

Д. т. н. З. Ю. ГОТРА, Д. Т. ДЯЧОК

Украина, НУ «Львовская политехника»,

Львовский научно-исследовательский радиотехнический институт
E-mail: smerklo@lreri.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
30.12.2008 г.

Оппонент к. т. н. В. П. ПОПОВ
(НИИ микроприборов, г. Киев)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА СОЕДИНЕНИЯ СТОЛБИКОВЫХ ВЫВОДОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Представлены методика и результаты определения электрического сопротивления составных частей жесткого столбикового вывода для разных способов соединения.

Микроконтактные соединения (МКС) принадлежат к ответственным элементам конструкции интегральной схемы, поскольку от них зависит наличие электрической (сигнальной) связи между микросхемой и внешними цепями. При увеличении степени интеграции ИС количество МКС значительно увеличивается. В [1] предполагается, что для аппаратуры категории Harsh (РЭА повышенной стойкости или специального применения) в период 2006—2010 гг. максимальное число выводов корпусов увеличится с 408 до 642, а площадь кристалла возрастет со 100 до 150 мм². Для вычислительной техники число выводов корпусов микросхем возрастает до нескольких тысяч. Значительное увеличение количества МКС приводит к увеличению их общего электрического сопротивления и к удлинению пути прохождения сигналов, что, в свою очередь, вызывает задержку сигналов и увеличивает потери электрической энергии. Поэтому анализ составляющих электрического сопротивления и количественное определение их вклада в суммарное сопротивление микроконтактного узла интегральной схемы является актуальной задачей.

Столбиковые (шариковые) выводы применяются в современных ИС при монтаже бескорпусных полупроводниковых элементов, а также элементов в различных корпусах типа Intel® Stacked-CSP, BGA и др. [2, 3]. В настоящее время для монтажа большинства микросхем с перевернутым кристаллом используют сферические капли припоя, которые компенсируют механические напряжения, вызываемые тепловым или механическим воздействием на кристалл, а также золотые столбиковые выводы, сформированные гальваническим методом. При этом контакт с площадкой подложки ГИС обеспечивается ультразвуковым или термокомпрессионным способом и с помощью электропроводящего клея [4]. Реже применяются конструкции жесткого микроконтактного соединения (ЖМКС) с медным, алюминиевым и др. выводом, который может быть различной формы — шара, цилиндра, трапеции и пр. Соединение на основе жестких выводов характеризуется электрическим сопро-

тивлением, уровнем шумов, прочностью соединения. Главным требованием, предъявляемым к ЖМКС, является создание надежного контакта соединяемых элементов (т. е. контактных площадок кристалла и подложки ГИС) при обеспечении низкого электрического сопротивления всего соединения. Таким образом, электрическое сопротивление входит в число важнейших параметров ЖМКС.

Микроконтактное соединение или контактный узел гибридной интегральной схемы состоит, как правило, из двух металлических пленок, например контактных площадок кристалла и подложки, и промежуточного звена, присоединяющего прибор к внешним цепям [5, с. 38]. Такая конструкция ЖМКС, предложенная в [6], показана на рис. 1. Промежуточным звеном здесь служит столбиковый вывод. Для исследования выбрана прямоугольная форма вывода, поскольку в этом случае математические выражения, описывающие общее электрическое сопротивление ЖМКС, удобно выводить аналитическим путем.

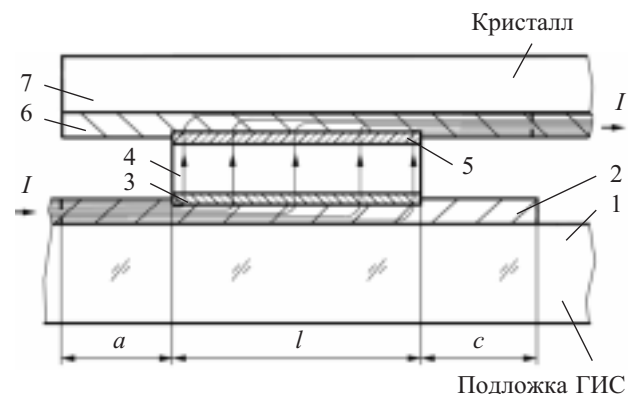


Рис. 1. Модель жесткого контактного соединения:
a — длина предвыводной части контактной площадки; l — длина подвыводной части; c — длина послеыводной части (диэлектрические, адгезионные и защитные слои не показаны); I — протекающий сквозь вывод ток

Модель состоит из контактной площадки 2, нанесенной на подложку 1 ГИС, вывода 4, переходной зоны 3 между контактной площадкой ГИС и выводом, контактной площадки 6, нанесенной на полупроводниковый элемент (кристалл) 7, и переходной зоны 5 между выводом и контактной площадкой полупроводникового элемента. В модели принято, что контактная площадка 6 лежит на диэлектрическом

слое, например двуокиси кремния, который на рисунке не показан. Исходя из сказанного, выражение для суммарного контактного сопротивления столбикового вывода запишем в виде

$$R_{\text{кв}} = R_{\text{кпп1}} + R_{\text{пз1}} + R_{\text{в}} + R_{\text{пз2}} + R_{\text{кпк2}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{кпп1}}$ — сопротивление контактной площадки подложки ГИС;
 $R_{\text{пз1}}$ — сопротивление переходной зоны между контактной площадкой подложки и выводом;
 $R_{\text{в}}$ — сопротивление столбика-вывода;
 $R_{\text{пз2}}$ — сопротивление переходной зоны между контактной площадкой кристалла и выводом;
 $R_{\text{кпк2}}$ — сопротивление контактной площадки кристалла.

В данном исследовании размеры контактных площадок кристалла и подложки ГИС приняты одинаковыми. Сопротивление контактной площадки представим в виде суммы двух составляющих (рис. 1):

$$R_{\text{кпл}} = R_{\text{кп1}} + R_{\text{кп2}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{кп1}}$ — сопротивление предвыводной (по направлению тока) части контактной площадки длиной a ;
 $R_{\text{кп2}}$ — сопротивление подвыводной части контактной площадки длиной l .

Экспериментально установлено, что послеыводная часть контактной площадки длиной c не влияет существенно на ее сопротивление.

Составляющая сопротивления $R_{\text{кп1}}$ определяется по формуле

$$R_{\text{кп1}} = \rho_2 a / (bt), \quad (3)$$

где ρ_2 — удельное сопротивление контактной площадки;
 t и b — соответственно толщина и ширина контактной площадки.

Вследствие неравномерности распределения силовых линий тока в подвыводной части контактной площадки расчет составляющей электрического сопротивления $R_{\text{кп2}}$ представляет определенные трудности. Поскольку полупроводниковый кристалл перевернут, и его контактные площадки находятся внутри конструкции, то при измерении сопротивления жестких контактных выводов возникают проблемы, связанные с подсоединением измерительных зондов. Поэтому, чтобы определить сопротивление контактных площадок, а также переходных зон, используем результаты исследования модели нахлесточного микроконтактного соединения проволоки и пленки [7]. Сопротивление контактных площадок одного размера и из одинакового материала при подобии формы и при равенстве площади контактирования как для проволочного, так и для столбикового выводов будут одинаковыми. Методика расчета следующая.

Сопротивление микропроволочного соединения, площадь которого равна площади контакта столбикового вывода, определяется по заданному удельному переходному контактному сопротивлению $\rho_{\text{п}}$ [7] для данной контактной пары по формуле

$$R_{\text{к}} = \frac{r_1^2 + r_2^2}{(r_1 + r_2)\alpha \operatorname{th}(\alpha l)} + \frac{2r_1 r_2}{(r_1 + r_2)\alpha \operatorname{sh}(\alpha l)} + \frac{r_1 r_2 l}{r_1 + r_2}, \quad (4)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{y(r_1 + r_2)}; \quad (5)$$

$$r_1 = \rho_1 / (Bh); \quad (6)$$

$$r_2 = \rho_2 / (bt); \quad (7)$$

$$y = B/\rho_{\text{п}}; \quad (8)$$

$R_{\text{к}}$ — сопротивление микроконтактного соединения проволоки и подвыводной части контактной площадки;

ρ_1 — удельное сопротивление микропроволоки;
 h, B — соответственно толщина и ширина деформированной части проволоки;

y — погонная проводимость условного переходного слоя.

Переходное контактное сопротивление $R_{\text{кп}}$ рассчитывается по формуле [7]

$$R_{\text{кп}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{Bl} = \frac{1}{yl}, \quad (9)$$

где l — длина деформированной части проволоки.

Суммарное сопротивление подвыводной части контактной площадки и деформированной части проволоки определяется по формуле

$$R_{\text{кпл}} = R_{\text{к}} - R_{\text{кп}}. \quad (10)$$

Рассчитывается соотношение погонных сопротивлений r_1 и r_2 . Приняв отношение самих сопротивлений равным отношению r_1/r_2 , из суммарного $R_{\text{кпл}}$ определим сопротивление подвыводной части контактной площадки:

$$R_{\text{кп2}} = R_{\text{кпл}} / (1 + r_1 / r_2). \quad (11)$$

Сопротивление столбикового вывода, который имеет со своей контактной площадкой такую же по величине и форме площадь контактирования, принимаем равным рассчитанному сопротивлению подвыводной части контактной площадки.

Тогда, согласно (2), полное сопротивление контактной площадки

$$R_{\text{кпл}} = \frac{\rho_2 a}{bt} + \frac{R_{\text{кпл}}}{1 + r_1 / r_2}. \quad (12)$$

Для определения сопротивления многослойных контактных площадок используем их приведенные удельные сопротивления. Сопротивление переходных зон между контактной площадкой и выводом при твердофазной сварке определяется по формуле

$$R_{\text{пз}} = \rho_{\text{п}} / F, \quad (13)$$

где F — площадь контактирования, которая равна площади поперечного сечения столбикового вывода.

Сопротивление переходных зон между контактной площадкой и выводом при соединении припоем определяется по формуле

$$R_{\text{пз}} = \rho_{\text{пз}} t_{\text{пз}} / F, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{пз}}$ — удельное сопротивление переходной зоны;
 $t_{\text{пз}}$ — толщина переходной припойной зоны.

При клеевом соединении учтем, что переходную зону 3 (рис. 1) заменит прослойка клея между контактной площадкой подложки и выводом. Сопротивление клеевой прослойки определяется по формуле

$$R_{\text{кк}} = \rho_{\text{к}} t_{\text{кк}} / F, \quad (15)$$

где $\rho_{\text{к}}$ — удельное сопротивление клея;
 $t_{\text{кк}}$ — толщина клеевого слоя.

Таблица 1

Вклад сопротивления составляющих элементов в общее сопротивление сварного ЖМКС

Элементы сварного ЖМКС	I вариант ЖМКС, $R_{\text{КСВ}}=59,4$ мОм		II вариант ЖМКС, $R_{\text{КСВ}}=104,2$ мОм		Примечание
	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	
Контактная площадка ГИС	11,6	11,1	3,1	5,2	ширина площадки 0,2 мм
Переходная зона 3 (рис. 1)	76,0	72,9	39,7	66,9	
Золотой столбик-вывод	0,2	0,2	0,2	0,3	
Переходная зона 5 (рис. 1)	0,2	0,2	0,2	0,3	
Al-Ni-Au-контактная площадка кристалла	16,2	15,6	16,2	27,3	ширина площадки 0,2 мм

Сопротивление столбика-вывода определяется по формуле

$$R_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} h_1 / F, \quad (16)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — удельное сопротивление вывода;
 h_1 — высота вывода.

Размеры столбиковых выводов могут быть различными — от десятков до нескольких сотен микрометров. В исследовании было принято $h=0,1$ мм и $F=1 \cdot 10^{-2}$ мм². Удельное переходное контактное сопротивление $\rho_{\text{п}}$ сварного соединения контактной площадки ГИС из полированного слоя пасты 3713 и Аупроволоки (первый вариант соединения) равно $3,97 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², а Al-контактной площадки и Аупроволоки (второй вариант) — $7,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Будем считать, что толщина зон взаимопроникновения материала вывода и пленочных проводников значительно меньше толщины самих проводников. В табл. 1 приведены результаты расчета входящих в формулу (1) составляющих для двух вариантов сварного ЖМКС.

Как видно из табл. 1, при соединении твердофазной сваркой разнородных материалов, наибольшее влияние на сопротивление ЖМКС оказывает сопротивление переходной сварной зоны между столбиком-выводом и контактной площадкой ГИС, а также сопротивление контактных площадок. Сопротивление же самого золотого столбика-вывода сравнительно незначительно, поэтому некоторое изменение формы вывода по высоте, которое встречается на практике, будет мало влиять на общее сопротивление ЖМКС. Переходное сопротивление гальванически осажденного вывода в зоне 5 (рис. 1) также незначительно. На рис. 2 показаны рассчитанные по формулам (3),

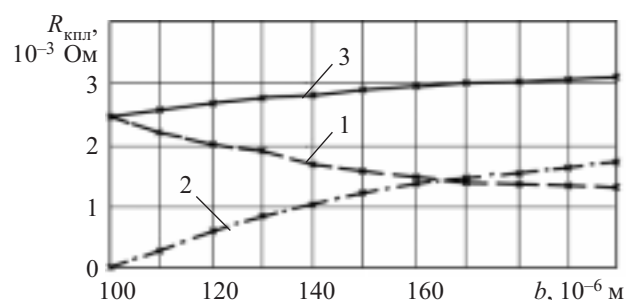


Рис. 2. Зависимость сопротивления контактной площадки из пасты 3713 от ее размера при толщине 8 мкм для сварного МКС:

1 — сопротивление предвыводной части контактной площадки $R_{\text{кп1}}$; 2 — сопротивление подвыводной части контактной площадки $R_{\text{кп2}}$; 3 — суммарное сопротивление контактной площадки $R_{\text{кпл}}$

(11) и (12) зависимости сопротивления полированной контактной площадки ГИС из пасты 3713 от ее размера для золотого столбикового вывода с поперечным сечением $0,1 \times 0,1$ мм.

Результаты определения сопротивления припойного ЖМКС сведены в табл. 2. Поскольку припойный вывод полностью заполняет контактную площадку, составляющая сопротивления $R_{\text{кп1}}$ в данном случае отсутствует, и сопротивление контактной площадки полностью определяется составляющей $R_{\text{кп2}}$. В расчете принято, что удельное сопротивление переходных зон 3 и 5 (рис. 1) равно $1,12$ мОм·м, а их толщина — $0,2$ мкм. Из табл. 2 видно, что наибольший вклад в общее сопротивление припойного ЖМКС вносят контактные площадки.

При использовании клеевого соединения столбиковые выводы на полупроводниковом элементе фор-

Таблица 2

Вклад сопротивления элементов припойного ЖМКС в общее сопротивление, равное $18,95$ мОм

Элементы припойного ЖМКС	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	Примечание
Контактная площадка ГИС	5,8	30,60	Ширина площадки 0,2 мм
Переходная зона 3 (рис. 1)	0,006	0,03	
Припойный столбик-вывод	0,64	3,38	
Переходная зона 5 (рис. 1)	0,006	0,03	
Контактная площадка кристалла	12,5	65,96	Ширина площадки 0,2 мм

Вклад сопротивления составных элементов клеевого ЖМКС в общее сопротивление

Элементы клеевого ЖМКС	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	Примечание
Контактная площадка ГИС	3,1	6,2...14,0	Ширина площадки 0,2 мм
Клеевой слой (вместо зоны 3, рис. 1)	2,5 ...30,0	11,2...60,4	
Золотой столбик-вывод	0,2	0,4...0,9	
Переходная зона 5 (рис. 1)	0,2	0,4...0,9	
Контактная площадка кристалла	16,2	32,6...73,0	Ширина площадки 0,2 мм
Суммарное сопротивление клеевого ЖМКС	22,2...49,7	100	

мируют с помощью термокомпрессии и ультразвука [8] и гальваническим методом [4]. Рассчитанное сопротивление ЖМКС для сформированного гальваническим методом золотого столбикового вывода на алюминиевой контактной площадке (с промежуточным никелевым и защитным золотым слоем) элемента и его клеевого соединения с контактной площадкой подложки ГИС из пасты 3713 приведены в табл. 3. В расчете принято, что толщина клеевой прослойки 5—60 мкм, а ее удельное сопротивление — $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Для уменьшения сопротивления клеевого ЖМКС необходимо, по возможности, уменьшать размер контактной площадки в направлении протекания тока или увеличивать ее толщину, применять клеи с возможно меньшим удельным сопротивлением, а также уменьшать толщину клеевой прослойки.

Рассчитанные значения сопротивления столбиковых выводов согласуются с данными [4] для случаев припойного оплавления и приклеивания. Поскольку методика расчета в этой работе не приведена, то предложенная нами методика расчета рекомендована для практического определения сопротивления ЖМКС при проектировании ГИС.

Таким образом, разработаны модель жесткого микроконтактного соединения ГИС и методика определения его сопротивления, в которой учитывается неравномерность распределения тока вдоль контакта и которая обеспечивает определение сопротивления его составных частей. Результаты работы рекомендуется использовать при проектировании полупроводниковых приборов и микросхем со столбиковыми

(шариковыми) выводами для оценки влияния электрического сопротивления микроконтактных узлов и их составных частей на параметры приборов и интегральных схем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грабов А. Стратегия развития технологии металлокерамических корпусов для компонентов высоконадежной РЭА // Chip News Украина. Инженерная микроэлектроника.— 2008.— № 3 (73).— С. 74—77.
2. Мельниченко А. Технология создания массива выводов на кремниевой пластине // Электронные компоненты и системы.— 2006.— № 6.— С. 47—49.
3. Новости технологии.— 10 сентября 2007.— Компания Palomar на выставке SEMICON Taiwan 2007 представит автоматическое выполнение золотых столбиковых выводов / http://www.elinform.ru/news_123.htm.
4. Мельниченко А. Технология миниатюризации электронных устройств // Электронные компоненты и системы.— 2004.— № 1.— С. 43—45.
5. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1981.
6. Дячок Д. Т., Майстришин Р. М. Оцінка електричного опору стовпчикового виводу ІС на його моделі // Тези доп. 11-ї відкр. наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу Інституту ТРЕТ НУ «Львів. політехніка» з проблем електроніки.— 2008.— Львів.— С. 24.
7. Дячок Д. Т., Смеркло Л. М., Незоров В. В. Взаємозв'язок конструктивних параметрів і електричного опору мікроконтактного з'єднання в ІС // Вісник Нац.університету «Львівська політехніка». Сер. Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки.— 2006.— № 569.— С. 12—16.
8. Мельниченко А. Перспективы развития методов сборки микросхем / Электронные компоненты и системы.— 2004.— № 4.— С. 38—41.

НОВЫЕ КНИГИ

Применение высокоскоростных систем / Под ред. Уолта Кестера.— М.: Техносфера, 2009.— 368 с.

В книге рассмотрен метод высокоскоростного преобразования данных. В разделе 1 приведены архитектуры ЦАП и области их применения, а также оценочные комплекты АЦП и средство моделирования ADIsimADC®. Раздел 2 посвящен методам оптимизации интерфейсов преобразователей данных с помощью дифференциальных усилителей, трансформаторов и т. д. В разделе 3 рассмотрены ЦАП, оценочные аппаратные и программные средства ЦАП, программа их разработки и моделирования. В разделе 4 приведены сведения о топологии печатных плат. Подробно описываются программы разработки высокоскоростных систем.

