

УДК 621.3.049.76:544.034.23

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ТЕРМОКОМПРЕССИОННОЕ СРАЩИВАНИЕ МЕДИ

Елизавета Юрьевна Березина, Михаил Михайлович Андроник

⁽¹⁾Студент 6 курса, ⁽²⁾магистр 1 года,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Ю.С. Боброва,
ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении».

Важными характеристиками электронных изделий являются рабочая частота и рабочий интервал температур. Данные характеристики лимитируются методами монтажа кристалла, так как сам кристалл изготовлен из материалов, согласованных по коэффициенту термического расширения и имеющих высокую температуру плавления. Обычно для монтажа кристаллов используют припойные соединения как на уровне монтажа кристалла в корпус, так и на уровне монтажа корпуса на подложку. Необходимость в корпусе возникает из соображения защиты активного элемента от внешних воздействий и увеличения контактных площадок для легкого монтажа на коммутационную плату.

Рассмотрим развитие способов монтажа. На рисунке 1 изображена эволюция методов монтажа активных элементов на плату. Видно, что с каждым новым этапом увеличивается количество выводов: в начале они располагаются только по периферии корпуса, а в конце - по всей монтируемой поверхности элемента. Также можно заметить уменьшение площади, занимаемой корпусом при монтаже элемента, вплоть до полного его исключения (в случае с монтажом бескорпусных элементов). Такой метод монтажа избавляет кристалл от корпуса, но лишает кристалл защиты от внешних повреждений и удобства монтажа, возникают большие сложности с заменой монтируемого элемента.

Следующий этап представляет собой технологический скачок, состоящий в том, что можно соединять кристаллы между собой и монтировать их в корпус. Данный метод относится к 3D монтажу. Его преимущество состоит в уменьшении потерь сигнала и повышении скорости его передачи. Но главным преимуществом данного метода является соединение активных элементов между собой без использования других элементов.

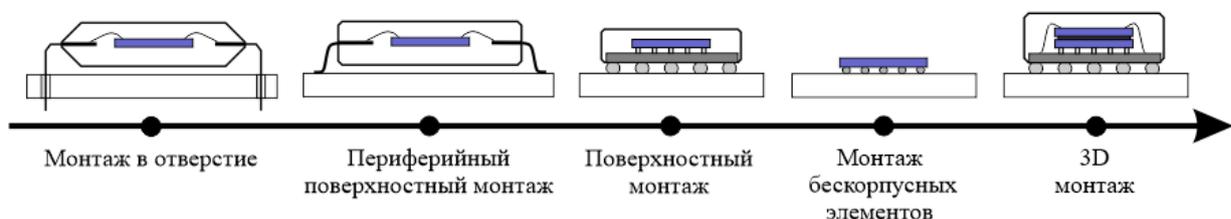


Рис. 1. Эволюция способов монтажа на коммутационной плате

Рассмотрим методы, при помощи которых можно получать такие пакеты для 3D монтажа. Существуют два главных способа соединения кристаллов: разварка проволокой и перевернутый кристалл (Flip Chip, далее FC). На рисунке 2 показаны схематические изображения метода разварки и FC.



Рис. 2. Схематическое изображение метода: а) Проволочная разварка, б) Flip Chip

Обратим внимание на то, что в каждом случае на контактных площадках присутствует слой финишного покрытия. Он необходим для повышения адгезии выводов кристалла к контактным площадкам коммутационной платы, а следовательно для повышения надежности соединения.

Разварка проволокой имеет ограничения по производительности, по количеству выводов (могут располагаться только по периметру кристалла) и рабочей частоте. При разварке используют длинную проволоку, которая является источником индуктивности и перекрестных помех. Данный факт делает классический метод разварки непригодным для частот свыше 4 ГГц [1]. Минимальная толщина проволоки составляет 20 мкм [2], что позволяет уменьшать расстояние между контактными площадками только до 50 мкм.

Под монтажом кристаллов активной стороной вниз понимается метод перевернутого кристалла. Сам метод монтажа полностью подходит для СВЧ монтажа. При FC монтаже потери сигнала достигают 0,1 дБ на соединение, в отличие от любого из методов разварки. Также такой метод монтажа допустим для частот до 100 ГГц [1]. Он разрешает позиционирование с погрешностью в половину контактной площадки, при котором происходит самопозиционирование за счет поверхностных сил при расплаве припоя.

FC является способом монтажа кристаллов лицом вниз (Активной Интегральной Схемой, далее ИС) к подложке. FC технология была изобретена в IBM в 1961 году. Это разработка позволила IBM быть лидером в производстве высокопроизводительных схем. Так как данный способ монтажа был дорогим, его применение не было широким. IBM держала в секрете эту технологию до середины 90-х. Первоначальное название - C4 ("controlled collapse chip connection": контролируемое на отказ соединение кристалла). Концепция, использующая медные шарики с припойным покрытием для формирования соединений, где высокопроводящий припой плавится через трафарет из молибдена, стала важнейшей технологии на протяжении десятилетий [3].

Существуют различные способы изготовления выводов для метода FC:

1. Осаждение

Изначально способ был задуман для технологии C4 компанией IBM в 1964 году. Но появление кремниевых пластин диаметром 300 мм заставило искать другие способы получения выводов.

2. Гальванопокрытие

Впервые разработано Hitachi 1981. Такой способ позволяет получать неравномерность толщины выводов ниже 5%. Для уменьшения неравномерности часто используются мнимые шарики (dummy bumps). По таблице 1 можно подобрать необходимый материал шариков в зависимости от потребностей.

Таблица 1. Припой для FC метода [3]

Припой	T _{пл} (°C)	Рекомендации
63Pb37Sn	183	Эвтектический сплав, маленькая температура плавления. Запрещен директивой RoHS.
95Pb5Sn	315	Высокие электрические и термомеханические характеристики.
96,5Sn3,5Ag	221	Ходовой припой для FC монтажа.
97Sn3Cu	227	Сложно гальванически осаждается.

95,5Sn3,9Ag0,6Cu	218	Ходовая припойная паста для FC.
80Au20Sn	280	Для монтажа оптоэлектроники, маленькие отклонения высот шариков.
In	157	Идеально для чувствительных к температуре устройств.
Sn	232	Опасность к вискеризации.

3. Шарика от золотой проволоки разварки.

Технология для лабораторных испытаний или единичных производств.

4. Медные столбики.

Метод новый, перспективный для кристаллов с малым шагом и большой плотностью вводов/выводов. Медные столбики используются как с осаждением тонкого слоя припоя на вершине столбика, так и без. Соединение столбиков с контактными площадками происходит при помощи термокомпрессионного срачивания.

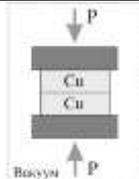
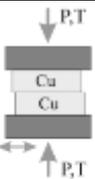
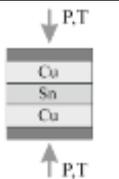
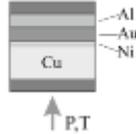
При помощи 3D технологии компенсирования достигается высокая плотность вводов/выводов кристалла. Такая технология позволяет монтировать тонкие ИС толщиной 10 – 50 мкм с шагом контактных площадок меньше 20 мкм. Традиционные шарики припоя высотой 50 – 100 мкм в данной технологии не используются. Для таких шагов используются столбики меди. Так как топологические размеры уменьшаются, повышается число транзисторов на кристалле, что повышает потребность к увеличению количества вводов/выводов, и к уменьшению шага между ними.

Для соединения двух кристаллов между собой возможны два способа, с использованием TSV и без (разварка особым образом). Более перспективным является TSV метод. Существуют три типа стекирования по TSV технологии (таблица 2): кристалл на кристалл, кристалл на подложку и подложка на подложку.

<u>Кристалл – Кристалл</u>	<u>Кристалл – Подложка</u>	<u>Подложка - Подложка</u>
<ul style="list-style-type: none"> - Малая производительность; - Использование стандартных методов соединения контактов; - Высокий выход годных при использования заведомо исправных кристаллов KGD. 	<ul style="list-style-type: none"> - Могут быть использованы кристаллы разных размеров; - Все кристаллы могут быть проверены на исправность. 	<ul style="list-style-type: none"> - Большая производительность; - Размеры кристаллов должны совпадать; - Большие требования по совмещению подложек.

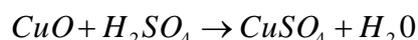
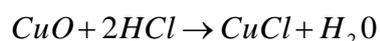
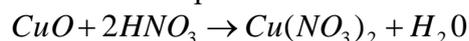
Соединение по TSV технологии состоит из трех основных процессов: формирования отверстий (переходы), заполнение переходов и срачивание. Формирование отверстий можно осуществить лазерным сверлением, ионным травлением или другими методами изотропного или анизотропного травления. По типу формирования отверстия различают формирование на этапе FEOL и BEOL (до и после формирования элементов кристалла). Процесс заполнения переходов включает в себя пассивацию стенок и заполнение пустот проводящим материалом. Медь имеет отличные проводящие свойства, но не согласована по КТР с кремнием. Поэтому в качестве проводника можно использовать молибден или вольфрам. Другое решение проблемы заключается в неполном заполнении отверстий. Заполнение отверстий состоит из двух этапов: вакуумное осаждение тонкого слоя металла и гальваническое доращивание слоя до полного или частичного заполнения. Неполное заполнение повышает сопротивление канала. В таблице 2 проанализированы основные способы соединения медных контактов[4].

Таблица 2. Методы сращивания медных контактов [3,5,6,7]

Метод	Сращивание медных контактов					
	Термокомпрессионное сращивание меди			Другие методы		
	Термокомпрессионное сращивание меди	Поверхностное активирование ионной (Ar) очисткой	Микротрение	Электрохимическое восстановление меди	Эвтектическое соединение	Гальванические покрытия
Схема						
Нагрев	300 – 450°C	-	220°C	-	240 – 280°C	200°C
Время	30 – 60 мин	30 с	30 мин	-	10 с	200 мс
Р, МПа	0,4	10	1,25	-	0,6	100
Отжиг в среде азота	350 °С (60 мин)	-	Не указано	180°C (60 мин)	200°C (20 мин)	-
σ, МПа	70	6,5	Не указано	165	Не указано	Не указано

Так как механизм термокомпрессионного сращивания базируется на диффузии, оксидный слой меди препятствует получению хороших соединений при низких температурах [1]. При температурах 300 – 450°C оксидный слой легко разрушается и возможно осуществление сращивания. Так как в большинстве случаев выдержка на воздухе между процессами нанесения и сращивания неизбежна, то на поверхности появляется оксидная пленка. В течение 48 часов при нормальных условиях было выявлено формирование двухслойной пленки: внешний слой из CuO толщиной 1,3 нм и внутренний слой из Cu₂O толщиной 2,0 нм [8]. Следовательно, данную оксидную пленку необходимо удалять. Другая проблема заключается в возникновении пустот. Пустоты могут возникать от загрязнений на поверхности: естественные оксиды, шероховатость и другие загрязнения. Еще одним источником пустот могут быть незаполненные медью пространства у подложки после процесса осаждения [9]. Большая шероховатость поверхности медных столбиков также является источником возникновения пустот. Необходимо проводить химико-механическую обработку для получения нужной шероховатости. С течением времени сращивания зерно меди растет, возникает подвижность пустот, образуются дислокации. Также первоначальные пустоты являются центрами роста других. Так как повышенная температура увеличивает вероятность появления пустот, сращивание целесообразно проводить при низкой температуре.

Для осуществления низкотемпературного сращивания одним из главных факторов является удаление оксидного слоя меди. Оксид меди хорошо растворяется в неорганических кислотах, например, азотной, соляной или серной:

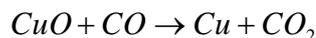
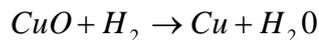


Может растворяться и в слабых органических кислотах, таких как лимонная:

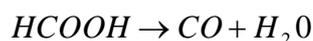
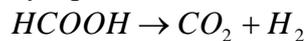


Согласно источнику [10] все неорганические кислоты растворяют слой из CuO за 14 минут при концентрации 0,5 М, при температуре 25°C, а лимонной кислоте необходимо 2 часа при температуре 80°C для полного растворения слоя из оксида меди. Но при растворении остаются

продукты реакции, которые нужно отвести из зоны контакта. Оксид меди можно восстановить в среде газов H_2 и CO , по реакциям:



Для удаления оксидного слоя целесообразно использовать муравьиную кислоту. При использовании Pt или Rh катализатора муравьиная кислота ($HCOOH$) разлагается почти полностью. Разложение происходит по двум реакциям:



Согласно источнику [11] максимальная десорбция H_2 происходит при температурах 270-280 К и 450-475 К, CO_2 также имеет максимум десорбции при температурах 450-475 К.

Экспериментальная часть

Согласно теоретическим данным были получены начальные рекомендации для осуществления термокомпрессионного сращивания при низких температурах, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Рекомендации для осуществления термокомпрессионного сращивания

Критерий	Требования
Подготовка поверхности	Малая шероховатость. Удаление оксидного медного слоя в муравьиной кислоте.
Температура	Максимум десорбции водорода и оксида углерода (II) наблюдается при 170-200°C.
Давление	С увеличением давления процесс диффузии проходит лучше, но есть ограничение, связанное с материалом основания. Типовая величина давления для стандартного процесса термокомпрессионного сращивания 4 бар.
Геометрия выводов	Топология с меньшим размером будет лучше сращиваться, так как с уменьшением площади напряжения возрастает.
Длительность	Обычно процесс термокомпрессионного сращивания проходит за 30-60 мин. При данных температурах (170-200 С) для обеспечения процесса диффузии и роста зерен меди предлагается увеличить время сращивания до нескольких часов.

Оборудование

Эксперименты по термокомпрессионному сращиванию проводились на лабораторном прессе для производства многослойных печатных плат RMP-210 (Bungard), внешний вид которого представлен на рисунке 3.



Рис.3. Лабораторный пресс для производства многослойных печатных плат RMP-210 (Bungard)

Данное оборудование подходит для проведения экспериментов, так как способно создавать необходимое давление при прессовании и необходимую температуру проведения процесса. Технические характеристики пресса приведены в статье [12].

Получение нижних и верхних заготовок

Заготовки нижних плат представляют собой фольгированный стеклотекстолит, толщиной 1,5 мкм, с дополнительным меднением. Топология на нижних платах не формируется.

Заготовки верхних плат тоже представляют собой фольгированный стеклотекстолит, толщиной 1,5 мкм. На каждой из заготовок сформирована топология с выводами, причем двумя разными способами:

1. При помощи травления

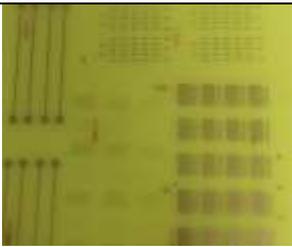
В данном случае фольгированный стеклотекстолит металлизировался. Далее с помощью фотолитографии была сформирована топология, которая впоследствии была вытравлена. Все, что было закрыто фоторезистом и стало топологией выводов.

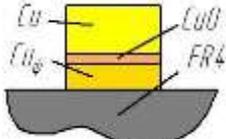
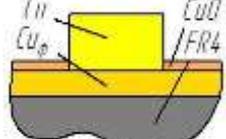
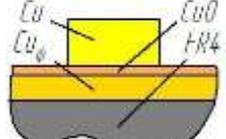
2. При помощи металлизации

В данном случае сначала с помощью фотолитографии была получена топология, которая металлизировалась и после снятия фоторезиста представляла собой топологию выводов.

Эксперименты были проведены с 3-мя заготовками, которые отличаются между собой не только способами формирования топологии, но и самой топологией. В таблице 4 представлена основная информация по получившимся заготовкам.

Таблица 4. Заготовки

Номер заготовки (верхней платы)	1	2	3
Внешний вид заготовки			
Способ формирования топологии	При помощи травления	При помощи металлизации	При помощи металлизации

<p>Последовательность операций</p>	<p>Шлифование Промывка под водой Промывка в очистителе (7 мин, 65-70°C) Промывка под водой Металлизация (1,5 часа, ток 16А, S=11дм²) Промывка под водой Нанесение фоторезиста Экспонирование (25 сек) Проявление Промывка под водой Травление Промывка под водой Снятие фоторезиста Промывка под водой Сушка</p>	<p>Шлифование Промывка под водой Промывка в очистителе (7 мин, 65-70°C) Промывка под водой Нанесение фоторезиста Экспонирование (25 сек) Проявление Промывка под водой Подтравливание Промывка под водой Металлизация (45 мин, ток 10А) Промывка под водой Снятие фоторезиста Промывка под водой Сушка</p>	<p>Шлифование Промывка под водой Промывка в очистителе (7 мин, 65-70°C) Промывка под водой Нанесение фоторезиста Экспонирование (25 сек) Проявление Промывка под водой Металлизация Промывка под водой Снятие фоторезиста Промывка под водой Сушка в печи (1 час, 80-85°C)</p>
<p>Профиль вывода</p>			

Эксперименты:

Эксперимент 1

Данный эксперимент проводился с первой заготовкой (верхней платой) по следующему плану:

- Предварительный нагрев плат до 90°C отдельно от плит пресса;
- Предварительный нагрев плит пресса до 100°C;
- Очистка поверхности плат от оксидной пленки CuO с помощью муравьиной кислоты HCOOH;
- Давление прессования 4 бар;
- Температура проведения процесса 176°C;
- Длительность проведения процесса 6 часов.

В результате низкотемпературное термокомпрессионное сращивание не получилось. Платы соединились вместе из-за того, что "потек" стеклотекстолит. Ни один элемент топологии не сросся с нижней платой, так как после плавления стеклотекстолита прижим плат друг к другу стал неравномерным (осуществлялся только по краям платы). Внешний вид верхней платы после эксперимента представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Внешний вид платы после проведения эксперимента

Темные разводы представляют собой остатки муравьиной кислоты после ее реакции со стеклотекстолитом.

По результатам проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- Температуру проведения процесса необходимо уменьшить;
- Время проведения процесса необходимо уменьшить;
- Заготовки, на которых топология сформирована при помощи металлизации, подходят лучше (стеклотекстолит покрыт медью).

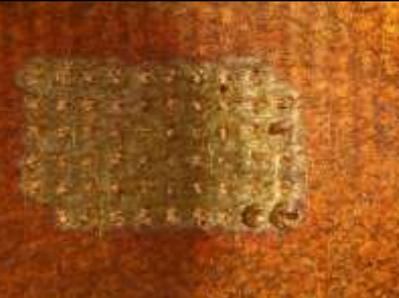
Эксперимент 2

Данный эксперимент проводился со второй заготовкой (верхней платой) по следующему плану:

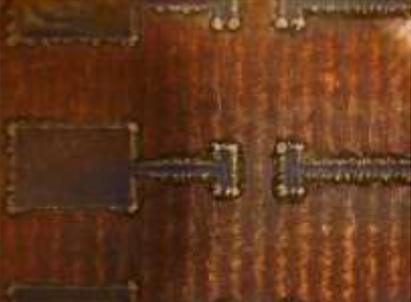
- Предварительный нагрев плат до 90°C отдельно от плит пресса;
- Предварительный нагрев плит пресса до 90°C;
- Очистка поверхности плат от оксидной пленки CuO с помощью муравьиной кислоты HCOOH;
- Давление прессования 4 бар;
- Температура проведения процесса 170°C;
- Длительность проведения процесса 4 часа.

После проведения эксперимента был достигнут требуемый результат с топологией, имеющей наименьшие размеры (точки). Результаты эксперимента представлены в таблице 5. В комментариях указано, сколько контактов срослось с поверхностью нижней платы. Поверхности получившихся плат были обработаны в 10% водном растворе H₂SO₄ для снятия оксидной пленки после проведения эксперимента.

Таблица 5. Результаты эксперимента 2

	Плата 1(с топологией 100 мкм)	Плата 2	Комментарий
1			1
2			6
3			3

4			5
5			7
6			3
7			12
8			5
9			0

10			1
11			По периметру топологии

При проведении металлизации (топология металлизировалась в проявленном фоторезисте) концентраторы напряжений (углы и ребра) зарастали быстрее, поэтому на углах и ребрах образовались медные наросты. В процессе эксперимента эти наросты сращивались.

По результатам проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- Чем меньше размеры топологии, тем лучше будет происходить процесс сращивания;
- Топология не должна иметь замкнутые контуры (необходимо обеспечить выход продуктов разложения муравьиной кислоты).

Эксперимент 3

Данный эксперимент проводился с третьей заготовкой (верхней платой). Фотошаблон для топологии был составлен полностью из круглых контактных площадок (точек).

Интересно проверить, как влияют на сращивание следующие 2 фактора:

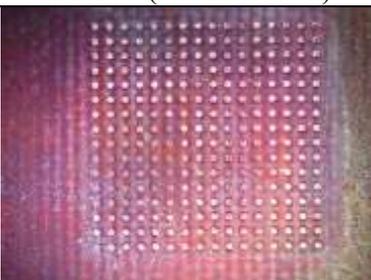
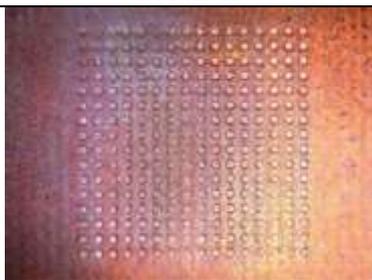
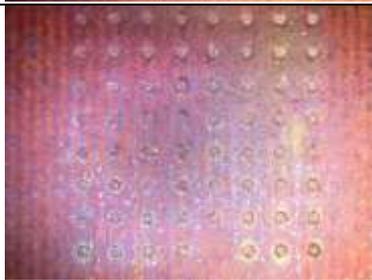
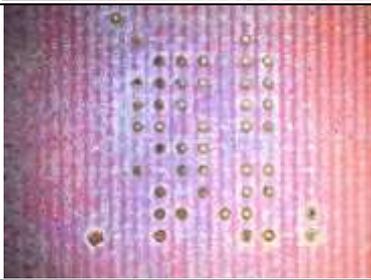
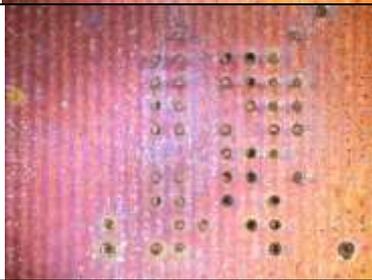
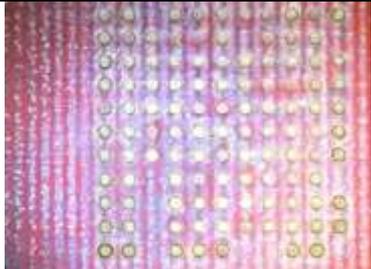
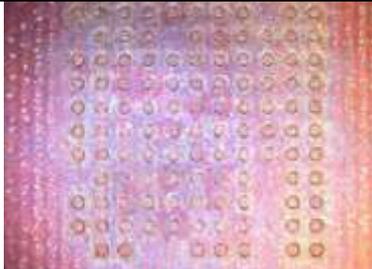
- Диаметр контактных площадок;
- Интервал между двух площадками (плотность расположения).

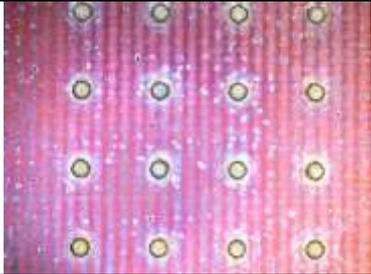
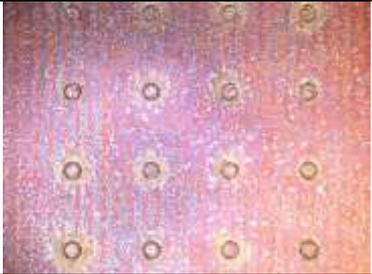
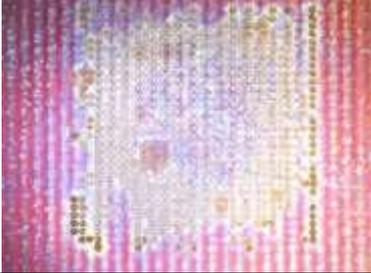
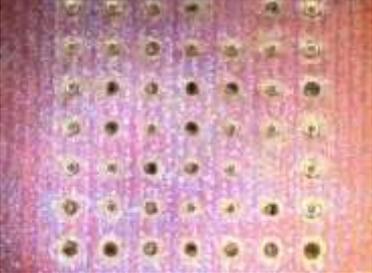
Эксперимент проводился по следующему плану:

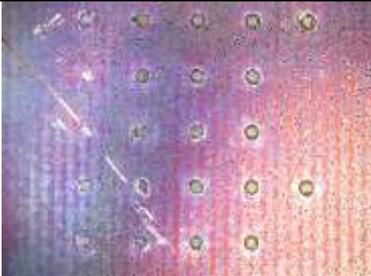
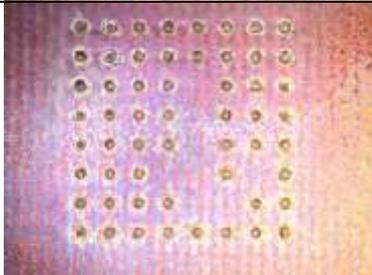
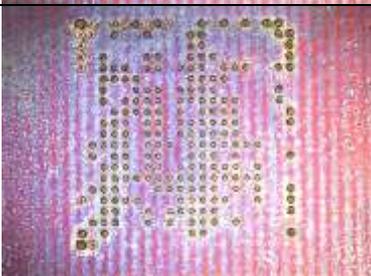
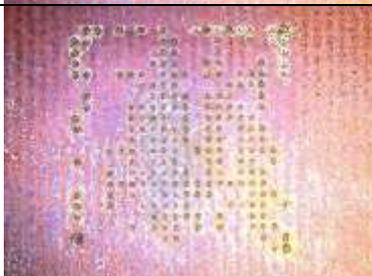
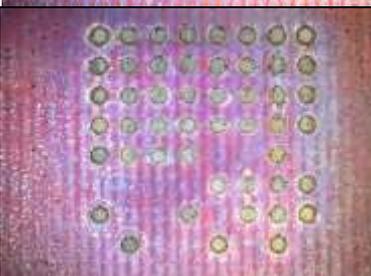
- Предварительный нагрев плат до 90°C отдельно от плит прессы;
- Предварительный нагрев плит прессы до 90°C;
- Очистка поверхности плат от оксидной пленки CuO с помощью муравьиной кислоты HCOOH;
- Давление прессования 2,5 бар;
- Температура проведения процесса 170°C;
- Длительность проведения процесса 4 часа.

После проведения эксперимента был достигнут требуемый результат, в основном сращивание наблюдалось по периметру точек. Результаты эксперимента представлены в таблице 6. В комментариях указано, сколько контактов срослось с поверхностью нижней платы.

Таблица 6. Результаты эксперимента 3

1	Плата 1 (с топологией)	Плата 2	Комментарий
1			0
2			0
3			0
4			1 и несколько по периметру контакта
5			11 по периметру контакта
6			Все по периметру контакта

7			Все по периметру контакта
8			>50
9			Все по периметру контакта
10			>50
11			Все по периметру контакта
12			Все по периметру контакта

13			0
14			Все по периметру контакта
15			Все (около 10 по периметру контакта)
16			20 по периметру контакта

По результатам проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- Чем меньше диаметр контактных площадок, тем лучше происходит процесс термокомпрессионного срачивания.
- Плотность расположения контактных площадок не влияет на срачивание (за исключением слишком плотного расположения контактов друг к другу).

Заключение

В данной работе была доказана актуальность стекирования по TSV технологии и был проведен ряд экспериментов. В ходе экспериментов было выявлено следующее:

- Чистота стекируемых поверхностей и её поддержание во время процесса играет большую роль для получения качественных соединений. Данный процесс должен проводиться в вакуумной среде или в среде инертных газов.
- Чем меньше размеры топологии, тем лучше будет происходить процесс срачивания;
- Топология не должна иметь замкнутые контуры.

Литература

1. *KyangK., FranklinK., SeanS.C.*, RF and microelectronics packaging. New York: Springer, 2010. 295p.

2. *Harman G.* Wire Bonding in microelectronics. Third edition. New York: McGraw Hill, 2010. 448p.
3. *Tong H.M., Lai Y.S., Wong. C.P.* Advanced Flip Chip Packaging. New York: Springer, 2013. 562p.
4. *Rao R. Tumala,* Introduction to System –on – package. 2008.807 с.
5. *Dragoi V., Pabo E.,* Wafer bonding for MEMS and CMOS integration, *MicrosystTechnol*, 2012.
6. *Flötgen C., et al,* Wafer bonding using Cu–Sn intermetallic bonding layers, *MicrosystTechnol*, 2013.
7. *Daily R.,* Microscrubbing: an Alternative Method for 3D Thermocompression Bonding Cu-Cu Bumps and High Bump Density devices with Low Force, Time and Temperature, *Electronic Components & Technology Conference*, 2013.
8. *P. Keil, D. Lützenkirchen-Hecht, R. Frahm,* Investigation of Room Temperature Oxidation of Cu in Air, *Bergische Universität Wuppertal, Germany*, 2007.
9. *S.T Chuan., A. Chandrakasan, R. Reif,* Progress in copper-based wafer bonding, MIT, Cambridge, 2010.
10. *N. Habbache, N. Alane, S. Djerad, L. Tifouti,* Leaching of copper oxide with different acid solutions, *Chemical Engineering Journal* 152, 2009.
11. *M.R. Columbia, P.A. Thiel,* The interaction of formic acid with transition metal surfaces, studied in ultrahigh vacuum, *IOWA State University*, 1993.
12. *Тахаутдинов Р.Ш.* Многослойные печатные платы. Первые шаги в освоении операции прессования // Технологии в электронной промышленности. 2010. №3. С.28–31.