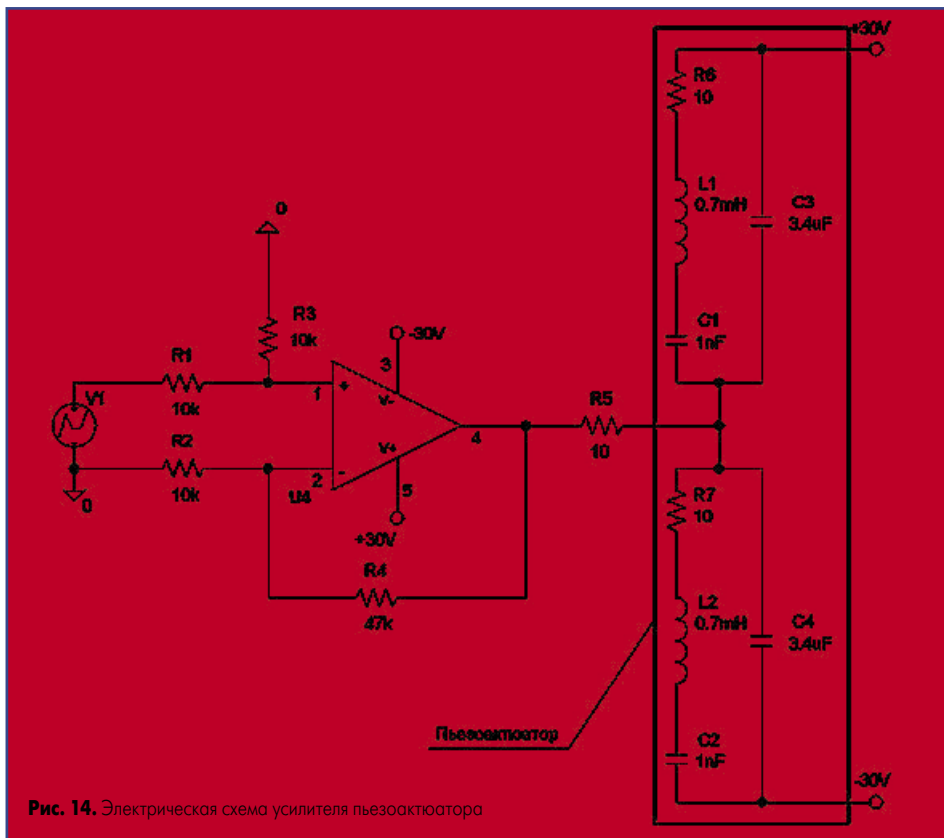


Рис. 14. Электрическая схема усилителя пьезоактюатора

Механизм зажима проволоки разработан на основе перспективного пьезопривода на изгибных элементах типа PL127.251, состоящего из двух склеенных между собой пьезокерамических пластин из многослойной керамики фирмы PIC (Германия). Преимущества пьезоактюаторов такого типа — малое время срабатывания (не более 7 мс) и невысокое управляющее напряжение (не более  $\pm 30$  В).

Небольшие их размеры и малая масса позволяют создавать компактные устройства, заменяющие собой механизмы с электромагнитами в случае малых перемещений и повышенных требований к скорости срабатывания. Такие пьезоприводы обеспечивают программируемые перемещения от 250 до 1000 мкм при изгибающем усилии от 0,5 до 2 Н. Электрическая схема усилителя пьезоактюатора изгибного типа приведена на рис. 14.

Максимальное значение напряжения управляющего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП, на схеме — источник V1) соответствует максимальному значению напряжения на входе пьезоактюатора. В силу своего принципа работы пьезоактюатор имеет свойство гистерезиса, то есть при подаче управляющего напряжения одной полярности (перемещение в одном направлении) и снятии его затем до нулевого значения актюатор не возвращается точно в первоначальное положение, а не доходит до него на некоторую величину (10–15 мкм). Чтобы избежать этого, на него подается напряжение противоположной полярности, а затем нулевое. Поэтому в схеме применен усилитель с двухполярным питанием ( $\pm 30$  В). Входное напряжение усилителя поступает с ЦАП, управляемого программно.

Максимальное перемещение при изгибе пьезоэлемента при напряжении 30 В составляет 350 мкм при усилии 100 г, что достаточно для работы с проводниками диаметром от 12,5 до 75 мкм. Преимущества привода на биморфных пьезоэлементах заключается в небольшой массе привода и малом потреблении энергии, есть также возможность запрограммировать не только усилие зажима, но и скорость перемещения его подвижной части, что обеспечивает безударную работу механизма и отсутствие деформации проводника.

Механизмы зажима с электромагнитами соленоидного типа и подвижным якорем целесообразно использовать для проводников с диаметром более 20 мкм, поскольку есть риск ударного воздействия на проволоку во время цикла отрыва-подачи проволоки.

Второй недостаток — относительно большое время срабатывания (15–20 мс), что является критическим фактором для высокоскоростных автоматов микросварки.

Для установки ЭМ-4320У-01 [9] (рис. 15) разработан и испытан механизм зажима проволоки с использованием биморфных пьезопластин, обеспечивающий безударный зажим, что исключает деформацию проволоки диаметром менее 17,5 мкм.

Внешний вид механизма зажима проволоки на основе биморфных пьезоэлементов показан на рис. 16. Измерение времени срабатывания зажима с использованием пьезопривода показало, что оно находится в диапазоне 8–10 мс, что меньше стандартного времени срабатывания зажима с электромагнитным приводом (15–20 мс).

Для управления пьезоприводом служит специально разработанный электронный модуль (рис. 17). Использование биморфных элементов в настоящее время ограничено из-за малого усилия перемещения.

Альтернативным решением могут стать многослойные пьезокерамические пакеты с механическим усилителем перемещения. Подобные преобразователи при обеспечении перемещения до 800 мкм можно использовать в установках микросварки с повышенным сечением выводов (до 500 мкм), а также в механизмах отрезки толстых проводников.



Рис. 15. Установка микросварки ЭМ-4320У-01



Рис. 16. Механизм зажима проволоки с пьезоприводом



Рис. 17. Модуль управления пьезоприводом

### Выводы

Прецизионные пьезодвигатели могут найти применение в высокоточных системах позиционирования специального технологи-

ческого оборудования для производства изделий электронной техники. Их очевидные преимущества заключаются в возможности программирования перемещения с высоким разрешением и минимальном техническом обслуживании.

### Литература

1. Designing with piezoelectric transducers: Nanopositioning fundamentals. Каталог фирмы PI (Германия), 2005 — [www.piceramic.com](http://www.piceramic.com)
2. Смирнов А.Б. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими двигателями. СПб: Гос. политех. университет, 2003.
3. Vaughan M., Leo D. J. Integrated piezoelectric linear motor for vehicle applications / ASME Int. Adaptive Structures Materials Systems Symp. Nov. 17–22, 2002. New Orleans, LA, USA.
4. [www.elpapiezo.ru](http://www.elpapiezo.ru)
5. Самарин А. Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
6. Бойков В.И. и др. Экспериментальное исследование характеристик пьезоприводов нового поколения // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 11.
7. Ланин В.Л., Петухов И.Б., Шевцов В.В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // Компоненты и технологии. 2009. № 7.
8. Ланин В.Л., Петухов И.Б., Шевцов В.В. Выбор микропривода механизма зажима и подачи микропровода в установках термовуковой микросварки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. № 3.
9. Ковальчук Г. и др. Новое поколение установок ультразвуковой микросварки // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 8.