

Д. т. н. В. Л. ЛАНИН, И. Б. ПЕТУХОВ, В. В. ШЕВЦОВ

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский университет информатики и радиоэлектроники; КБТЭМ-СО  
E-mail: vlanin@bsuir.by; petuchov@kbtem.by

Дата поступления в редакцию  
09.02 2010 г.

Оппонент к. т. н. Н. Т. ГРИНЧЕНКО  
(Ин-т микроприборов, г. Киев)  
к. т. н. Л. И. ПАНОВ (ОНПУ, г. Одесса)

## ВЫБОР МИКРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ЗАЖИМА И ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ В УСТАНОВКАХ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКИ

*Исследованы три типа микроприводов механизма зажима проволоки для установок термозвуковой микросварки выводов диаметром от 12,5 до 75 мкм и даны рекомендации по их выбору в зависимости от диаметра проволоки.*

Основными видами микросварки проводников в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах являются сварка термокомпрессионная, ультразвуковая, термозвуковая, сварка расщепленным электродом, косвенным импульсным нагревом. Наиболее широкое распространение в настоящее время получила термозвуковая микросварка методом «шарик-клин» с использованием золотой, а в последнее время — медной проволоки диаметром 17,5—50 мкм, и методом «клин-клин» для алюминиевой проволоки диаметром 20—500 мкм [1, 2]. Основным преимуществом соединений типа «клин-клин» для проводников малого диаметра является малая площадь, что позволяет применять этот метод при микросварке изделий с расстоянием между контактными площадками менее 40 мкм. Для маломощных приборов наиболее часто применяются микропроводники диаметром от 20 до 35 мкм.

Современные требования полупроводниковой технологии предполагают отход от метода монтажа кристаллов с применением высокотемпературной эвтектики Au-Si (377°C) и широкое использование вместо этого низкотемпературных клеев, композиционных материалов и припоев для монтажа кристаллов в корпус изделия. Это вызывает необходимость обеспечивать соединение при температуре 100—150°C вместо 180—250°C. Высокая степень интеграции интегральных микросхем и уменьшение размеров контактных площадок до 50—75 мкм приводит к необходимости использовать проволоку малого сечения — диаметром от 17,5 до 20 мкм (золото, алюминий) и плоские проводники из алюминия толщиной 12,5—18 мкм, особенно в изделиях СВЧ-электроники. С уменьшением диаметра проволоки соответственно уменьшается усилие ее разрыва, а требования к управлению системой подачи проволоки и к формированию рабочего усилия сварки резко возрастают. Таким образом, необходима разработка прецизионных микроприводов механизма отрыва-подачи (зажима) присоединяемых проводников в установках термозвуковой

микросварки и системы формирования рабочих усилий на сварочный микроинструмент. Присоединение проводников диаметром меньше 20 мкм в установках термозвуковой микросварки связано с выполнением ряда следующих технических требований.

1. Установка должна содержать прецизионный механизм дозированной бездефектной подачи проволоки со стандартных катушек с проволокой фирм-производителей, например, таких как SPM (Малайзия), HERAEUS (Германия) и AFW (США), что исключает операцию перемотки проволоки на катушки собственного производства, сохраняя физико-химические свойства проволоки.

2. Прецизионный привод по координате Z должен иметь быстродействующий датчик касания для определения момента контактирования рабочего инструмента с местом сварки, обеспечивающий минимальную деформацию проводника до начала сварки.

3. Сварочная головка с программируемым устройством нагружения должна обеспечивать минимальное усилие контакта при касании места сварки до начала процесса присоединения (от 5 до 10 г) и необходимый профиль сварочного усилия (постоянный, трапецеидальный, ступенчатый) с дискретностью задания нагрузки не более 0,1 г в диапазоне от 10 до 150 г в течение процесса присоединения.

4. Для снижения температуры сварки до 100—150°C необходима ультразвуковая система (УЗ-генератор + УЗ-преобразователь) с расширенным диапазоном рабочих частот 90—140 кГц, которая должна обеспечивать оптимальное согласование с рабочей частотой стандартных микроинструментов отечественного и зарубежного производства. Дискретность подводимой от УЗ-генератора мощности должна быть не более 0,001 Вт в диапазоне 0—2,5 Вт на нагрузке 15—30 Ом.

5. В процессе сварки необходимо контролировать деформацию проводника по методу отклонения профиля деформации от заданных параметров с автоматической проверкой тех сварных соединений, профиль которых выходит из заданных допусков.

При разработке оптимальной конструкции механизма отрыва-подачи проволоки исследовались три типа механизмов с различными приводами: соленоидом, электромагнитом с подвижным якорем и приводом на биморфных пьезоэлементах изгибного типа (рис. 1). Управление приводами механизма отрыва-

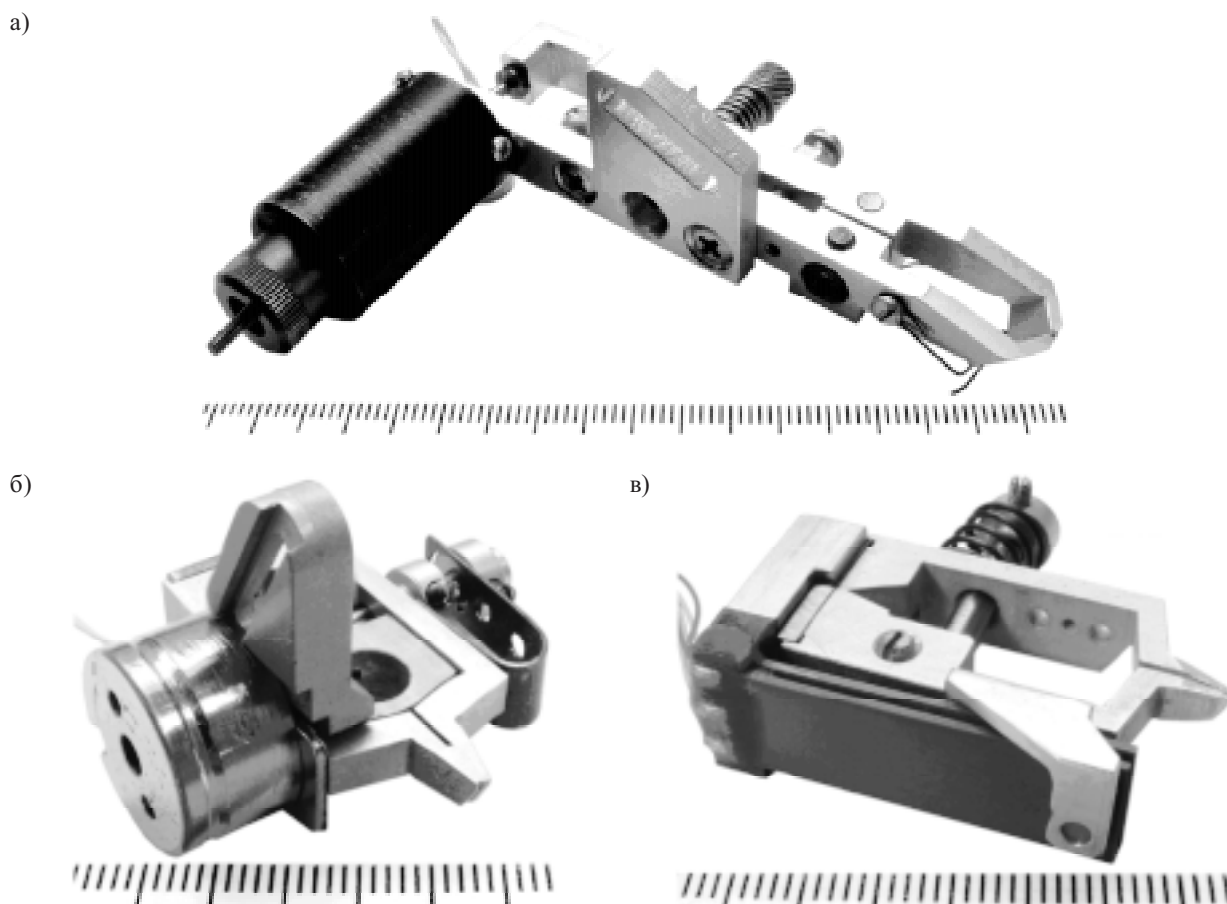


Рис. 1. Механизм зажима-отрыва проволоки с приводом различных типов:  
*а* — соленоид; *б* — электромагнит с подвижным якорем; *в* — привод на биморфных пьезоэлементах

подачи (зжима) при исследовании динамических характеристик осуществлялось для первых двух типов — с помощью транзисторных ключей, а для приводов с использованием пьезокерамики и электромагнита нагружения типа «voice coil» — с помощью мощного операционного усилителя с обратной связью.

Нагружение свариваемых элементов создавалось с помощью электромагнита, выполненного по принципу «voice coil» (катушка в поле постоянного магнита). Усилие нагружения задается установкой определенной величины тока катушки, который форми-

руется усилителем с токовым выходом (генератор тока, управляемый напряжением). Усилитель реализован на мощном операционном усилителе с отрицательной обратной связью по току нагрузки. Входной сигнал усилителя формируется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), управляемым программно. Электромагнит нагружения проходит предварительную калибровку, формируемое усилие учитывает массу качающейся части сварочной головки и положение катушки в поле постоянного магнита. Калибровочный график приведен на **рис. 2**.

Электрическая схема усилителя управления приводом нагружения приведена на **рис. 3**. В качестве выходного усилителя использовался операционный усилитель типа ОРА544 фирмы Burr-Brown. Схема управления построена на использовании обратной связи по току нагрузки через цепь нагрузки (катушку электромагнита) *R5*. Демпфирующие цепи *R7—C2* и *R8—C4* предотвращают самовозбуждение операционного усилителя при работе на индуктивную нагрузку. Управляющее воздействие осуществлялось с помощью установленной в компьютер платы типа PCL-726, содержащей шесть 12-разрядных цифро-аналоговых преобразователей. Для задания амплитуды и профиля сигнала управления использовались тестовые утилиты программного обеспечения полуавтоматической установки ЭМ-4320У. Интерфейс

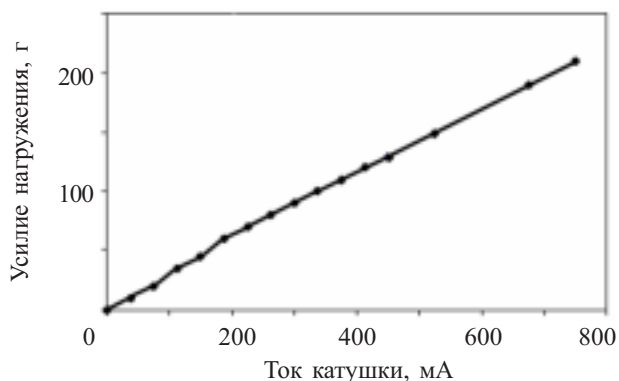


Рис. 2. Калибровочный график привода нагружения типа «voice-coil»

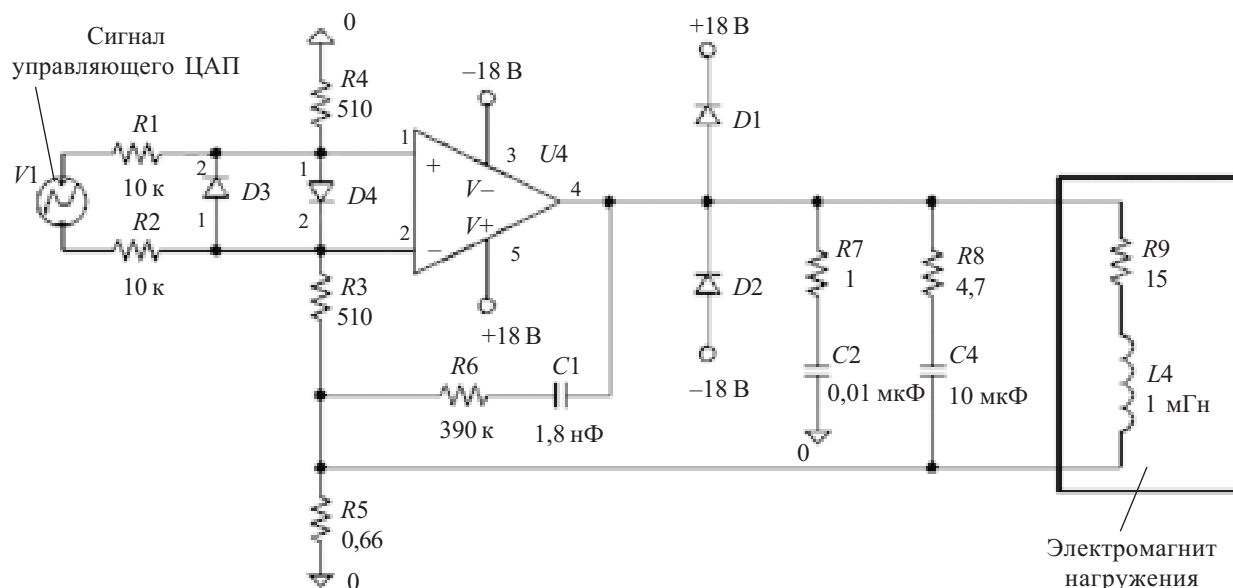


Рис. 3. Электрическая схема усилителя управления приводом нагружения типа «voice-coil»

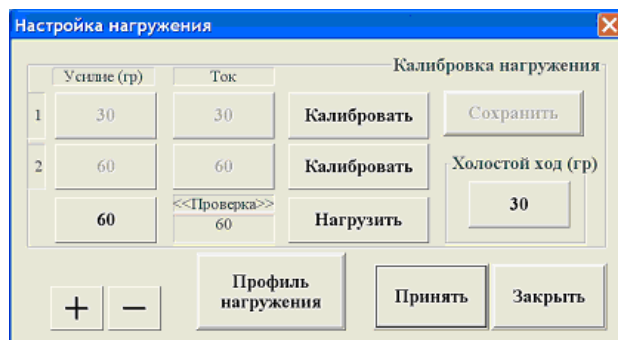


Рис. 4. Интерфейс управления электромагнитным нагружением

управления электромагнитным нагружением показан на рис. 4.

Максимальное значение напряжения управляющего ЦАП (10 В) соответствует максимальному значению тока катушки электромагнита нагружения (750 мА). При работе электромагнита происходит его разогрев проходящим током. Температура провода обмотки в наиболее жестких режимах может достигать 80°C. Это ниже максимальной рабочей температуры обмоточного провода (130°C), однако при этом растет сопротивление катушки и при стабильном токе увеличивается падение напряжения на ней. Для сохранения линейности преобразования напряжения ЦАП в ток электромагнита должно соблюдаться условие

$$U_k \leq U_+ - (3,8 + I_k R_5), \quad (1)$$

где  $U_k$  — напряжение на катушке;

$I_k$  — ток через катушку;

$U_+$  — положительное напряжение источника питания.

Зависимость тока катушки от напряжения ЦАП (нарастание от 0 до 10 В) в диапазоне температуры от 20 до 80°C с дискретностью 10°C имеет линейный характер в диапазоне управляющего напряжения ЦАП.

Преимущество привода нагружения на основе электромагнита типа «voice-coil» по сравнению с механическим нагружением на основе пружин и противовесов очевидно — это возможность программирования усилия сварки, а также уменьшения динамического удара при переходе от усилия касания на рабочее усилие сварки.

Был исследован также альтернативный механизм зажима системы отрыва-подачи проволоки на основе перспективного пьезопривода на изгибных элементах типа PL127.251, состоящий из двух склеенных пьезокерамических пластин из многослойной керамики фирмы PIC (Германия) [3]. Преимуществами актуаторов такого типа являются малое время срабатывания (не более 5 мс), высокая жесткость, невысокое управляющее напряжение (не более ±30 В). Небольшие их размеры и малая масса позволяют создавать компактные устройства, заменяющие собой устройства с электромагнитами в случае малых перемещений и повышенных требований к скорости срабатывания [4]. Такие пьезоприводы обеспечивают перемещение от 250 до 1000 мкм при изгибающем усилии от 0,5 до 2,0 Н. Электрическая схема усилителя пьезоактуатора изгибного типа приведена на рис. 5.

Максимальное значение напряжения управляющего цифроаналогового преобразователя (ЦАП, на схеме — источник  $I1$ ) соответствует максимальному значению напряжения на входе пьезоактуатора. Поскольку материал пьезоактуатора обладает гистерезисными свойствами, при подаче управляющего напряжения одной полярности (перемещение в одном направлении) и снятии его затем до нулевого значения актуатор не возвращается точно в первоначальное положение, а не доходит до него на 10—15 мкм. Чтобы избежать этого, на него подается сначала напряжение противоположной полярности, а затем нулевое. Поэтому в схеме применен усилитель с двухполярным питанием (±30 В). Входное напряжение усилителя поступает с ЦАП.

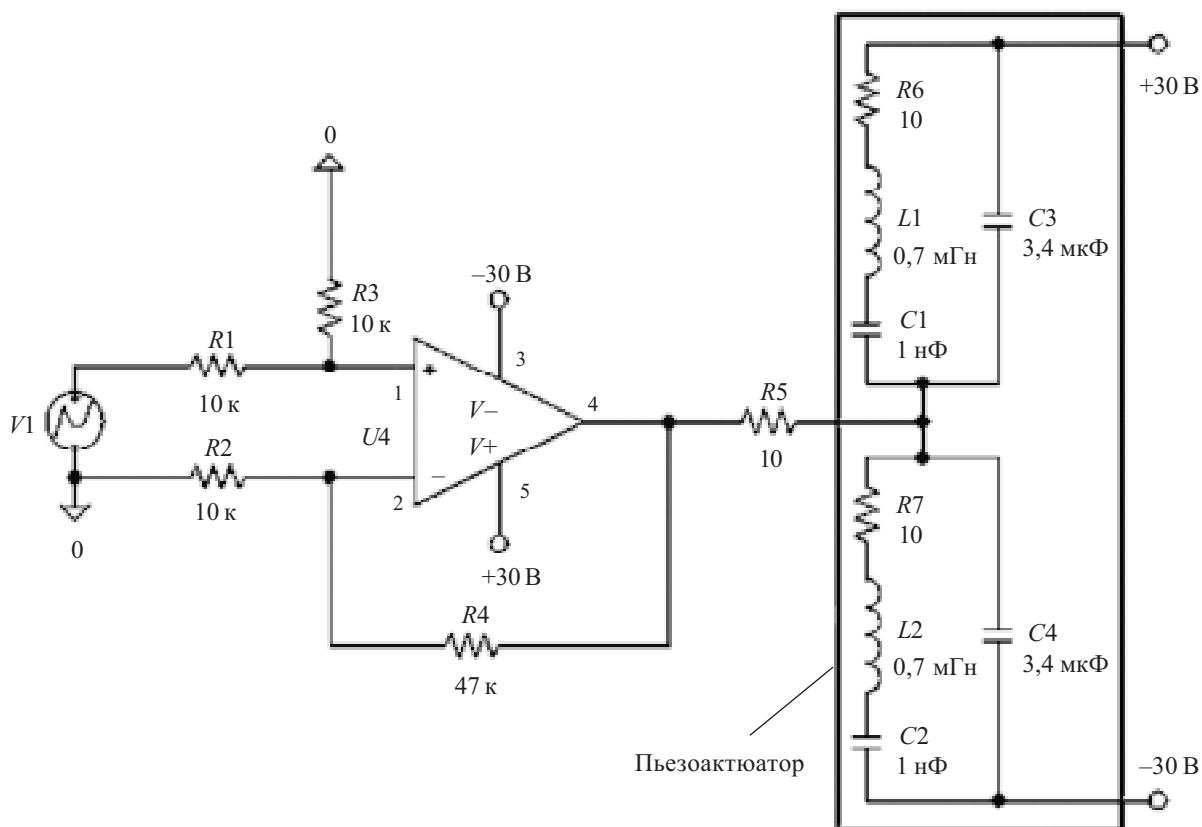


Рис. 5. Электрическая схема усилителя пьезоактюатора изгибного типа

Максимальное перемещение актюатора при изгибе пьезоэлемента при напряжении 30 В составляет 350 мкм при усилии 100 г, которого достаточно для работы с проводниками диаметром от 12,5 до 75 мкм. Преимущество привода на биморфных пьезоэлементах заключается в его малой массе, малом потреблении энергии и возможности программирования не только усилия зажима, но и скорости перемещения подвижной части механизма зажима, что обеспечивает его безударную работу, исключающую деформацию проводника. Механизмы зажима с электромагнитами соленоидного типа и с подвижным якорем целесообразно использовать для проводников диаметром более 20 мкм, поскольку в таком случае есть риск ударного воздействия на проволоку во время цикла ее отрыва-подачи.

\*\*\*

Таким образом, определены оптимальные параметры управления катушкой магнита нагружения для получения линейной характеристики «управляющее

напряжение — усилие нагружения», что позволяет программно задавать необходимое усилие на сварочном инструменте и усилие зажима проволоки, исключающие деформацию проводника при термозвуковой микросварке. Наиболее подходящими механизмами отрыва-подачи проводников диаметром от 12,5 до 75 мкм являются механизмы с приводами на биморфных пьезоэлементах.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Harman G. Wire bonding in microelectronics: materials, processes, reliability and yield.— N. Y.: McGraw-Hill, 1997.— P. 11—32.
2. Shah A., Mayer M., Zhon Y. et al. In situ ultrasonic force signals during low-temperature thermosonic copper wire bonding // Microelectronic Engineering.— 2008.— Vol. 85.— P. 1851—1857.
3. Pertsch P., Richter S., Kopsch D. et al. Reliability of piezoelectric multilayer actuators // Proceed. Conf. ACTUATOR.— Germany, Bremen.— 2006.— P. 1—3.
4. А. с. 1391831 СССР. Установка для ультразвуковой сварки / А. И. Беляков, И. Б. Петухов, А. П. Рыдзевский и др.— 1988.— Бюл. № 16.