

# Формирование микросварных соединений в интегральных схемах контактной микросваркой

**В статье представлены результаты исследования процессов формирования микросварных соединений медной проволокой с контактными площадками с никелевым и золотым покрытием в интегральных микросхемах контактной микросваркой.**

**Владимир Ланин,**  
профессор

vlanin@bsuir.by

**Игорь Петухов**

petuchov@kbtcm.by

## Введение

Завершают изготовление любого микроэлектронного прибора операции сборки и монтажа, при которых формируются электрические соединения между контактными площадками элементов прибора. По оценке специалистов, в технологии производства микроэлектронных приборов 40–65% стоимости производства приходится на сборочные операции, а число отказов, вызванных нарушением внутренних соединений, составляет 30–60% от их общего количества [1].

Основным методом монтажа микроэлектронных приборов с момента их появления и по настоящее время является проволочный монтаж, который, несмотря на высокую трудоемкость, имеет ряд преимуществ: низкая стоимость изготовления элементов электронных приборов, возможность визуального контроля качества соединений, способность прибора выдерживать большой уровень мощности и возможность совершенствования сварочных систем.

Развитие современной электроники, требующей непрерывного совершенствования оборудования, технологии и поиска новых технологических процессов сварки, поставило ряд задач в области соединения однородных и разнородных материалов. Наиболее конъюнктурным способом сварки в изделиях электронной техники является способ сварки давлением, обеспечивающий требуемую точность совмещения свариваемых элементов, форму сварной точки и усилие сжатия.

Каждый из известных способов сварки давлением характеризуется величиной различных физических (механических, тепловых и электрических) воздействий на элементы сварки. Допустимая величина воздействий на элементы определяется конструкцией и примененными в них материалами. Поэтому необходимо оптимизировать параметры контактной сварки давлением и оценить их влияние на прочность соединений.

Повышение надежности и долговечности сварочных систем оборудования решается за счет улучшения технологических параметров присоединения, подбора материалов для микроинструмента с гарантированными

механическими свойствами и сопротивлением их коррозии, износу, термическим нагрузкам. Если учитывать громадные издержки, связанные с производственным сварочным оборудованием, то становится понятной зависимость производителей изделий электронной техники от изготовителей оборудования.

За рубежом ведутся интенсивные исследования по разработке сварочных систем для микросварки, обеспечивающих высокое качество соединения методом контактной сварки не только традиционных материалов из золота, но и из никеля, меди, серебра, платины. Результаты исследований, а также анализ научно-технической информации позволили выработать наиболее перспективные требования к сварочной системе присоединения выводов методом контактной микросварки, встраиваемой в серийно выпускаемое универсальное оборудование, предназначенное для образования межсоединений из «нетрадиционных» материалов.

## Физические процессы при контактной микросварке

Как правило, микросваркой соединяют элементы конструкции приборов, выполненные из одноименных или различных металлов и сплавов. Помимо основного требования — прочности соединения — необходимо обеспечить высокие электрофизические свойства контакта. Выбор оптимального режима микросварки обычно ограничен допустимым термическим и механическим воздействием. В решении этой задачи роль микросварки очень велика, так как современные способы позволяют варьировать термические и механические параметры в широких пределах.

Физическая природа связи, обуславливающая схватывание и образование прочного соединения металлов, является общей для всех разновидностей микросварки давлением. Формирование микросоединений происходит в твердой фазе в результате процессов, протекающих на поверхности и в объеме соединяемых материалов. К ним относятся:

- разрушение оксидных пленок и адсорбирующих слоев;

- развитие физического контакта в результате деформации микронеровностей;
- активизация поверхности соединяемых материалов;
- образование локальных микросхватываний металлов;
- возникновение поверхностной и объемной диффузии и релаксации.

Процесс образования неразъемного соединения протекает в две стадии: образование физического контакта и диффузионное зарастивание микронесплошностей и пор. На первой стадии соединения происходит снятие микронеровностей (пластическая деформация и формирование фактической площади неразъемного физического контакта); разрушение и вынос на поверхность оксидных и адсорбированных пленок; сближение вскрытых ювенильных поверхностей до проявления межатомного контакта (взаимодействия); образование атомных связей.

Во время второй стадии происходит диффузионное зарастивание пор, при этом энергия активизации зарастивания пор близка к энергии активизации процесса самодиффузии. Механизм заполнения атомами несплошностей между атомами связывается с миграцией вакансий. Вакансии меняются местами с атомами и способствуют зарастиванию пор на границе соединяемых металлов.

При сравнительно малых давлениях доминирующими будут диффузионные процессы, связанные с замещением вакансий. При высоких давлениях, кроме диффузии, имеют место процессы переноса атомных комплексов со скоростями деформации.

Соединение разнородных материалов — процесс более сложный, так как наряду с самодиффузией происходит диффузионное выравнивание концентраций разноименных атомов, а также возникновение и рост новой фазы. В простейшем случае при взаимодействии металла А с металлом В на границе раздела возникает лишь одна интерметаллическая фаза  $A_mB_n$ . При соединении может произойти (независимо от явления взаимной растворимости) химическая реакция с образованием интерметаллического соединения непосредственно на границе металлов.

Образованию на поверхности соприкосновения металлов интерметаллической фазы предшествует хемосорбция, то есть адсорбция, при которой проявляются химические силы взаимодействия. Поры в зависимости от условий нагрева сварного соединения могут образовывать сплошную зону. Следует отметить, что порообразование не происходит в плоскости контакта, находящегося под приложенным извне давлением. Изучение механизма сварки разнородных материалов без расплавления направлено на выяснение закономерностей ранних этапов диффузионного взаимодействия, когда интерметаллические фазы лишь начинают возникать и их наличие не приводит к существенному ухудшению физико-механических свойств сварных соединений.

Задача получения качественного соединения связана с выбором рационального способа и режима сварки, при которых интенсификация

процесса сварки сопровождалась бы минимальным неблагоприятным изменением свойств металлов. Выбор способа соединения микросваркой металлов малого сечения должен производиться с учетом следующих требований:

- Процесс должен выполняться при минимальных значениях температуры, усилия сжатия и времени сварки.
- Нагрев и давление по возможности должны быть локальными.
- Прочность соединения должна быть не менее, чем у наименее прочного из соединяемых элементов (при минимальном объеме соединения).

В настоящее время для соединения материалов малого сечения широкое распространение получила контактная сварка (воздействие давления и нагрева проходящим током на соединяемые материалы). Ее разновидность — односторонняя контактная сварка «расщепленным» электродом или сдвоенным электродом с регулируемым зазором.

Односторонняя контактная микросварка представляет собой процесс соединения материалов в твердом состоянии в результате взаимной диффузии соединяемых материалов при нагреве их электрическим током с одновременным приложением усилия сжатия. Соединение свариваемых элементов происходит при местном нагреве за счет кратковременного импульса электрического тока, пропускаемого между электродами через соединяемые материалы в зоне контакта. Диаметр или толщина проводников, присоединяемых этим способом контактной сварки, составляет 0,02–0,2 мм.

При создании соединений с пленочными контактными площадками, для создания соединений, обладающих достаточной прочностью, требуется деформация присоединяемого вывода, равная 40–55%. При этом происходит достаточно большая поверхностная и объемная диффузия. Поэтому для получения воспроизводимости прочностных характеристик сварных соединений толщина пленочных элементов должна быть не менее 0,5 мкм [2].

Основными параметрами односторонней контактной сварки являются: напряжение на электродах; длительность сварочного импульса; усилие сжатия свариваемых элементов. Одностороннюю контактную сварку осуществляют одним или несколькими прямоугольными импульсами постоянного тока, полученного полупериодом (или его частью) переменного тока повышенной частоты (800–1200 Гц). Высокое качество и надежность сварных соединений гарантируется правильным подбором амплитуды и длительности сварочного импульса. Наибольшая средняя прочность соединений достигается при меньших отношениях длительности сварочного импульса к его амплитуде в сочетании с оптимальным давлением [2].

При сварке проводников с тонкими пленками, нанесенными на диэлектрик, для снижения термических напряжений и предотвращения возникновения трещин и сколов в подложке следует применять комбинированный цикл нагрева — предварительный подогрев, основной и завершающий импульсы тока, что

обеспечивает плавное нарастание и спад температуры в зоне сварки. В случае применения комбинированного импульса длительность подогреваемого и завершающего импульсов составляет 1/3 основного импульса.

Длительность основного импульса при односторонней контактной сварке составляет от 0,001 до 1 с. Вспомогательные импульсы не увеличивают непосредственно прочность сварных соединений, но позволяют использовать оптимальное количество энергии с минимальным выделением тепла в зоне сварки, а также снижают вероятность термоудара. Применение комбинированного цикла нагрева позволяет производить сварку проводников из материалов с низкой пластичностью (Pd, Cu, Ni) с тонкими металлческими пленками.

Односторонняя контактная микросварка обладает рядом преимуществ перед другими способами получения микросоединений, такими как:

- возможность получения сварных соединений в изделиях, не допускающих общего нагрева;
- присоединение проводников больших размеров к тонким пленкам;
- широкий диапазон свариваемых материалов.

К недостаткам можно отнести:

- сложность измерения температуры в зоне сварки;
- возможность выхода из строя полупроводникового прибора из-за воздействия напряжения сварочного импульса;
- недопустимость оксидных пленок на поверхности свариваемых элементов.

Качество сварных соединений, получаемых методом контактной односторонней микросварки, во многом определяется состоянием поверхностей, на которых возможны следующие виды загрязнений:

- механические, химически не связанные с поверхностью (пыль, частицы и др.);
- химически связанные с поверхностью (оксидные, нитридные и другие пленки);
- органические (жировые пятна, остатки фоторезиста и др.);
- ионные от предварительной химической обработки в щелочах, кислотах, солях и остатках флюса.

Для обеспечения высоких и стабильных механических свойств соединения необходимо тщательно удалять эти загрязнения не только перед сваркой, но и после (для исключения замыканий и коррозий). В производстве используют следующие виды удаления загрязнений с поверхностей: растворение; эмульгирование; химическое воздействие, превращающее загрязнения в растворимые продукты, удаляемые промывкой; механические воздействия, удаляющие частицы потоком жидкости или газа.

Наибольшее распространение получил метод ультразвуковой очистки, основанной на погружении очищаемого элемента в ванну с растворителем, перемешиваемым с помощью ультразвуковых колебаний частотой 20–40 кГц, которые вызывают кавитацию, резко интенсифицирующую процесс очистки, и очень эффективны при очистке корпусов изделий.

Требования, предъявляемые к растворителям, в основном следующие:

- высокая растворяющая способность с учетом полярности как к загрязнениям, так и к растворителям;
- низкое поверхностное натяжение и низкая скрытая теплота испарения;
- малая токсичность и химическая стабильность;
- негорючесть, неагрессивность к поверхности сварки и прибору.

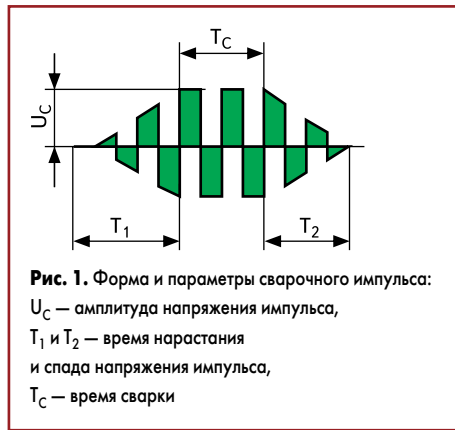
Рекомендуется сочетать различные методы очистки.

В основе процесса контактной сварки — принцип подачи регулируемого по амплитуде и длительности переменного напряжения прямоугольной формы на сварочные электроды, которые контактируют с привариваемым проводником. Протекающий ток через цепь «электрод – проводник – подложка – электрод» вызывает локальный разогрев контактирующих поверхностей, чем обеспечивается присоединение свариваемых материалов. Количество тепловой энергии  $Q$ , выделяемой в зоне сварки, определяется по формуле:

$$Q = k \int_0^t U I dt,$$

где  $k$  — постоянный коэффициент;  $U$  — напряжение на электродах;  $I$  — ток в сварочной цепи.

Напряжение на электродах для выбранного режима поддерживается во время сварки постоянным, ввиду низкого выходного сопротивления блока контактной сварки. Сварочный ток зависит от переходного сопротивления электрод – проволока, проволока – контактная площадка. В процессе эксплуатации сопротивление рабочих поверхностей электродов вырастает за счет постепенного окисления. Это приводит к уменьшению сварочного тока и, соответственно, к уменьшению энергии, выделяемой в зоне сварки. Встроенная система контроля энергии на базе микроконтроллера компен-



сирует изменение проводимости сварочной цепи изменением длительности выходного импульса. При невозможности компенсации уменьшения проводимости из-за плохого контакта необходима сигнализация звуком и световым индикатором о необходимости смены или зачистки сварочных электродов.

### Экспериментальные исследования

Проведены исследования процессов односторонней контактной сварки с целью определения оптимальных режимов процесса. Отработка режимов сварки проводилась во время присоединения проводочных выводов из меди к тонким пленкам подложек из никеля на макетном устройстве, выполненном из сварочной системы установки для контактной сварки ЭМ-4092. Сварка проводилась одним импульсом переменного напряжения частотой  $600 \pm 200$  Гц трапециевидной формы (рис. 1).

Для отработки режимов сварки изготовлены тестовые платы из поликора толщиной 0,6 мм, на поверхности которых нанесены трехслойные тонкопленочные проводники (хром 0,3–0,5 мкм; медь 2–3 мкм; никель 3–5 мкм). В качестве проводника использована проволока из меди диаметром 0,05 мкм (ГОСТ 859-2001).

Предварительно очищенные тестовые платы закреплялись на предметном столике. При сварке очищенный проводочный проводник прижимался к пленочному элементу платы расщепленным электродом типа ЭК. После окончания сварки анализировалась деформация проводочного проводника, определялась механическая прочность сварного соединения и характер его разрушения. Степень деформации рассчитывалась по формуле:

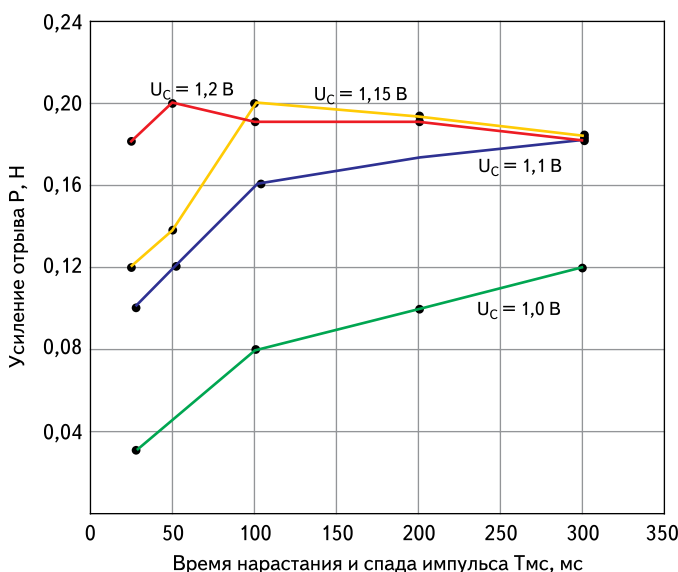
$$E = (1 - 0,8d/B) \times 100\%,$$

где  $d$  — диаметр проводника;  $B$  — ширина сварного соединения.

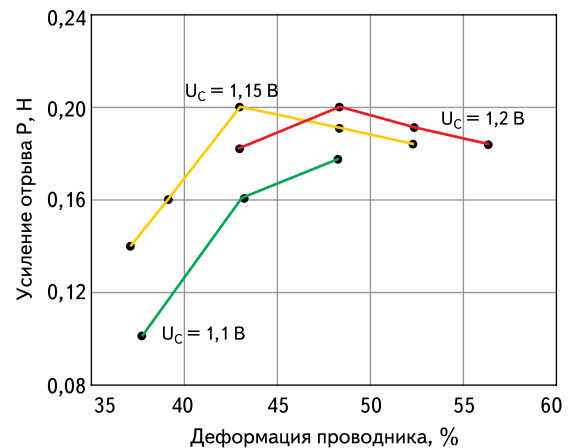
Измерение ширины сварочного соединения осуществлялось на микроскопе МБС-9 при помощи окуляр-микрометра. Механическая прочность сварного соединения определялась до разрушения сварного соединения при помощи граммометра Г-5-30 с ценой деления 1 гс, а характер разрушения — при помощи микроскопа МБС-9.

Исследована зависимость прочности соединения от основных параметров сварки при получении соединений медной проволоки диаметром 0,05 мм с тонкопленочными элементами на тестовой плате, имеющей защитное покрытие из золота и никеля (рис. 2). Исследования проводились на платах с защитным никелевым покрытием контактных площадок толщиной до 4–6 мкм, при контрольном усилии сжатия соединяемых элементов, равном 1,2 Н, и времени контрольной сварки 250 мс. Увеличение времени нарастания и спада напряжения сварочного импульса оказывает значительное влияние на прочность сварных соединений и степень деформации проводника (рис. 3).

Зависимость прочности соединений от времени сварки показана на рис. 4. Соответствующая этой зависимости связь прочности соединения со степенью деформации проводника представлена на рис. 5. Сравнение графиков на рис. 3 и 5 показывает, что независимо от режима сварки наибольшей прочностью облада-



**Рис. 2. Зависимость прочности соединений от времени нарастания и спада импульса и напряжения сварки**



**Рис. 3. Зависимость прочности соединений от величины деформации проводника и напряжения сварки**

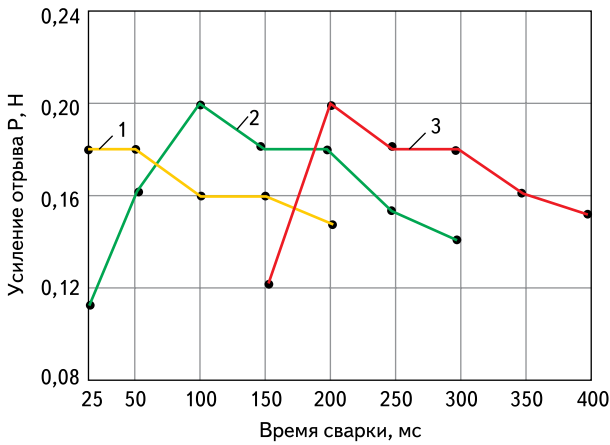


Рис. 4. Зависимость прочности соединений от времени сварки и длительности сварочного импульса (мс): 1 – 25, 2 – 100, 3 – 200

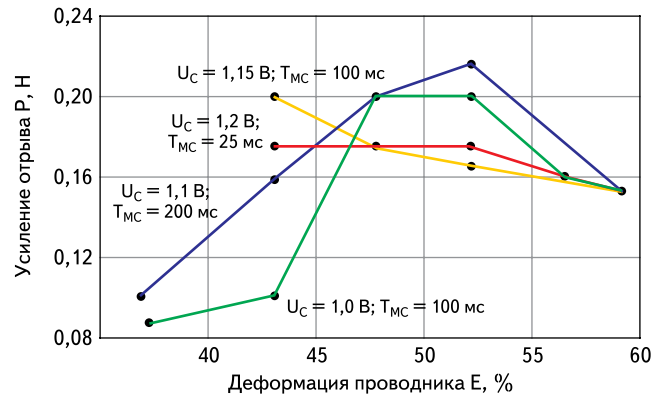


Рис. 5. Зависимость прочности соединений от деформации проводника при различных режимах сварки

ют соединения, степень деформации которых составляет 43–52%. С увеличением деформации проводника различие в прочности соединений, полученных при различных режимах сварки, но имевших одинаковую деформацию, уменьшается, и при деформации ~60% прочность соединения независимо от режима сварки становится равной 0,15 Н. Дальнейшее увеличение деформации приводит к снижению прочности соединения за счет уменьшения сечения проводника в зоне деформации.

При испытании прочности наблюдалось три вида разрушений сварных соединений: по границе свариваемых материалов с отслоением сварной точки; по проводнику вне места соединения; по деформированной части проводника без отслоения сварного соединения.

Первый вид разрушения наблюдался в соединениях, имевших степень деформации менее 43%. В соединениях, имевших деформации 43–52%, наблюдался второй или третий вид разрушения. Соединения, степень деформации которых была более 52%, имели только третий вид разрушений.

Полученные экспериментальные графики зависимости показывают, что оценка прочности соединений без их разрушения может проводиться по степени деформации проводника.

Зависимость прочности соединения от усилия сжатия свариваемых элементов и от времени сварки показана на рис. 6 и 7. Равнопрочные соединения медной проволоки диаметром 0,05 мм с никелевым защитным покрытием на тестовой плате получены при различных значениях параметров сварки. При этом сочетании свариваемых материалов изменение напряжения сварки на 0,1 В было эквивалентно соответствующему изменению времени сварки на 100 мс.

При визуальном контроле сварных соединений наблюдалось оплавление пленки на границе сварного соединения. Испытание прочности этих соединений показало, что разрушение соединений происходит с отслоением пленки от поверхности подложки. Причем на поверхности проволоки, контактировавшей с пленкой, не было обнаружено визуальным осмотром следов алюминиевой пленки.

Это позволяет сделать заключение, что пленка алюминия под сварным соединением полностью растворяется в материале присоединяемого вывода.

### Методы контроля прочности сварных соединений

Для контроля качества сварных соединений применяют два основных типа испытаний: разрушающие и неразрушающие. К первому типу относятся механические испытания сварных соединений с измерением разрушающего

усилия и определением характера разрушения, а также металлографический анализ соединений. Разрушающие методы контроля применяются в качестве выборочных для оценки прочности соединения, при аттестации технологического процесса сварки, при сравнении режимов сварки, при контроле отдельных партий изделий.

При испытаниях на отрыв перемычки усилие прикладывается к середине перемычки под углом 90° к плоскости сварки. Измерение разрушающего усилия проводят при плавном увеличении нагрузки до разрушения соеди-

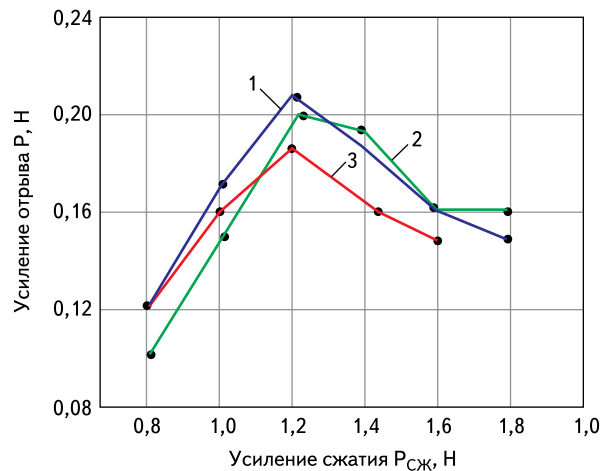


Рис. 6. Зависимость прочности соединений от усилия сжатия и длительности сварочного импульса: 1 – 25 мс; 2 – 100 мс; 3 – 200 мс

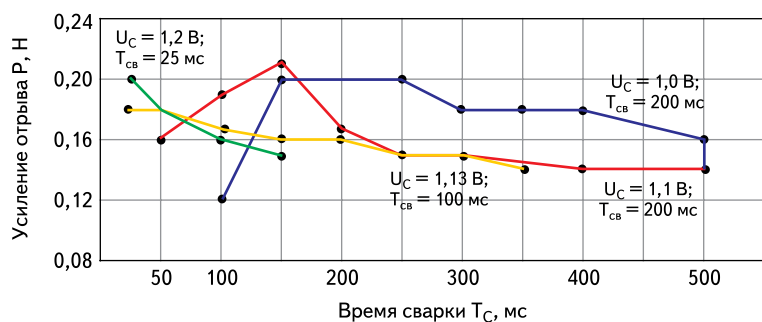


Рис. 7. Зависимость прочности соединений от времени сварки

**Таблица. Режимы контактной микросварки**

Режим сварки			Свойства соединения		
Напряжение импульса U, В	Время сварки tс, мс	Время нарастания и спада импульса tпс, мс	Усилие сжатия P, г	Относительная деформация проволоки, %	Наличие непроваров
3	500	300	300	70	нет

нения и регистрируют ее величину в момент отрыва, затем под микроскопом устанавливают характер обрыва. Металлографические исследования проводят с целью определения структуры сварного соединения и выявления внутренних дефектов.

Визуальный осмотр является наиболее доступным и распространенным методом контроля. За критерий оценки качества сварных соединений при визуальном контроле берется степень деформации соединяемого проводника, измеряемая под микроскопом. Измеряется ширина деформируемой части проводника в месте сварки. Оптимальная величина деформации сварных соединений в зависимости от материала проводника составляет 40–70%, в общем случае деформация проволоочного вывода в месте сварки должна находиться в пределах от 4/3 до 3 его диаметров. Например, для золотой проволоки приемлемая деформация 45–60%.

Величина деформации в сварочной точке напрямую не связана с прочностью соединения из-за состояния свариваемых поверхностей. Однако изменение степени деформации (при неизменной настройке сварочной системы) свидетельствует об изменении условий сварки с возможным изменением прочности сварки.

Для определения оптимальных условий контактной микросварки проволоочных проводников с пленочными элементами ГИС проведен металлографический анализ сварных соединений. В качестве проводника была использована медная проволока диаметром 0,08 мм, покрытая сплавом олово-висмут. Сварка проводилась на платах с различным защитным покрытием проводников при режимах, указанных в таблице. Исследованы покрытия толщиной 3–5 мкм из золота и сплава олово-висмут.

Металлографическое исследование зоны соединения проволоочных проводников с пленочными элементами на микроскопах ММР-2Р и МИМ-8 показало, что в большинстве случаев образуется монолитное соединение проводника с защитными покрытиями проводников. При сварке целостность оловянно-висмутового покрытия, нанесенного на медную проволоку, не нарушалась, довольно четко просматривалась физическая граница проводника и защитного покрытия пленки; однако на отдельных участках соединений в зоне сварки наблюдались частичные непровары.

Неудовлетворительное сцепление проволоочного проводника с пленкой является одной из причин снижения прочности сварного соединения. Для выяснения причин плохого сцепления проведены дополнительные эксперименты на модифицированной установке ЭМ-4320 контактной микросварки. При использовании в качестве проводника медной

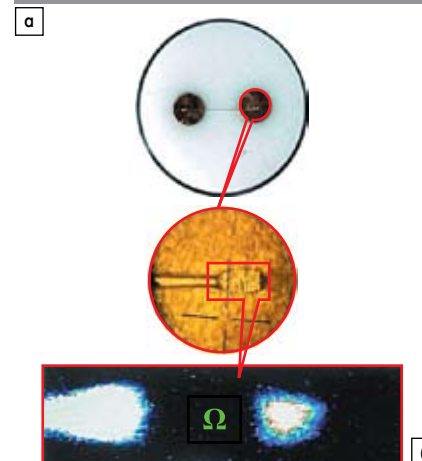
проволоки диаметром 0,08 мм без покрытия (сплавом олово-висмут) частичные непровары не наблюдались.

Неразрушающее исследование микросварных соединений проводилось на установке лазерного фотоакустического диагностирования. Исследуемый образец кристаллоносителя через слой согласующего вещества (глицерина) акустически закреплялся на предметном столике с пьезопреобразователем. Посредством оптической системы и координатного стола перекрестие бинокулярного микроскопа, в центре которого расположена световая метка в виде квадрата, устанавливалась на выбранный траверс с исследуемым контактным выступом. Размер световой метки и, соответственно, лазерного пятна определялся диафрагмой 20×20 мкм. Световая метка определяла локальную область, подвергаемую воздействию зондирующего лазерного излучения. Сканирование исследуемого участка осуществлялось программно за счет двухкоординатного перемещения прецизионного координатного стола. Дискретность перемещения — 0,5 мкм в пределах рабочего поля размером 128×128 мкм. Прием и обработка фотоакустических сигналов осуществлялись блоком пьезопреобразователя объемных волн с широкополосным усилителем, размещенным на координатном столе. Накопление и регистрация видеоинформации осуществлялись устройством накопления, обработки и отображения информации с цветным ВКУ ВК51Ц61, сопряженным с компьютером. При сканировании объекта на экране ВКУ регистрировалось 16-градационное цветовое кодированное изображение исследуемой зоны с увеличением 2500×.

На лазерных фотоакустических топограммах (рис. 8) зоны сварки золотой проволоки и золотой подложки зарегистрированы темно-синим цветом, что свидетельствует о качественных соединениях свариваемых материалов.

### Закключение

На основании проведенных исследований определены оптимальные области применения контактной односторонней сварки расщепленным электродом. Для получения соединений проволоочных проводников с тонкопленочными элементами толщиной более 2 мкм возможно применение любого из рассмотренных способов сварки. При получении соединений с элементами толщиной менее 2 мкм более эффективен способ сварки с импульсным нагревом инструмента, так как он обеспечивает более высокую воспроизводимость и прочность соединений из-за близости параметров к термокомпрессионной сварке проводников малого сечения.



**Рис. 8.** Внешний вид и соответствующие лазерные фотоакустические топограммы контактных микросварных соединений:

а) деформация 70%;

б) деформация 60%.

Ω — зоны омического контакта

Сварку проводников с низкой пластичностью нужно осуществлять способом контактной сварки. Однако следует учесть, что при контактной сварке возникает опасность повреждения элемента (транзистора, диода) импульсом сварочного напряжения. Поэтому присоединение выводов активных элементов рекомендуется производить способом сварки электродом с косвенным импульсным нагревом. Способ контактной сварки расщепленным электродом реализуется в устройствах контактной микросварки:

- для проволок в диапазоне диаметров 0,025–100 мкм и лент сечением 25–100 мкм × 200 мкм — одноточечным присоединением электродом ЭК 2;
- для лент сечением 25–100 мкм × 200–400 мкм — многоточечным присоединением электродом ЭК 1.

### Литература

1. Онегин Е. Е., Зенькович В. А., Битно Л. Г. Автоматическая сборка ИС. Минск: Выш. школа, 1990.
2. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 6.
3. Ланин В. Л., Петухов И. Б., Шевцов В. В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // Компоненты и технологии. 2009. № 8.