

К. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, г. Арзамас, НПП "Темп-Авиа"  
E-mail: temp@arzamas.nnov.ru

Дата поступления в редакцию  
16.06 2004 г.

Оппонент С. Н. БАТИЩЕВ  
("Оризон-Навигация", г. Смела)

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСБОРОК

*Рассмотрены некоторые конструктивно-технологические варианты микросборок и перспективы повышения их интеграции, а также особенности применения резистивных материалов в производстве тонкопленочных микросборок.*

Одно из основных противоречий современной микроэлектроники — различие плотности проводников современных сверхбольших интегральных схем (СБИС) (2500 линий/мм) и коммутационных плат (5 линий/мм), что обусловлено технологиями их изготовления. Данное противоречие снижает такие важнейшие параметры микроэлектронной аппаратуры как плотность упаковки, быстродействие, себестоимость.

Отставая от США и Японии по уровню развития субмикронных технологий, в СССР в 1970—1980 гг. интенсивно разрабатывалась технология больших гибридных интегральных схем (БГИС) [1, 2]. В результате эти микроэлектронные устройства функционально превосходили американские и японские СБИС. В конце 1980-х годов стали появляться сообщения об интенсивном развитии во многих странах, прежде всего в США, технологии многокристальных модулей (МКМ) [3, 4], которая по своей сущности основывалась на технологии БГИС.

В настоящее время для изготовления МКМ используются конструкции четырех типов плат [5]:

- МКМ-L — с подложкой из стеклотекстолита;
- МКМ-C — с подложкой из технической керамики (толстопленочные БГИС);
- МКМ-D — тонкопленочные структуры (например, на подложках из ситалла и поликора);
- МКМ-Si — тонкопленочные структуры с подложкой из кремния.

Технология МКМ за рубежом последние десять лет развивалась в очень ускоренном темпе. Если в 1988 г. меньше десятка фирм США занимались разработкой и производством МКМ, то в 1991 г. их количество достигло сотни. Основными потребителями МКМ являются фирмы, создающие компьютеры. Технология МКМ L-типа доминирует в производстве модулей благодаря наличию сравнительно недорогих материалов для их подложек, отработанных процессов и оборудования для монтажа кристаллов. Однако по прогнозам рынок сбыта МКМ будет развиваться в сторону расширения производства модулей D- и Si-типов [5]. Поэтому анализ состояния и перспектив развития тонкопленочных микросборок (МСБ) представляет интерес.

В задачу настоящей работы входит рассмотрение конструктивно-технологических вариантов МСБ, основных российских промышленностей, и перспективы повышения их интеграции. Основные технико-экономические параметры МСБ приведены в табл. 1.

В настоящее время в России получили развитие печатные платы на стеклотекстолите для поверхностного монтажа компонентов. Однако их технические параметры, прежде всего плотность проводников (5 линий/мм), размер контактной площадки переходного отверстия ( $\varnothing 0,7$  мм), а также минимальное расстояние между отверстиями (как правило, не менее толщины платы) препятствуют увеличению интеграции МСБ. Кроме того, низкая теплопроводность стеклотекстолита не позволяет увеличить плотность компоновки и применять данный материал для установок компонентов с большой рассеиваемой мощностью.

Технология полиимидных плат, развивавшаяся высокими темпами в 80-х годах прошлого столетия [1, 2], в настоящее время находит ограниченное при-

Таблица 1

Материал подложки	Плотность проводников, линий/мм		ТКЛР, $10^{-6}$ 1/К	Удельная теплопроводность, Вт/(см·К)	Длина и ширина, мм	Предел прочности, МПа	Удельная цена, руб./см <sup>2</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>
	достигнутая	перспективная						
Стеклотекстолит FR-4	5	10	14	0,02	500×500	300—400	0,1	1,8
Полиимид	5	10	25	0,0015	78×95	—	—	—
Ситалл	5	20	5	0,015	60×48	200—300	1,14	2,5
Поликор	5	20	8	0,3	60×48	320—450	7,98	4
Сапфир	10	500	8	0,47	$\varnothing 76$	700	24,0	4
Кремний	50	500	2,3	1,09	$\varnothing 100$	700	2,4	2,3

менение, а на ряде предприятий произошла замена полиимидных плат на стеклотекстолитовые. Это связано с тем, что полиимидные платы имеют более высокую себестоимость изготовления по сравнению с современными стеклотекстолитовыми платами, которые обеспечивают такую же плотность проводников (табл. 1). Недостатком печатных и полиимидных плат является то, что на них нельзя изготавливать интегральные резисторы. Установка на платы резисторов в мини-корпусах увеличивает себестоимость МСБ, снижает надежность и плотность ее упаковки.

Наибольшая плотность проводников в тонкопленочной МСБ обеспечивается применением алюминия в качестве тонкой пленки проводящего слоя. Результаты исследований, приведенные в [6, 7], позволяют проектировать тонкопленочные элементы на ситалловых и поликорковых подложках со значительно меньшими нормами топологических размеров: 25—50 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров проводников уменьшает выход годных МСБ. Это связано с тем, что данные подложки имеют прямоугольную форму. При нанесении фоторезиста на углах подложек образуется валик, толщина которого может в несколько раз превосходить толщину основного слоя. В результате явления дифракции происходит засветка фоторезиста под элементами фотошаблона, что приводит к уменьшению ширины линий. Кроме того, воспроизводимость проводников и резисторов ухудшается из-за пористости ситалловых и поликорковых подложек.

Применение гребенчатых резисторов [8] значительно расширяет диапазон проектируемых тонкопленочных резисторов (ТПР) на одной подложке. Поэтому с целью существенного повышения интеграции на ситалловых и поликорковых подложках желательным применением резистивных материалов с удельным поверхностным сопротивлением  $10 \text{ кОм}/\square$ . В этом случае диапазон проектируемых ТПР составит  $20 \text{ Ом} \dots 3 \text{ МОм}$ . Так как наиболее употребительными являются ТПР с номинальными сопротивлениями  $100 \text{ Ом} \dots 300 \text{ кОм}$ , то такое решение значительно уменьшит площадь резисторов.

Минимальную ширину проводников с проводящей пленкой из алюминия можно получить на подложках из сапфира и кремния (1—10 мкм). Сапфир и кремний являются монокристаллами, поэтому не обладают пористостью, свойственной ситаллу и поликору. Шероховатость рабочей поверхности сапфира и кремния соответствует 14—15-му классам. Последнее обстоятельство, а также отсутствие пор и валика при нанесении фоторезиста, позволяют получать малую ширину проводников на этих монокристаллах. Получение сапфира сопряжено с большими затратами энергии (температура плавления сапфира составляет 2300 К), и поэтому он является полудрагоценным камнем. Кроме того, сапфир при его механической обработке имеет большие отходы, что и обуславливает его высокую стоимость и, соответственно, ограниченное применение.

Кремний оказался почти идеальным и пока единственным материалом для изготовления СБИС и микропроцессоров, широкое применение которых открыло путь для невиданно быстрого прогресса техники переработки информации. Кремний также является основным материалом микромеханики (технология МЭМС). Как видно из табл. 1, кремний по своим

техническим характеристикам в несколько раз, а то и на порядок, превосходит аналогичные параметры всех остальных материалов, а по стоимости значительно уступает только стеклотекстолиту.

Несмотря на превосходные технико-экономические параметры, тонкопленочные МСБ с подложками из кремния на предприятиях РФ, в отличие от США, практически не применяются. На наш взгляд, это обусловлено следующими основными причинами.

1. В настоящее время перед российскими предприятиями не стоит задача «догнать и перегнать». Ее сменила задача выживания. Как это ни парадоксально, но многие руководители российских предприятий эту задачу решают не путем разработки и внедрения новых технологий, а путем уничтожения имеющихся высоких технологий, в частности технологии тонких пленок.

2. Кремний, несмотря на высокую прочность, является хрупким материалом. В связи с этим необходимо решение задачи обеспечения допустимых деформаций при сборке, испытаниях и эксплуатации МСБ с подложкой из кремния.

3. Традиционно в качестве резистивных материалов в МСБ используются резистивные сплавы, например РС-3710, или керметы, например К-50С. Для их травления применяют сильные травители, в состав которых, как правило, входит плавиковая кислота, которая травит двуокись кремния. Данное обстоятельство ограничивает применение кремниевых подложек в аналоговых МСБ.

При одинаковом уменьшении размеров ТПР его площадь уменьшается пропорционально уменьшению квадрата его размера. Например, при переходе от норм проектирования 200 мкм к 50 мкм площадь ТПР уменьшается в 16 раз, а при переходе к 25 мкм — в 64 раза. В этом случае площадь ТПР практически не оказывает влияния на плотность упаковки МСБ. Поэтому в качестве резистивного материала можно использовать адгезионный подслоя хрома с величиной удельного поверхностного сопротивления  $\rho = 250 \dots 500 \text{ Ом}/\square$ . Такое решение несколько увеличивает площадь ТПР, однако при этом можно значительно снизить себестоимость МСБ за счет исключения напыления резистивного материала, который, как правило, наносится в отдельном технологическом цикле перед напылением проводящего слоя. Кроме того, применение хрома в качестве резистивного материала позволяет изготавливать ТПР на подложках из кремния. (Как известно, хром травится серной или соляной кислотой, к которым устойчива двуокись кремния.) Стабильность сопротивления резистора из пленки хрома практически не уступает стабильности ТПР из резистивных сплавов [1, с. 87—102].

Изложим кратко технологию изготовления резистивных структур из хрома на подложках из кремния.

1. Формирование двуокиси кремния толщиной 1,3—1,7 мкм на поверхности кремниевой пластины.
2. Напыление проводящей структуры с адгезионным подслоем хрома, например Cr—Al, Cr—Cu—Ni, Cr—Cu—Cr.
3. Проведение первой фотолитографии.
4. Формирование проводников и контактных площадок, а также длины резисторов путем травления проводящего слоя до адгезионного подслоя хрома.

5. Проведение второй фотолитографии.  
6. Формирование ширины резисторов путем травления хрома.

7. Формирование защитной изоляции.

Одной из проблем производства МСБ, как в России, так и за рубежом, является недостаток бескорпусных кристаллов (БК). С начала 1990-х годов выпуск новых БК в РФ прекращен. Мало того, снимаются с производства освоенные БК. (Эти процессы характерны и для прибалтийских стран — бывших союзных республик.) Свои новые изделия российские предприятия разрабатывают на основе технологии поверхностного монтажа компонентов (ТПМК) на печатных платах [9]. Однако, как это следует из табл. 1, перспективы развития печатных плат весьма ограничены, и повышение интеграции разрабатываемой микросборочной аппаратуры в этом случае может быть достигнуто только за счет повышения интеграции СБИС.

Для повышения интеграции МСБ можно рекомендовать установку мини-корпусов, предназначенных для поверхностного монтажа, на платы из поликора [2, с. 76] или кремния. В этом случае в качестве проводящей структуры используют Cr—Cu—Cr с толщиной меди 2,5—5 мкм. После формирования защитной изоляции травят хром на контактных площадках, предназначенных для монтажа мини-корпусов. Затем групповым методом производят горячее облуживание контактных площадок. Сборку МСБ проводят методами ТПМК. Такой конструктивно-технологический вариант МСБ позволяет повысить интеграцию по сравнению с монтажом компонентов на печатную плату за счет увеличения плотности проводников и формирования ТПР на подложке. Кроме того, значительно улучшается теплоотвод от компонентов и резисторов.

Для того чтобы оценить плотность упаковки того или иного конструктивно-технологического варианта платы, достаточно рассчитать площадь размещения компонента с одним и тем же количеством выводов на плате по методике, изложенной в [10]. Эта площадь, обеспечивающая требуемую трассировку проводников, определяется выражением

$$S_k = (l + \Delta l)(b + \Delta l), \quad (1)$$

где  $l, b$  — длина и ширина компонента;

$\Delta l$  — увеличение требуемого размера платы относительно размера компонента.

Значение  $\Delta l$  при условии, что ширина проводников равна ширине зазора между ними, имеет аналитическую зависимость вида [10]

$$\Delta l = [(a_0 + a_1 K + a_2 K_c) / (2n)] 2b_n - c_1 h n, \quad (2)$$

где  $a_0, a_1, a_2, c_1$  — статистические коэффициенты;

$K$  — число выводов компонента;

$K_c$  — среднее число выводов, равное сумме выводов всех компонентов, размещенных на плате, деленной на число компонентов;

$n$  — число коммутационных слоев;

$b_n$  — ширина проводника в мм;

$h$  — расстояние между противоположными контактными площадками знакоместа компонента (этот параметр используется для компонентов, у которых выводы выходят на две противоположные стороны).

Для упрощения вычислений положим:  $K = K_c = 24$ ;  $h = 0$ ;  $n = 2$ . Этот случай соответствует плате с двумя уровнями коммутации, на которой находятся компоненты с 24 выводами, причем выводы расположены по всем четырем сторонам компонента и все они задействованы.

Учитывая приведенные допущения, а также то, что, согласно [10],  $a_0 = 9,7$ ;  $a_1 = 3,45$ ;  $a_2 = 0,32$ , формула (2) преобразуется к виду

$$\Delta l = 50 b_n. \quad (3)$$

Преобразуем выражение (1):

$$S_k = lb + \Delta l(l + b) + \Delta l^2 = S + \Delta S_1 + \Delta S_2 = S + \Delta S, \quad (4)$$

где  $S = lb$  — площадь компонента;

$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$  — общее приращение площади платы относительно площади компонента;

$\Delta S_1 = \Delta l(l + b)$  — приращение площади платы первого порядка;

$\Delta S_2 = \Delta l^2$  — приращение площади платы второго порядка.

Используя выражение (3) проведем расчет параметров (4), а результаты расчета сведем в табл. 2. В табл. 2 приведено также сравнение площадей размещения на плате различных типов корпусов компонентов, приведенных в [9, с. 68]. Здесь ОВ — объемные выводы, мод. — модификация, LCCC — керамический мини-корпус, SOP — пластмассовый мини-корпус.

Как следует из таблицы, плотность упаковки кремниевой платы с БК может быть повышена в 5—12 раз по сравнению с монтажом мини-корпусов на печатную плату. На самом деле это преимущество еще выше. Дело в том, что формула (2) была получена при исследовании печатных плат, и ее статистические коэффициенты (по крайней мере, некоторые) напрямую зависят от диаметра переходных отверстий. В печатной плате потери из-за сквозных отверстий достигают 30% ее поверхности [11]. В кремниевой же плате диаметр переходных отверстий, а также расстояния между ними, будут значительно меньше, чем в печатной плате. Следовательно, и значения статистических коэффициентов для кремниевой платы будут ниже.

Как следует из формулы (2), преимущества тонкопленочной технологии в плотности упаковки возрастают при увеличении числа выводов компонентов. В случае установки мини-корпусов на кремниевую плату выигрыш в плотности упаковки не столь значительный. Тем не менее он составляет 1,75—3,75 раза.

Еще одним аргументом в пользу тонкопленочной технологии является то, что она обеспечивает высоко-

Таблица 2

Типы корпусов	$l, \text{ мм}$	$b, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}^2$	$b_n, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ мм}$	$\Delta S_1, \text{ мм}^2$	$\Delta S_2, \text{ мм}^2$	$\Delta S, \text{ мм}^2$	$\Delta S_k, \text{ мм}^2$	Относительные единицы
БК с ОВ	6,57	5,65	37,12	0,01	0,5	6,11	0,25	6,36	43,48	1
БК(мод. 1, 2)	8,57	5,85	50,13			7,21		7,46	57,59	1,32
LCCC	11,18	11,18	125	0,1	5	11,18	25	11,43	136,4	3,14
				0,2	10	111,8	100	114,3	239,3	5,5
SOP	15,4	10,24	157,7	0,2	10	256,4	100	356,4	514,1	11,8

кое ресурсосбережение и экологическую безопасность. Достаточно сказать, что при травлении печатных плат в отходы уходит до 800 г меди с 1 м<sup>2</sup> поверхности, в то время как при травлении тонкопленочных плат этот показатель не превышает 6 г/м<sup>2</sup> [11]. К тому же при травлении меди образуются вредные вещества. Большая часть растворов для травления меди, являющихся опасными для окружающей среды, сбрасывается вместе со сточными водами. Поэтому при обосновании экономической целесообразности производства печатных плат необходимо учитывать затраты на строительство очистных сооружений и переработку гальванических стоков. Кроме того, в связи с истощением природных ресурсов цены на медь неизбежно будут возрастать (как, впрочем, и экологические требования к производителям печатных плат). Отсюда следует ожидать значительного повышения себестоимости производства печатных плат.

### Выводы

Наибольшую интеграцию, максимальный теплоотвод и низкую себестоимость изготовления микросборки можно получить путем применения микросборок с подложкой из кремния. Для существенного уменьшения площади тонкопленочных резисторов следует использовать резистивные материалы с  $\rho=5...10$  кОм/□. Вместе с тем уменьшение норм проектирования топологических размеров резисторов до 50 мкм и менее позволяет использовать в качестве резистивного материала адгезионный подслой хрома с величиной  $\rho=250...500$  Ом/□. При этом площадь резистора возрастает незначительно, а себестоимость изготовления микросборки может быть существенно снижена. Кроме того, применение хрома позволяет изготавливать ТПР на кремниевых подложках.

На кремниевые или поликорковые платы возможна установка как бескорпусных кристаллов, так и компонентов в мини-корпусах, предназначенных для поверхностного монтажа. Как следует из проведен-

ного анализа, площадь кремниевой платы может быть в 6—15 раз меньше печатной платы, что значительно сокращает разрыв в себестоимости их изготовления. Кроме того, в отраслях, где приоритетом является минимизация массогабаритных характеристик, преимущества кремниевой платы с бескорпусными кристаллами бесспорны.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах / И. Н. Воженин, Г. А. Блинов, Л. А. Коледов и др.— М.: Радио и связь, 1985.
2. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1986.
3. Лаймен Д. Многокристалльные модули — высокоэффективное средство сборки новых поколений СБИС // Электроника.— 1989.— № 6.— С. 10—13.
4. Узбер С. Многокристалльные модули — перспективное направление в области СБИС // Электроника.— 1989.— № 7.— С. 63—71.
5. Дорошевич К., Дорошевич В., Телец В. Многокристалльные модули: конструкция, технология, перспектива // Главный инженер: управление промышленным производством.— 2004.— № 2.— С. 24—27.
6. Спиринов В. Г. Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре.— 2004.— № 2.— С. 14—16.
7. Спиринов В. Г. Расчет стационарного теплового режима тонкопленочной микросборки // Вестник МВВО. Сер.: Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. (Н.-Новгород.)— 2003.— Вып. 1.— С. 15—19.
8. Спиринов В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Там же.— С. 11—14.
9. Мэнгин Ч.-Г., Маклеланд С. Технология поверхностного монтажа. Будущее технологии сборки в электронике.— М.: Мир, 1990.
10. Елизаров Б. А., Максимов А. В., Шелест В. И., Ширяев Ю. Н. Оценка электромонтажных параметров коммутационных плат на ранних этапах проектирования РЭС // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре.— 2004.— № 2.— С. 3—6.
11. Скубилин М. Д., Письменов А. В., Гусев Б. А. Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в гальвано-технологии // Там же.— С. 46—51.

### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



#### **Умняшкин С. В. Математические основы цифровой обработки и кодирования сигналов.— М.: МИЭТ, 2004.— 176 с.**

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Прикладная математика». Материал пособия включает в себя в основном наиболее общие теоретические вопросы, связанные с цифровым представлением сигналов и основами анализа линейных дискретных систем, на базе чего в дальнейшем возможно построение специализированных курсов цифровой обработки сигналов, ориентированных на конкретные специальности и направления. По этой причине учебное пособие может быть также рекомендовано для направлений радиотехнического и телекоммуникационного профиля, так как изложение материала опирается лишь на общеобразовательные математические курсы, читаемые в МИЭТ для всех технических специальностей.

