

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПЛАТЫ С ТОЛСТОПЛЕНОЧНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Владимир Георгиевич Спирин родился в 1949 г. в селе Большое Маресьево Лукояновского района Горьковской области. Доцент Арзамасского политехнического института (филиала НГТУ). Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области тонкопленочных технологий, твердотельных волновых гироскопов. Автор более 70 научных работ.

Vladimir G. SPIRIN, Ph.D., was born in 1949, in the Ghoriky Region. He is an Associate Professor at the Arzamas Polytechnic Institute. His research interests are in thin-film technologies as well as in gyroscopes based on elastic waves in solids. He has published 70 technical papers.

*Рассмотрены конструктивно-технологические варианты тонкопленочных многоуровневых плат с изоляцией проводящих уровней толстой пленкой органического диэлектрика.*

Рост функциональной сложности электронных устройств, использование многовыводных полупроводниковых компонентов в многокристальных модулях (МКМ) обусловили необходимость создания в них многоуровневой разводки. К многоуровневой коммутации предъявляются следующие основные требования [1]:

- 1) высокая плотность монтажа;
- 2) высокие электрические сопротивление и прочность изоляции;
- 3) низкая диэлектрическая проницаемость межуровневой изоляции (МИ);
- 4) малое и постоянное во времени переходное сопротивление контактов в областях соединения проводников разных слоев;
- 5) высокая механическая прочность;
- 6) низкая стоимость.

В тонкопленочных многоуровневых платах используют пленки диэлектрика толщиной 2—4 мкм. Такая толщина пленок не позволяет создавать МИ без проколов, которые вызывают короткие замыкания между проводниками разных уровней. Причинами проколов изоляции являются пористость диэлектрика, загрязнения, неоднородность структуры подложки, механические повреждения и т.д. Чтобы исключить образование сквозных проколов МИ формируют в 2—3 слоя [2]. Однако такое решение увеличивает трудоемкость изготовления МКМ. Увеличение толщины МИ приводит к возрастанию высоты ступенек, на которых происходит обрыв проводников второго уровня [3].

Наиболее часто в многоуровневых платах на жестких подложках в качестве МИ используют органические и неорганические диэлектрики. Пре-

дельная толщина неорганического диэлектрика, получаемого методами вакуумного осаждения, обычно не превышает 3—4 мкм, при этом паразитная емкость в местах пересечений составляет 1—2 пФ при ширине проводников 100 мкм. Большинство органических диэлектриков обладает невысокой нагревостойкостью. Например, максимальная рабочая температура негативного фоторезиста ФН-11КС не превышает 200 °С.

Таким образом, основными технологическими проблемами, которые возникают при создании тонкопленочной многоуровневой коммутации, являются пробой изоляции и обрыв проводников на ступеньках МИ. Причем эти два дефекта связаны между собой. Действительно, увеличивая толщину МИ, можно исключить ее пробой. Например, в [4] предложено использовать МИ из полиимидного лака толщиной 8—15 мкм. Практические исследования, выполненные авторами [4], показывают, что при толщине диэлектрического слоя более 8 мкм сквозные поры в МИ отсутствуют. Однако при толстых пленках МИ для известных конструктивно-технологических вариантов (КТВ) многоуровневых плат, использующих неорганические и органические диэлектрики, становится проблематичным предотвращение обрыва проводников на ступеньках МИ.

Еще одной серьезной проблемой создания тонкопленочной многоуровневой коммутации является высокая трудоемкость изготовления, которая обусловлена большим количеством технологических операций по формированию МИ и высших уровней коммутации. Например, формирование МИ из полиимидного лака в два слоя требует 12 операций. Высокая трудоемкость и низкий процент выхода

годных плат существенно повышают их себестоимость.

В зарубежных изданиях [5, 6] имеются сообщения об уникальном создании тонкопленочной многоуровневой коммутации МКМ на основе органического диэлектрика. Так в компании Rockwell International разработан МКМ, предназначенный для автоматического распознавания целей. Модуль может работать с тактовой частотой 40 МГц и содержит кристаллы интегральных схем (ИС), размещенные на кремниевой подложке с четырьмя слоями алюминиевых межсоединений, изолированных друг от друга диэлектрическими слоями полиимидом толщиной 6–10 мкм. На подложке размером 50×63 мм смонтировано в общей сложности 140 компонентов, в том числе резисторы и конденсаторы. Ширина проводящих линий составляет 25 мкм.

Проведенный анализ литературы [1–6] убеждает в том, что для создания надежной многоуровневой коммутации требуются толстые (более 10 мкм) пленки диэлектрика. Настоящая работа посвящена разработке многоуровневых коммутационных плат, содержащих тонкопленочные резисторы, проводники и контактные площадки (КП), конденсаторы, в которых в качестве МИ используется толстая пленка органического диэлектрика.

Органические диэлектрики с толщиной более 10 мкм после полимеризации образуют плотную пленку без пустот и трещин. Большинство полимеров имеет объемное удельное сопротивление не менее  $10^{12}$  Ом·см [3]. Вследствие относительной подвижности связей полимеры имеют высокий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  1/°С. Поэтому можно предполагать, что они плохо совместимы с материалами, имеющими меньший ТКЛР: металлами и полупроводниками. Однако высокая эластичность полимеров и сравнительно небольшой интервал рабочих температур электронных устройств позволяет широко применять их в виде пленок, нанесенных на поверхность любого материала [7].

Толстая пленка МИ решает две основные проблемы: исключает ее пробой и снижает паразитную

емкость между проводниками разных уровней, что повышает быстродействие электронных устройств. Традиционно считалось, что толстые пленки МИ не позволяют получать надежные межсоединения тонкопленочных проводников разных уровней и это является главной проблемой создания многоуровневой коммутации с высокой плотностью проводников в каждом уровне.

Рассмотрим основные виды компонентов, которые требуют разных методов монтажа их выводов. При монтаже компонентов в основном используют три метода присоединения их выводов к КП платы [3, 8]: термокомпрессионная сварка, ультразвуковая сварка (УЗС) и пайка. Термокомпрессионная сварка используется для монтажа золотых проволочных выводов ИС модификации (мод. 1), а УЗС — для монтажа ленточных алюминиевых выводов ИС (мод. 2). Пайкой присоединяются жесткие организованные выводы ИС. Примером таких компонентов являются бескорпусные кристаллы с объемными выводами, монтируемые методом перевернутого кристалла, компоненты в микорпусах, пассивные компоненты. В табл. 1 приведены основные технологические режимы [3, 8] соединения выводов компонентов к КП платы МКМ.

В печатных и гибких полиимидных платах проводники формируются на двух противоположных поверхностях. Поэтому для соединения проводников разных уровней используются переходные отверстия, которые занимают до 30% площади платы. В тонкопленочных и толстопленочных схемах проводящие и изолирующие слои формируются на одной поверхности подложки. В этом случае формирование переходных межуровневых соединений не обязательно, так как возможно через окна в изоляции присоединение выводов компонентов непосредственно к КП конкретного уровня проводников. При этом межсоединения, формируемые в каждом уровне, должны быть независимы друг от друга. Для практической реализации вышеизложенного подхода рассмотрим три КТВ многоуровневых плат, которые различаются методами присоединения выводов компонентов к КП платы:

Таблица 1

Метод монтажа выводов ИС	Соединяемые металлы		Усилия сжатия, Н	Температура в месте соединения, °С	Время соединения, с
	Выводы ИС	КП платы			
Термокомпрессионная сварка	Золото, алюминий	Алюминий, медь	0,03–0,5	400–550	0,2–1,0
	Золото	Лужение ПОС-61	—	220–250	
Ультразвуковая сварка	Алюминий	Алюминий, медь	0,2–0,4	150–200	0,3–0,8
Пайка	Лужение ПОС-61	Лужение ПОС-61	—	220–250	1–3

- 1) выводы компонентов присоединяются к КП платы только сваркой;
- 2) выводы компонентов присоединяются к КП платы сваркой и пайкой;
- 3) выводы компонентов присоединяются к КП платы только пайкой.

Как правило, в первом уровне располагают резисторы, нижние обкладки конденсаторов, сигнальные проводники и КП, к которым присоединяются выводы компонентов и внешние выводы МКМ. Для повышения плотности коммутации в первом уровне располагают линии с минимальной шириной, так как их получение здесь наиболее просто обеспечить технологически. Кроме того, при этом обеспечивается минимальная себестоимость изготовления плат ввиду того, что если произойдет брак, то он произойдет на ранней стадии изготовления платы. В последующих уровнях коммутации располагают проводники питания, сигнальные проводники, обкладки конденсаторов и КП.

Многоуровневая коммутация необходима при компоновке ИС, имеющих организованные выводы (ИС мод. 2, ИС в миникорпусах и ИС, монтируемых методом перевернутого кристалла). Выводы ИС мод. 1 всегда можно развести в одном уровне коммутации. Поскольку выводы ИС мод. 1 соединяются с КП платы термокомпрессионной сваркой, при которой образуется высокая температура в месте соединения, то выводы данных ИС монтируются только к КП первого уровня коммутации. Для того чтобы осуществить соединение вывода компонента к КП, расположенной на МИ, необходимо обеспечить требуемую температуру в месте соединения. Согласно табл. 1 минимальная рабочая температура МИ должна быть не менее 250 °С. Нагревостойкие полимеры выпускаются отечественной и зарубежной промышленностью. Основные параметры некоторых из них приведены в табл. 2.

В России в качестве МИ используются полиимидный лак ПАК-1 и полибензомидазольный лак ПБИ-1. Эти полимеры имеют высокую радиационную и температурную стойкость. Они обладают хорошим набором технологических свойств: отсут-

ствием газовой выделения в вакууме до температур 200—250 °С, устойчивостью к воздействию кислот и способностью к травлению [1]. Недостатками отечественных полимеров является их высокая стоимость и повышенное влагопоглощение. Последнее обстоятельство ведет к усложнению технологического процесса: хранение и нанесение лаков на подложки только в сухих помещениях, необходимость сушки плат перед герметизацией МКМ. За счет влагопоглощения ухудшаются частотные свойства полимеров. Кроме того, эти лаки не обладают фоточувствительностью, что приводит к увеличению трудоемкости при формировании рисунка МИ вследствие необходимости применения фоторезиста.

Более перспективным является применение в качестве МИ фотоэкспонируемой паяльной маски, которую широко применяют в технологии поверхностного монтажа компонентов, например Сагарасе ЕМР 110НР. Несмотря на то что данный полимер имеет более низкую нагревостойкость, чем рассмотренные лаки, его применение является более предпочтительным по технологическим свойствам. В состав паяльной маски Сагарасе ЕМР 110НР входят эпоксидная и акриловая смолы, а также фоточувствительные добавки. Достоинства эпоксидов состоят в отсутствии побочных продуктов и очень малой усадке (0,2—0,5%) при отверждении, высокой смачивающей способности и адгезии к различным материалам [7]. Паяльная маска обладает высоким разрешением и позволяет формировать перемычки шириной 25 мкм. Кроме того, маска Сагарасе ЕМР 110НР обладает высокой механической прочностью и твердостью (карандаш), высокой скоростью экспонирования и проявления, прекрасной электроизоляцией и влагостойкостью.

Первый КТВ двухуровневой платы, в котором выводы компонентов присоединяются к КП только сваркой, показан на рис. 1. Основными компонентами в данном случае являются ИС и полупроводниковые приборы мод. 1, 2, а также пассивные компоненты. Выводы компонентов мод 1 развариваются термокомпрессионной сваркой к КП первого уровня, а выводы компонентов мод. 2 развариваются УЗС к КП любого уровня. Краткая тех-

Таблица 2

Тип диэлектрика	Электрическая прочность, В/мкм	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла потерь	Максимальная рабочая температура, °С
Полиимидный лак ПАК-1	150	3,5 (1 кГц)	0,003 (1 кГц)	400
Полибензомидазольный лак ПБИ-1	100	4 (1 кГц)	—	400
Фотоэкспонируемая паяльная маска Сагарасе ЕМР 110НР	85	4 (1 МГц)	0,03 (1 МГц)	270

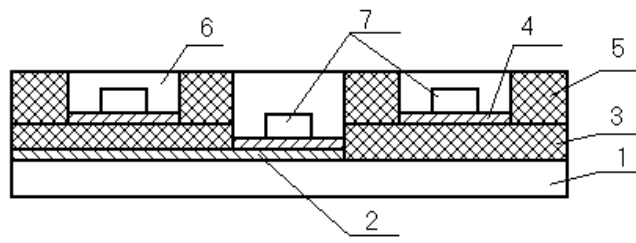


Рис. 1. Соединения выводов компонентов сваркой в разных уровнях коммутации:  
 1 — подложка; 2 — КП первого уровня; 3 — МИ;  
 4 — КП второго уровня; 5 — ЗИ;  
 6 — окно в изоляции; 7 — выводы ИС

технология изготовления двухуровневой платы, изображенной на рис. 1, приведена в табл. 3.

Адгезионный подслоя хрома первого уровня коммутации используется в качестве резистивного материала. Верхний слой хрома в проводниках и КП первого уровня обеспечивает адгезию МИ и проводящей пленки второго уровня. Для повышения адгезии пленок проводят межоперационную очистку плат, при этом используют как химическую, так и ионную очистку.

Каждый уровень проводников соединяют проводящими технологическими перемычками. Это необходимо для быстрой проверки параметров МИ. Над технологическими перемычками в МИ формируют окна, которые необходимы для последующего удаления перемычек. После формирования второго проводящего уровня проверяют параметры (сопротивление и стойкость к высокому напряжению) МИ, после чего технологические перемычки удаляют методом фотолитографии и травления [9].

Таблица 3

Наименование операции	Толщина слоя, мкм
1. Напыление структуры Cr-Al-Cr	1—1,5
2. Формирование проводников и КП первого уровня	—
3. Формирование резисторов из Cr	—
4. Химическая и ионная очистка плат	—
5. Нанесение и формирование рисунка МИ	10—15
6. Химическая и ионная очистка плат	—
7. Напыление структуры Cr-Al	1—1,5
8. Формирование проводников и КП второго уровня	—
9. Проверка параметров изоляции	—
10. Удаление технологических перемычек	—
11. Формирование защитной изоляции	10—15
12. Разделение подложки на платы	—

При формировании защитной изоляции (ЗИ) оставляют открытыми только КП для присоединения компонентов и внешних выводов МКМ. ЗИ формируется из того же диэлектрика и теми же способами, что и МИ. Для качественного разделения подложки на платы в местах реза не должно быть пленочных элементов.

Монтаж выводов ИС к КП платы (рис. 1) легко осуществим, так как выводы ИС мод. 1, 2 обладают хорошей гибкостью. В случае необходимости соединения КП разных уровней используют проволочные или ленточные перемычки из алюминия или вывод ИС мод.2, разваривая его УЗС на КП разных уровней. Теплонагруженные компоненты рекомендуется устанавливать на МИ, при этом увеличивается плотность проводников первого уровня, а теплоотвод ухудшается незначительно из-за малой толщины МИ.

Второй КТВ многоуровневой коммутации предназначен для монтажа смешанных компонентов, выводы которых соединяются с КП платы либо сваркой, либо пайкой, а также в случае необходимости формирования большого количества межуровневых соединений. На рис. 2 показана конструкция КП, которая предназначена для соединения вывода компонента пайкой. Данная конструкция обеспечивает межуровневое соединение с помощью припоя. Таким образом, второй КТВ многоуровневой платы представляет собой комбинацию фрагментов, изображенных на рис. 1, 2. Технологический процесс изготовления второго КТВ многоуровневой платы во многом аналогичен технологическому процессу первого КТВ. Отличия технологического процесса второго КТВ от первого приведены в табл. 4.

Во втором КТВ последний уровень коммутации формируют из структуры Cr-Cu-Ni, по которой производят лужение КП. Для надежного соединения организованных выводов компонентов с КП

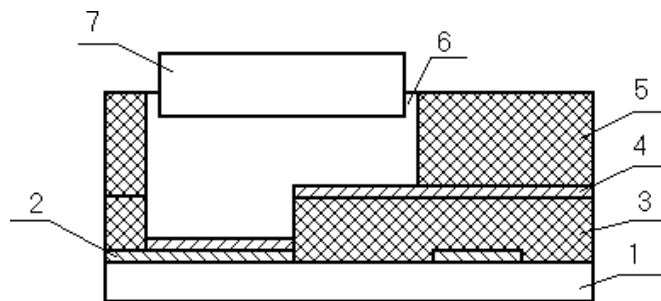


Рис. 2. Соединение КП разных уровней коммутации припоем:  
 1 — подложка; 2 — первый уровень коммутации;  
 3 — МИ; 4 — второй уровень коммутации; 5 — ЗИ;  
 6 — припой; 7 — вывод ИС

Таблица 4

Наименование операции	Толщина слоя, мкм
7. Напыление структуры Cr-Cu-Ni	2–2,5
8. Формирование проводников и КП второго уровня	—
9. Проверка параметров изоляции	—
10. Удаление технологических перемычек	—
11. Формирование защитной изоляции	15–20
12. Разделение подложки на платы	—
13. Нанесение припойной пасты на КП и ее облуживание	—

платы, а также проводников разных уровней толщину ЗИ увеличивают до 25 мкм. На КП, используемые для присоединения выводов ИС пайкой и (или) соединения разных уровней коммутации, с помощью дозатора наносят припойную пасту. Затем плату помещают в печь и оплавливают припой. После оплавления припой заполняет окна 6 (см. рис. 1) до верхней поверхности ЗИ. С целью минимизации количества межуровневых переходов их выполнение рекомендуется объединять с КП для пайки выводов компонентов (см. рис. 2). Длина КП в каждом уровне коммутации (см. рис. 2) равна половине длины КП знакоместа компонента. Такой подход к конструированию платы повышает плотность коммутации и обеспечивает высокую надежность межуровневых соединений вследствие больших размеров КП.

Третий КТВ многоуровневой коммутации предназначен для установки компонентов с жесткими организованными выводами методом пайки. На рис. 3 показан монтаж ИС с объемными организованными выводами методом перевернутого кристалла. Третий КТВ многоуровневой платы представляет собой комбинацию фрагментов, изображенных на рис. 2, 3. Отличие технологии изготовления третьего КТВ от второго состоит в том, что

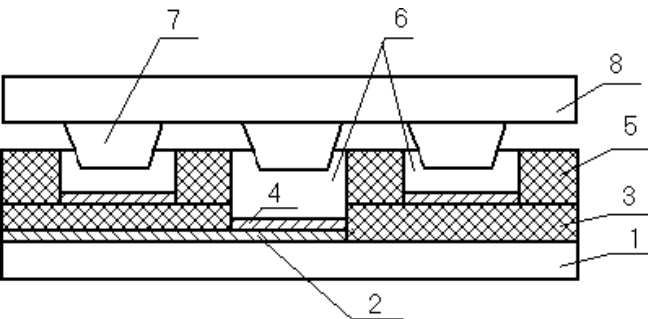


Рис. 3. Установка компонента пайкой:

1 — подложка; 2 — КП первого уровня; 3 — МИ; 4 — КП второго уровня; 5 — ЗИ; 6 — припой; 7 — выводы ИС; 8 — ИС с объемными выводами

все КП платы подвергаются лужению. В этом случае нанесение припойной пасты осуществляется известными методами [10].

В процессе создания многоуровневой коммутации, кроме резисторов, могут формироваться пленочные конденсаторы и индуктивности. По описанным технологиям можно получать высоковольтные конденсаторы с рабочим напряжением 400–500 В. К сожалению, изготовление пленочных конденсаторов с размерами более 1,5×1,5 мм нецелесообразно ввиду малой удельной емкости, которая для толщины диэлектрика 10 мкм составляет 35 пФ/мм<sup>2</sup>. Вместе с тем паразитная емкость в местах пересечения проводников с шириной 25 мкм составляет всего 0,022 пФ.

Автором была разработана тестовая схема двухуровневой платы по второму КТВ. В качестве МИ был применен лак ПБИ-1 толщиной 6 мкм. На изготовленной плате размером 34×20 мм было установлено 17 логических микросхем мод. 2 с 16 выводами и один конденсатор. Присоединение выводов ИС мод. 2 осуществлялось УЗС, а выводов конденсатора — пайкой.

Рассмотренные КТВ позволяют создавать количество уровней коммутации свыше двух. Однако практика проектирования МКМ и экономическая целесообразность показывают, что в большинстве случаев можно обойтись двумя уровнями коммутации [6].

При создании многоуровневой коммутации по описанному КТВ могут использоваться диэлектрические, полупроводниковые или металлические [4] подложки. Широкий спектр подложек, а также то, что на полимерной изоляции возможно формирование тонкопленочных резисторов [4], расширяют возможности проектирования МКМ.

### Выводы

1. Особенностью конструкций рассмотренных многоуровневых плат является то, что в качестве МИ и ЗИ применяется толстая пленка органического диэлектрика, что исключает проколы изоляции, свойственные тонким пленкам. В качестве альтернативы межуровневых соединений выдвинута идея соединения выводов компонентов к КП разных уровней коммутации, в том числе и расположенных на МИ. Решение данной задачи достигается несколькими путями: формированием уровней коммутации, максимально независимых друг от друга; использованием гибкости выводов ИС мод. 1,2; заполнением припоем отверстий в изоляции, используемых в качестве КП для присоединения жестких выводов ИС и (или) соединения разных уровней коммутации.

2. Высокая плотность проводников достигается за счет применения тонких пленок, а также за счет того, что в каждом проводящем уровне формируются КП, к которым известными методами присоединяются выводы компонентов, а потери площади платы вследствие формирования межуровневых соединений минимальны.

3. За счет применения фотоэкспонируемой паяльной маски и формирования МИ и ЗИ в один слой трудоемкость и себестоимость изготовления многоуровневой платы могут быть снижены в 2—3 раза по сравнению с известными тонкопленочными прототипами.

4. Разработано три КТВ многоуровневой платы. В первом КТВ выводы компонентов присоединяются к КП платы только сваркой, а в третьем только пайкой. Второй КТВ позволяет устанавливать на плату смешанную комплектацию компонентов с различными способами соединения их выводов. В разработанных конструкциях многоуровневых плат практически отсутствуют межуровневые соединения проводников, что повышает надежность плат.

#### Summary

Some design-manufacturing versions of thin-film multilevel switching cards are presented. These versions use isolation of conductive levels by means of thick-film organic dielectric.

#### Библиографический список

1. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. — М.: Радио и связь, 1989.

2. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б.Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1978.

3. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. — М.: Машиностроение, 1976.

4. А.М. Грушевский, А.В. Зимрутян, Л.А. Коледов, С.Н. Томащенко. Коммутационные платы на крупноформатных металлических подложках с полимерной изоляцией // Электронная промышленность. 1985. Вып. 2. С. 27-29.

5. Лаймен Д. Многокристалльные модули — высокоэффективное средство сборки новых поколений СБИС // Электроника. 1989. № 6. С. 10-13.

6. Уэбер С. Многокристалльные модули — перспективное направление в области СБИС // Электроника. 1989. № 7. С. 63-71.

7. Материалы микроэлектронной техники: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.М. Андреева. — М.: Радио и связь, 1989.

8. Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1986.

9. А.С. СССР № 1628836. Способ изготовления многослойной платы / В.С. Кораблев, В.Г. Спиринов. 31.03.89.

10. Зеленюк И. Новые технологии нанесения припойных паст // Компоненты и технологии. 2003. № 9. С. 180-181.

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)  
Статья поступила в редакцию 19.05.2006