

Изготовление пассивной части плат ГИС СВЧ с использованием толсто- и тонкоплёночной технологий металлизации

Юрий Непочатов (nuk3d@mail.ru)

В статье рассмотрена схема изготовления пассивной части плат гибридных интегральных схем сверхвысокочастотного диапазона по комбинированной технологии, когда обратная сторона подложки и торцы металлизуются методом трафаретной печати, а на лицевую сторону вакуумным термическим испарением наносятся резистивные и проводящие слои. Кроме того, проанализированы различные составы металлизационных паст, представлены экспериментальные данные по измерению потерь в микрополосковых линиях на платах, изготовленных по описанной технологии, и даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию технологии изготовления плат ГИС СВЧ.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили гибридные интегральные схемы сверхвысокочастотного диапазона (ГИС СВЧ), которые являются основными изделиями электронной техники СВЧ-диапазона. Конструктивно ГИС СВЧ представляет собой плату с топологическим рисунком из плёночных пассивных элементов и контактных площадок с размещёнными на них навесными элементами [1]. Особенностью ГИС СВЧ является то, что в состав топологического рисунка плат входят компоненты, специфичные для данного диапазона, например направленные ответвители, фильтры, различные согласующие элементы, резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д. Основными путями совершенствования ГИС СВЧ являются улучшение электрических характеристик, снижение массы и габаритов, улучшение тепловых режимов работы, повышение надёжности, технологичности, снижение стоимости. Именно с этих позиций следует оценивать различные конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ, а также их отличия от аналогичных устройств на печатных платах. Очевидно, что ГИС СВЧ резко превосходят устройства на печатных платах по массогабаритным показателям. В настоящее время разработано и успешно применяется большое количество разнообразных конструктивно-технологических вариантов ГИС СВЧ. Классификация их может осуществляться по различным признакам и критериям: конструктивным, технологиче-

ским, по степени интеграции, физическому принципу работы активных элементов, быстродействию, по потребляемой мощности, способу применения в аппаратуре и т.д. ГИС СВЧ обычно представляет собой диэлектрическую подложку, как правило полированную с одной стороны и (с целью снижения стоимости ГИС) шлифованную с другой. На полированной поверхности подложки формируют сосредоточенные элементы: резисторы, конденсаторы, индуктивности и распределённые элементы схемы – микрополосковые линии (МПЛ), а на обратную, шлифованную сторону подложки наносят экранную заземляющую металлизацию. Традиционным для классификации ГИС СВЧ является признак разделения по конструкции МПЛ и их металлизационной структуре [2].

Для изготовления плёночных пассивных элементов и экранной заземляющей металлизации в ГИС СВЧ используют две технологии: толсто- и тонкоплёночную.

Толстоплёночная технология основана на механическом нанесении на подложку проводящих, диэлектрических и резистивных паст через соответствующие трафареты с последующей термической обработкой подложки с нанесёнными элементами схемы при температурах +400...+1350°C в зависимости от состава пасты и назначения термообработки. В процессе нанесения пасты происходит формирование того или иного слоя интегральной схемы. Пасты представляют собой суспензию порошков наполнителя и стекла

(фритты) в какой-либо органической связующей жидкости или растворе. Наполнитель является основой пасты и придаёт плёнкам необходимые резистивные, проводящие или диэлектрические свойства. Основные требования, предъявляемые к пастам:

- возможность нанесения их через трафарет и термообработка (вжигание);
- воспроизводимость свойств;
- хорошая адгезия к подложке;
- совместимость с другими элементами;
- соответствующие электрические свойства;
- способность к пайке и термокомпрессионной сварке.

Паста должна обладать определённой величиной вязкости. Слишком большая вязкость приводит к растеканию пасты и искажению рисунка, а слишком малая – к плохому продавливанию пасты через трафарет. В качестве наполнителей проводниковых паст используются порошки металлов и сплавов с размером частиц не более 5 мкм. Размеры и форма частиц оказывают сильное влияние на физические и электрические свойства толстых плёнок. Наполнители паст должны обладать крайне низкой химической активностью при высоких температурах в окислительной среде и при соприкосновении с химически активным стеклом, а также быть устойчивы к воздействию припоя, применяемого при монтаже пайкой. В качестве наполнителей чаще всего используются благородные металлы: золото, серебро, сплавы золото/палладий, золото/платина, серебро/палладий и др. Наряду с перечисленными наполнителями из благородных металлов для изготовления проводниковых паст применяются неблагородные металлы: медь, никель, алюминий, вольфрам, молибден. Они обеспечивают не только меньшую стоимость паст, но и, в ряде случаев, лучшие параметры и стабильность при высоких температурах. Медь, например, является единственным металлом с высокой электропроводностью, к которому можно присоединять внешние выводы как сваркой, так и пайкой. Кро-

ме того, медь имеет хорошую адгезию к керамическим подложкам, высокую теплопроводность, стойкость к выщелачиванию и радиации, хорошие свойства в диапазоне СВЧ. В качестве наполнителей резистивных паст применяются серебро, золото, палладий, платина, рений, окислы таллия, рутения, рения, палладия, а также различные композиции: серебро/палладий/оксид палладия, серебро/оксид рутения, висмут/рутения, рутений/иридий, платина/оксид иридия и др. Толстоплёночные резисторы имеют номиналы сопротивлений от 1 до 10 Ом, удельное сопротивление от 1 до $1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и широкий диапазон значений ТКС.

При изготовлении диэлектрических паст для конденсаторов в качестве наполнителей применяют смеси порошков керамических материалов и флюсов, а также стёкла и ферроэлектрические материалы. Например, пасты на основе композиции титанат бария / оксид титана / оксид алюминия / легкоплавкое стекло имеют диэлектрическую проницаемость от 10 до 2000.

Диэлектрики для межуровневой изоляции проводников изготавливают на основе стеклокерамических материалов. По сравнению с диэлектриками для конденсаторов они обладают меньшей диэлектрической проницаемостью.

В качестве постоянного связующего в состав паст входят стёкла, которые не удаляются после формирования плёнки и остаются в готовом плёночном элементе. В проводниковой пасте стекло служит для удерживания в контакте зёрен наполнителя и для обеспечения адгезии толстой плёнки к подложке. При выборе состава стекла необходимо учитывать зависимость его вязкости от температуры, смачивание подложки, химическую активность и коэффициент термического расширения. Эти свойства влияют на режим термообработки, образование механических связей между зёрнами металлического наполнителя, удельное сопротивление плёнки и процессы подсоединения выводов к контактным площадкам. От состава стекла в значительной степени зависит стабильность параметров резисторов. В диэлектрике, применяемом для межуровневой изоляции проводников, постоянное связующее является одновременно и основным функциональным компонентом. В диэлектрики конденсаторов стекло не должно вносить дефектов, приводящих к возникновению коротких замыканий

между обкладками. В качестве постоянного связующего применяются легкоплавкие стёкла: свинцово-боросиликатные, цинк-боросиликатные и кадмиевые.

В качестве органических связующих и растворителей паст применяется широкий набор материалов: этилцеллюлоза, воски, ланолин, вазелиновое масло, циклогексанол, жидкие смолы и органические растворители. Органические связующие и растворители вводятся для обеспечения равномерного распределения частиц порошков различных компонентов в процессе приготовления пасты, для получения определённой консистенции и для придания пасте необходимой вязкости. При нанесении пасты на подложку органические связующие полностью удаляются в процессе термообработки. При неполном удалении органических связующих в составе диэлектрика, например, остаётся углерод, который резко повышает электропроводность. Специальные добавки вводят в состав паст для улучшения адгезии, паяемости и для придания пастам тиксотропности, т.е. способности под действием механического давления увеличивать текучесть и затем после прекращения этого воздействия снова загустевать. Для придания пастам тиксотропных свойств в их состав вводят высокомолекулярные соединения, например фуранкарбоную или терефталевую кислоты. Проводники толстоплёночных схем изготавливаются путём нанесения проводниковых паст через трафареты. Проводниковые пасты должны обеспечивать получение следующих характеристик композиции (после вжигания):

- высокую удельную проводимость во избежание заметного падения напряжения и нагрева;
- высокую адгезию плёнки с подложкой, поскольку непосредственно к ней присоединяются выводы и навесные элементы;
- возможность присоединения к поверхностям проводников монтажных проводов и навесных элементов посредством пайки или сварки;
- устойчивость к воздействиям, связанным с выполнением технологических процессов, и способность выдерживать заданные условия эксплуатации.

Проводники должны изготавливаться предельно короткими, чтобы уменьшить сопротивление схемы. Поверхностное сопротивление толстоплёноч-

ных проводников должно изменяться в пределах $0,005 \dots 0,1$ Ом/□ в зависимости от типа применяемой пасты. Для нанесения проводников необходимо использовать только одну сторону подложки. Количество пересечений должно быть минимальным, поскольку для их создания необходимы две дополнительные операции нанесения и вжигания плёнок (нанесение межслойного диэлектрика и второго проводящего слоя). Для современной технологии стандартной шириной проводника считается 0,25 мм, однако, если это необходимо, можно изготавливать полоски шириной до 0,125 мм. Такие же значения допускаются и для расстояний между проводниками.

Толщина слоя проводника, например на основе композиций палладий/серебро, составляет 10...25 мкм, минимальная ширина (длина) проводника колеблется в пределах 0,15...0,20 мм при нанесении пасты на керамику и 0,20...0,30 мм при нанесении на слой диэлектрика. Минимальное расстояние между проводниковыми элементами – 0,05...0,20 мм в зависимости от рецептурного состава пасты. Реальная точность изготовления элементов топологического рисунка по толстоплёночной технологии составляет ± 20 мкм [3]. Однако из-за слабой химической связи толстых плёнок с полированной поверхностью ухудшается точность нанесения рисунка схемы, плёнки имеют плохое сцепление с полированной подложкой, при воздействии высокой температуры ($+300^\circ$) и влажности происходит их отслаивание, при этом возрастают потери, что существенно для применения в СВЧ-диапазоне. Эти явления не наблюдаются при нанесении толстых плёнок и получении топологического рисунка на шлифованной поверхности подложки. Отмеченные недостатки ограничивают использование толстых плёнок для формирования пассивной части, особенно микрополосковых линий ГИС СВЧ в диапазоне частот выше 4 ГГц [2].

Тонкоплёночная технология основана на получении слоёв, используемых для формирования пассивных плёночных элементов, методами термического испарения исходных материалов в вакууме $1,33 \cdot 10^{-3} + 1,33 \cdot 10^{-4}$ Па (магнетронное или ионно-плазменное распыление мишени из исходного материала). Определённая конфигурация элементов при тонкоплёночной технологии обеспечивается методом трав-

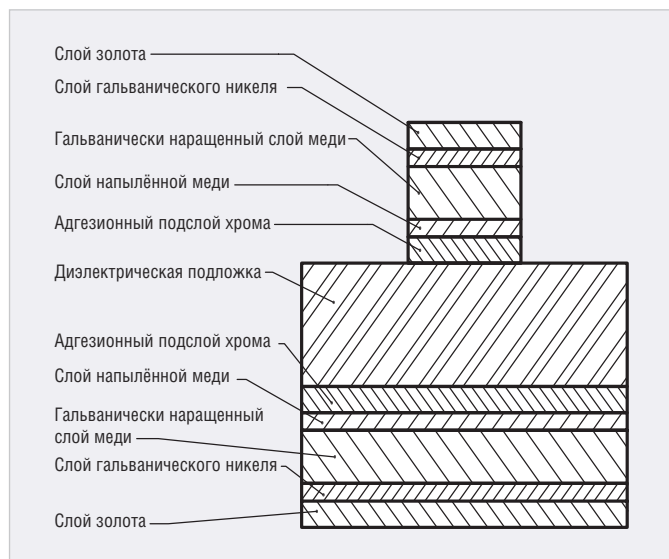


Рис. 1. Металлизационная структура проводников



Рис. 2. Технологическая схема комбинированного метода изготовления плат

ления [1]. При изготовлении плёночных элементов по обеим технологиям дополнительно применяются методы гальванического осаждения покрытий для обеспечения сварки и пайки в процессе сборки ГИС СВЧ. Тонкоплёночные ГИС СВЧ с толщиной проводников примерно 3...12 мкм, наиболее широко используемые в СВЧ-устройствах, обычно имеют сложную металлизационную структуру проводников (см. рис. 1), изготавливаемых на полированных подложках из таких материалов, как ситалл, поликор, сапфир, кварц и т.д. Тонкоплёночная технология позволяет получать более тонкие линии с шириной <20 мкм и точностью ± 3 мкм, что обеспечивает меньшие потери в сравнении с толстоплёночной. В связи с этим они используются на частотах до 30 ГГц и выше. Тонкоплёночные ГИС обеспечивают более высокую плотность монтажа и, следовательно, позволяют получить микросхемы с лучшими электрическими, массогабаритными и другими характеристиками [2].

Технологическая схема формирования пассивной части ГИС СВЧ включает следующие основные операции:

- химическая обработка подложек перед напылением;
- напыление резистивного слоя (одного или более);
- напыление контактных площадок;
- напыление проводящих слоёв меди на обе стороны подложки;
- фотолитография;
- гальваническое наращивание слоя меди;
- гальваническое осаждение слоя никеля;

- гальваническое осаждение слоя золота.

Перечисленные техпроцессы формирования пассивной части ГИС СВЧ позволяют реализовать сложные радиотехнические схемы, содержащие как низкоомные, так и высокоомные резисторы, микрополосковые линии на основе металлизационной структуры Cr, Cu, Ni, Au и контактные площадки для размещения навесных конденсаторов и транзисторов. Однако фотолитографические процессы имеют следующие особенности:

- напыляемый на обратную шлифованную поверхность подложки слой меди получается пористым, легко пропускает растворы на основе соляной кислоты, вследствие чего происходит травление нижнего подслоя хрома и ухудшение адгезии;
- при гальваническом осаждении слоёв никеля и золота наблюдается питтинг, из-за чего отсутствует адгезия золотого покрытия к никелевому и имеются проколы в напылённых слоях до поверхности керамической подложки, обусловленные её шероховатостью и дефектностью; при этом изготавливаемые ГИС СВЧ имеют низкий выход годных изделий.

Постановка задачи

Изготовление ГИС СВЧ по толстоплёночной технологии на полированной стороне обеспечивает возможность получения высокоомных (до 100 МОм) резисторов со стабильными параметрами при приемлемом разрешении проводящих линий. Однако данным способом невозможно изготовить схему с хорошими адгезионными свойства-

ми, поскольку для обеспечения высокой адгезионной прочности толстоплёночных покрытий требуется керамика с шероховатой поверхностью с размером микронеровностей 0,63 мкм и большим содержанием стекла (4–6%), а для тонкоплёночных покрытий – полированная керамика, имеющая высокий класс чистоты обработки поверхности подложки, с размером микронеровностей 0,02 мкм и малым содержанием стекла (0,1–0,3%).

Задачей настоящей работы является устранение противоречий между требованиями к тонким и толстым плёнкам при изготовлении ГИС СВЧ за счёт того, что на полированной стороне керамической подложки по тонкоплёночной технологии изготавливаются резисторы, МПЛ, контактные площадки, межсоединения и резисторы требуемых номиналов, а по толстоплёночной – экранный заземляющий слой на обратной шлифованной стороне. Такой метод изготовления ГИС СВЧ предъявляет более жёсткие требования к параметрам материалов, допускающих их совместное использование на одной подложке для получения металлизационных структур из тонких и толстых плёнок. Другой задачей является разработка технологии изготовления ГИС СВЧ, в соответствии с которой нижняя поверхность подложки металлизирована с помощью трафаретной печати (сеткографии) и служит заземляющим экранным слоем, а на верхнюю методом вакуумного напыления наносятся тонкоплёночные резисторы, контактные площадки, конденсаторы и межсоединения. Для соединения заземляющей нижней сторо-

Таблица 1. Физические свойства металлов

Металл	Температура плавления, °С	Удельное сопротивление, 10^{-8} Ом·м	КТР, 10^{-7}°C^{-1} в интервале температур +20...+200°С
Молибден	2610	5,2	54
Вольфрам	3380	5,5	46
Никель	1453	7,24	144
Медь	1083	1,72	165
Золото	1063	2,42	145
Серебро	961	1,6	191
Платина	1769	10,6	90
Палладий	1552	10,8	110

ны с верхней частью подложки по её краям (торцам) с помощью сеткографии наносится толстоплёночный соединительный проводящий слой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов для исследования возможности изготовления плат ГИС СВЧ комбинированным методом были использованы подложки из керамики ВК-94 (22ХС) и ВК-100 размером 30×48×1 мм, у которых лицевая сторона полировалась до получения микронеровностей порядка 0,02 мкм, а обратная до получения микронеровностей 0,63 мкм. На лицевой отполированной стороне подложки при помощи установки магнетронного напыления формировалась металлизационная структура Cr, Cu согласно технологической схеме формирования пассивной части ГИС СВЧ, после чего методом фотолитографии изготавливался топологический рисунок, а на обратную (отшлифованную) сторону подложки методом трафаретной печати наносился сплошной заземляющий металлизационный слой по толстоплёночной технологии. Технологическая схема комбинированного метода изготовления плат представлена на рисунке 2.

Для металлизации обратной стороны плат были опробованы пасты на основе молибдена с различными добавками. Металлизационный слой должен иметь высокую электропроводность и хорошую адгезию к поверхности подложки. Сопротивление МПЛ, изготавливаемых по толстоплёночной технологии методом сеткографии, главным образом определяется электропроводностью компонентов металлизационного слоя. При выборе материалов пасты для МПЛ металлическая составляющая должна гарантировать максимальную электропроводность, а темпе-

ратура плавления слоя должна обеспечивать возможность его вжигания на шлифованной стороне керамической подложки.

В таблице 1 приведены данные о физических свойствах некоторых металлов.

Из тугоплавких металлов наименьшим омическим сопротивлением характеризуется молибден, который и был взят в качестве основного компонента проводящего слоя ГИС СВЧ на шлифованной стороне подложки. Было исследовано влияние добавок в пасту, содержащую Мо, меди с низким удельным сопротивлением, кремния, стекла и MnTiO₃. Серебро и золото характеризуются наименьшим омическим сопротивлением, однако золото повышает стоимость проводников для ГИС СВЧ, а серебро снижает их долговечность, поэтому основная часть экспериментов проводилась с медью. В качестве добавки была использована более дешёвая медь и её закись, которая при обжиге восстанавливается до металла. Паста готовилась следующим образом: порошок Мо с добавкой 15% (вес.) MnTiO₃ и 5–20% (вес.) меди или закиси меди с величиной зерна 1...1,5 мкм смешивали с 20% (вес.) органической связки из смеси ланолина и циклогексанола. Полученные составы наносили на керамическую подложку методом сеткографии в виде дросселя (см. рис. 3) для определения электросопротивления проводников для ГИС СВЧ. Обжиг заготовок проводился в формирующем газе при температуре +900°С и окончательно при температуре +1330...+1350°С. Таким же способом наносили пасту на обратную сторону подложки.

Сначала проводилось исследование металлизационных составов с добавкой 5–15% (вес.) закиси меди (процентное соотношение даётся в расчёте на чистую медь). Проводники в виде дрос-

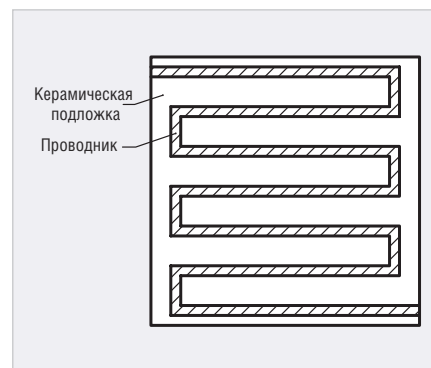


Рис. 3. Образец для определения электросопротивления проводника

Таблица 2. Сопротивление образцов проводников в виде дросселя в зависимости от состава металлизационных паст

Состав металлизационной пасты, % (вес.)	Сопротивление проводниковой линии в виде дросселя, Ом
20Мо+5Mn+70Ni+5 стекла	17,4
85Мо+15MnTiO ₃	10,4
80Мо+15MnTiO ₃ +5Cu	8,7
75Мо+15MnTiO ₃ +10Cu	8,0
70Мо+15MnTiO ₃ +15Cu	5,2
65Мо+15MnTiO ₃ +20Cu	8,8

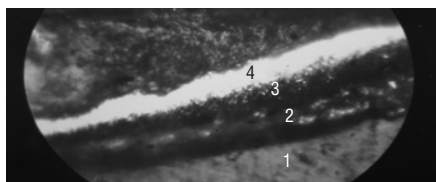
селя (змейки) готовили из пасты Мо, Mn с 2%-м содержанием Si, Мо-пасты с добавкой MnTiO₃ и добавками закиси меди. Длина дросселя составляла 68 мм, ширина – 180 мкм толщина – около 25 мкм. Замеры сопротивления проводили на приборе типа МО-62 с погрешностью не более 0,1%. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таким образом, как показывают результаты экспериментов, введение меди в состав металлизационной пасты обеспечивает снижение электросопротивления проводникового слоя металлизации в 1,2–2 раза по сравнению с известным составом без этих добавок. При этом электросопротивление проводников остаётся практически неизменным после испытаний в течение 2000 ч при T=+155°С и напряжении 300 В. Уменьшение электросопротивления проводников при добавлении в металлизационный состав меди можно объяснить следующим образом: медь, обладающая малым удельным сопротивлением, плавится при обжиге и заполняет поры в покрытии, образуя при этом непрерывную проводящую структуру с меньшим сопротивлением.

Увеличение электросопротивления проводника при введении 20% меди, очевидно, связано с тем, что при вжи-

Таблица 3. Адгезионная прочность металлизационных слоёв из различных паст

Состав металлизационной пасты	Адгезионная прочность, кг/см ²
Mo, стекло	300
Mo, Mn, Si, Cu	320
Mo, Mn, Si	250
Mo, Cu, стекло	330
Mo, Mn TiO ₃ , Cu	220



Примечание: 1 – керамика; 2 – металлизационный слой, нанесённый трафаретной печатью (сеткографией); 3 – слой никеля, осаждённый гальваническим способом; 4 – слой золота, осаждённый гальваническим способом.

Рис. 4. Микрошлиф торцевой части керамической подложки с нанесённым заземляющим проводником

гании пасты при $T=+1360^{\circ}\text{C}$ происходит более глубокое взаимодействие компонентов керамики в результате увеличения количества легкоплавкого компонента – меди.

На отшлифованную поверхность подложки также методом сеткографии наносили сплошной заземляющий слой из уже описанных паст и определяли адгезионную прочность на отрыв.

В таблице 3 представлены данные по адгезионной прочности металлизационных слоёв из различных паст.

Как видно из таблицы, наибольшей адгезионной прочностью обладает паста на основе Mo, Cu и стекла. В ГИС СВЧ большое значение имеет величина потерь СВЧ-энергии в микрополосковых линиях, в связи с чем проводились измерения этих потерь в металлизационных структурах, полученных толстоплёночным, тонкоплёночным и комбинированным (с лицевой стороны подложки – напыление, с обратной – трафаретная печать) методами. Для создания работоспособных плат ГИС СВЧ потери СВЧ-энергии в металлизационных структурах должны быть минимальными.

Измерения затухания мощности проводились на тест-платах (см. рис. 3) с помощью автоматического измерителя $K_{\text{СВЧ}}$ типа P2-47 в диапазоне частот 600–1200 МГц на фиксированных частотах через 200 МГц.

Были изготовлены тест-платы с различной металлизационной структу-

Таблица 4. Потери СВЧ-энергии в различных металлизационных структурах

Металлизационная структура	Сопротивление на постоянном токе, Ом	Потери СВЧ-энергии на частотах, дБ				Примечание
		600 МГц	800 МГц	1000 МГц	1200 МГц	
Cr, Cu; покрытие Au с двух сторон	1,42	0,33	0,53	0,81	0,39	Напыление с двух сторон
Cr, Cu; покрытие Au с лицевой стороны, Sn, Bi – с обратной	1,73	0,58	0,73	0,74	0,76	Напыление с двух сторон
Mo, стекло; покрытие Au с лицевой стороны, Sn, Bi – с обратной	8,14	3,43	3,45	3,69	3,71	Сеткография с двух сторон
Mo, Cu, стекло; покрытие Au с лицевой стороны, Sn, Bi – с обратной	5,71	3,39	3,36	3,47	3,54	Сеткография с двух сторон
Mo, Mn, Si; покрытие Au с лицевой стороны, Sn, Bi – с обратной	7,46	3,32	3,29	3,333	3,69	Сеткография с двух сторон
Mo, Mn, Si, Cu; покрытие Au с лицевой стороны, Sn, Bi – с обратной	6,16	2,84	2,84	3,05	3,18	Сеткография с двух сторон
Mo, MnTiO ₃ , Cu; покрытие Au с двух сторон	3,27	1,1	1,5	2,06	1,83	Сеткография с двух сторон
Mo, MnTiO ₃ , Cu; покрытие Sn, Bi с двух сторон	3,34	1,54	1,94	2,37	2,0	Сеткография с двух сторон
Cr, Cu; покрытие Au с лицевой стороны; Mo, Cu, стекло; покрытие Sn, Bi с обратной стороны	1,31	0,76	0,78	1,19	1,3	С лицевой стороны – напыление, с обратной – сеткография
Cr, Cu; покрытие Au с лицевой стороны; Mo, Mn, Si; покрытие Sn, Bi с обратной стороны	1,65	0,9	0,97	1,26	1,38	С лицевой стороны – напыление, с обратной – сеткография

рой, на которых проводились измерения $K_{\text{СВЧ}}$ и ослабления СВЧ-сигнала в МПЛ ($\alpha_{\text{изм}}$). Затухание СВЧ-энергии вычислялось по формуле:

$$\alpha = \alpha_{\text{изм}} - 10 \lg(K_{\text{СВЧ}} + 1) \times 2 / 4K_{\text{СВЧ}}$$

Измерялось также сопротивление микрополосковой линии на постоянном токе с помощью цифрового омметра. Результаты измерений представлены в таблице 4.

По комбинированной технологии были изготовлены платы ГИС СВЧ. Металлизация обратной стороны и торцов плат производилась вжиганием пасты Mo, Cu, стекло, лицевой стороны – напылением Cr, Cu. Лицевая сторона и торцы плат покрывались золотом, обратная сторона – сплавом олово-висмут. Структура покрытий на торце показана на рисунке 4.

Сопротивление торцов на изготовленных платах составляло от 0,011 до 0,022 Ом. Адгезия напылённых слоёв находилась в пределах 230 ...360 кг/см² и в среднем составляла 300 кг/см². При вжигании пасты подложка подвергается воздействию высокой температуры (до +1350°C), что оказывает влияние на её свойства. В [4] исследовалось влияние высокой температуры (до +1500°C) на свойства подложек. Показано, что при температуре до +1350°C диэлектрическая проницаемость и

прочность керамики остаются без изменений. Класс чистоты обработки поверхности большинства подложек из керамики ВК-100 не изменяется, ухудшение шероховатости поверхности на некоторых подложках происходит в пределах одного класса. Чистота обработки поверхности подложек из керамики ВК-94 (22ХС) ухудшается на 1–2 класса. Таким образом, совмещение толсто- и тонкоплёночной технологий для создания ГИС СВЧ возможно на подложках из керамики ВК-100. На платах, изготовленных комбинированным методом, были собраны ГИС СВЧ с рабочей частотой до 4,3 ГГц, которые обеспечивали необходимые параметры и удовлетворяли требованиям ТУ на данное изделие.

Выводы


1. Наибольшую механическую прочность соединения металлизационного слоя с подложкой имеют пасты Mo, Cu, стекло (330 кг/см²) и Mo, Mn, Si, Cu (320 кг/см²).
2. Потери СВЧ-энергии в МПЛ, изготовленных по тонкоплёночной технологии, меньше, чем в МПЛ, изготовленных по комбинированной технологии, в среднем на 0,4 дБ (9%).
3. Потери СВЧ-энергии в МПЛ, покрытых золотом, меньше, чем в МПЛ, по-

крытых сплавом олово–висмут, в среднем на 0,35 дБ (10%).

4. Добавка меди в состав металлизационной пасты уменьшает сопротивление МПЛ в среднем на 30%.
5. Использование толстоплёночной и тонкоплёночной технологий для изготовления плат ГИС СВЧ возможно. Изготовленные платы обеспечивали работу модулей СВЧ в диапазоне частот 0,3...4,3 ГГц.
6. Учитывая, что при изготовлении плат ГИС СВЧ на обратной стороне подложки металлизационная структура, полученная методом трафаретной печати, имеет высокую адгезию

и низкие потери СВЧ-энергии, можно рекомендовать изготавливать платы ГИС СВЧ по комбинированной технологии. В дальнейшем целесообразно при напылении на лицевую сторону плат использовать резистивный слой в качестве адгезионного слоя, а для металлизации торцов и обратной стороны плат применять пасты, содержащие медь, такие как Mo, Cu, стекло и Mo, Mn, Si, Cu. С лицевой стороны и с торцов целесообразно производить покрытие металлизационного слоя золотом, а с обратной стороны – сплавом олово–висмут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Конструирование и технология плёночных СВЧ-микросхем. – М.: Советское радио, 1978. С.120–132.
2. Климачев И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ИС. Основы технологии и конструирования. – М.: Техносфера, 2006.
3. Хамер Д., Биггерс Дж. Технология толстоплёночных гибридных интегральных схем. – М.: Мир, 1975.
4. Непочатов Ю.К., Борыняк Л.А. Разработка методов повышения адгезии многослойных металлизационных покрытий к диэлектрическим подложкам. Высокие технологии. 2006. № 2. С.16–19. 

НОВОСТИ МИРА

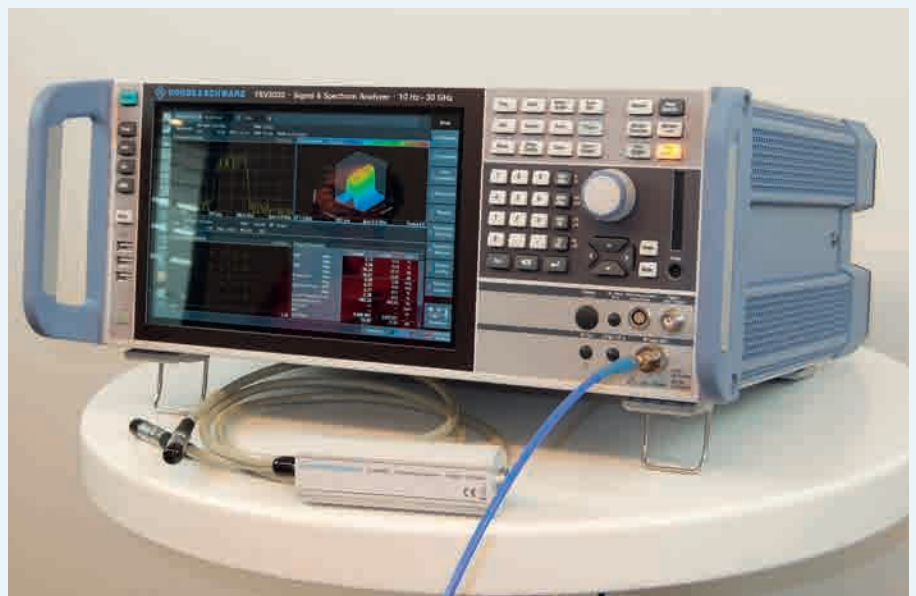
НОВЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СПЕКТРА R&S FSV3000 и R&S FSVA3000

Новые анализаторы спектра R&S FSV3000 и R&S FSVA3000 – это высокоскоростной анализ для лабораторных и производственных испытаний, а также идеальное решение для стандарта 5G NR. Представленные приборы заинтересуют инженеров-разработчиков РЛС и спутниковых систем связи, где требования к рабочей частоте сигнала и полосе анализа очень высоки.

Анализатор R&S FSV3000 разработан, чтобы помочь пользователям максимально просто и быстро задать конфигурацию сложных измерений. Благодаря простоте использования и высокой скорости измерений он идеально подходит для лабораторий и производственных линий. Анализатор обладает полосой анализа до 200 МГц – достаточной, например, для захвата сразу двух несущих стандарта 5G NR.

Анализатор R&S FSVA3000 с полосой анализа до 400 МГц, широким динамическим диапазоном и выдающимся уровнем фазового шума –120 дБн/Гц обеспечивает производительность, ранее доступную только для оборудования высшего класса. Пользователи смогут выполнять более сложные измерения, такие как линейаризация усилителей мощности, захват коротких событий или определение характеристик сигнала с быстрой перестройкой частоты.

Оба анализатора, R&S FSV3000 и R&S FSVA3000, способны измерять значения EVM менее 1% для 100 МГц сигнала на частоте 28 ГГц. С учётом охвата диапазонов частот стандарта 5G NR до 44 ГГц эта возможность превращает данные анализато-



ры в идеальные приборы для анализа сигналов 5G NR.

Анализаторы спектра R&S FSV3000 и R&S FSVA3000 упрощают анализ редких событий и настройку сложных измерений. С помощью графического интерфейса на основе запуска по событию при появлении заранее заданного критерия выполняется соответствующее действие, например, сохранение снимка экрана или захват IQ – автоматически устанавливается ряд параметров, таких как центральная частота, полоса обзора частот или опорная амплитуда, а в случае импульсного сигнала – параметры стробирования развертки. Для измерений на соответствие стандарту, таких как ACLR или SEM, функция автоматических измерений выберет соответствующую таблицу параметров стандарта.

Анализаторы спектра R&S FSV3000 и R&S FSVA3000 обеспечивают интеллектуальное управление генератором сигналов,

что может быть очень удобно, если в измерительную ВЧ-установку входит генератор сигналов компании R&S. Изменения настроек анализатора передаются непосредственно в генератор, кроме того, на экране анализатора можно даже отобразить пользовательский интерфейс генератора, что позволяет пользователям управлять всей измерительной установкой с одного экрана. Функции регистратора команд SCPI анализатора и генератора можно объединить.

Анализаторы спектра R&S FSV3000 и R&S FSVA3000 предназначены для высокоскоростной работы в автоматизированных тестовых системах. Оба прибора прекрасно взаимодействуют с облачной обработкой данных. Опциональный сетевой интерфейс со скоростью 10 Гбит/с позволяет передавать I/Q-данные в сеть даже при высоких частотах дискретизации, которые требуются при анализе широкополосных сигналов, например, для стандарта 5G.

Rohde & Schwarz