

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КМПП С ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧАСТОТОЙ 18 ГГц МАТЕРИАЛЫ, КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ

К.Джуринский, к.т.н. kbd.istok@mail.ru

Надежность и параметры СВЧ-изделий микроэлектроники в значительной степени определяются КМПП (коаксиально-микроразъемными переходами). И хотя отечественные КМПП с предельной частотой 18 ГГц серийно выпускаются уже более 30 лет, возможности их не исчерпаны – можно повысить надежность и увеличить предельную частоту до 26–27 ГГц. Поэтому использование материалов с улучшенными характеристиками, совершенствование конструкции и разработка новых технологических приемов сегодня так же актуальны, как и несколько десятилетий назад.

Отечественные КМПП с предельной частотой 18 ГГц представляют собой коаксиальные соединители присоединительного ряда IX, они соответствуют стандарту ГОСТ РВ 51914. КМПП являются аналогами зарубежных соединителей типа SMA. КМПП с предельной частотой 18 ГГц – соединители СРГ50-751ФВ ("Град" по названию ОКР) – серийно выпускаются с начала 1980-х годов на предприятии ПО "Октябрь" (ныне ФГУП "ПО "Октябрь"), г.Каменск-Уральский. КМПП производит несколько отечественных предприятий:

- СРГ50-751ФВ (ВРО.364.049ТУ) – ФГУП "ПО "Октябрь", г. Каменск-Уральский;
- КРПГ.434511.015 (КРПГ.434511.015 ТУ) – ОАО "НПП "Исток" им. А.И.Шокина", г.Фрязино;
- ПКМ2-18-02Р-0,6/3-1, ПКМ2-18-02Р-0,6/3-2, ПКМ2-18-02Р-0,6/2,3-01, ПКМ2-18-02Р-0,6/2,3-2 (ЖНКЮ.434541ТУ) – НПФ "Микран", г.Томск;
- СК9-РБМГП-Х-1-063, СК9-РБМГП-Х-1-157 (ТУ 6313-006-38970729-11) – ООО "Амитрон Электроникс", г.Москва;
- СРГ 50-751 ИрФВ (ФИМД.430421.001ТУ) – ОАО "Иркутский релейный завод".

Эти герметичные КМПП с рабочим диапазоном частот 0–18 ГГц показаны на рис.1.

КОНСТРУКЦИЯ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Отечественные КМПП в части общих технических условий соответствуют ГОСТ 20465-85, а по присоединительным размерам – ГОСТ 20265-83 и более новому стандарту ГОСТ РВ 51914-2002 (тип IX, вариант 1, "розетка"). Основные параметры отечественных КМПП рассмотрены в работах [1, 2]. Все КМПП имеют типовую конструкцию, в них применена коаксиальная линия размерами 4,1/1,27 мм, заполненная фторопластом (рис.2).

В соединителе СРГ50-751ФВ гнездовой проводник с цанговыми контактами крепится при помощи буртика на его конце, который опирается на торец фторопластового изолятора. При толщине буртика 0,3 мм, диаметре 1,8 мм и неизменном внутреннем

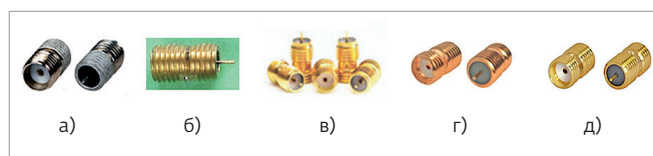


Рис.1. Отечественные КМПП: СРГ50-751ФВ (а); КРПГ.434511.015 (б); ПКМ2-18-02Р-0,6/3-2, ПКМ2-18-02Р-0,6/2,3-2 (в); СК9-РБМГП-Х-1-063, СК9-РБМГП-Х-1-157 (г); СРГ 50-751 ИрФВ (д)

диаметре корпуса обеспечивается требуемое волновое сопротивление 50 Ом. Сам же фторопластовый изолятор крепится в корпусе пуклевкой в трех точках.

ФТОРОПЛАСТОВЫЙ ИЗОЛЯТОР

Во всех отечественных КМПП в качестве материала изолятора применяется фторопласт марки Ф-4 (ГОСТ 10007-804 и ТУ6-05-810-88), что обусловлено редким сочетанием его физических и химических свойств (ГОСТ 10007-80, ТУ6-05-810-88) [3-6].

Основные физические и химические свойства фторопласта Ф-4:

- низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь ($2 \cdot 10^{-4}$) и диэлектрической проницаемости (менее 2,1) на частоте 10 ГГц, практически не зависящие от частоты и температуры;
- высокая электрическая прочность (50 кВ/мм) и удельное объемное сопротивление ($1,5 \cdot 10^{17}$ Ом·см);
- большой коэффициент термического расширения (КТР), среднее значение – $1,1 \cdot 10^{-4}$ 1/°С;
- чрезвычайно высокая химическая стойкость ко всем минеральным и органическим кислотам, щелочам, органическим растворителям, газам и другим агрессивным средам. Разрушение материала наблюдается лишь при воздействии расплавленных щелочных металлов;
- отличные антифрикционные свойства, исключительно низкий коэффициент трения (менее 0,1);
- высокая теплостойкость и морозостойкость в диапазоне температур от -200 до 250°С. Максимальная рабочая температура при эксплуатации – 260°С, минимальная не должна быть ниже -269°С;
- хорошо обрабатывается механическими способами.

Недостатки фторопласта Ф-4:

- низкая радиационная стойкость;
- недостаточные твердость и стойкость к истиранию;
- токсичность при нагреве до высоких температур;
- хладотекучесть – пластическая (необратимая) деформация материала даже при комнатной температуре под действием собственного веса и небольших напряжений. С повышением температуры деформация увеличивается;
- сложность изготовления высокоточных деталей.

Политетрафторэтилен (PTFE), фторополимер, тефлон, или фторопласт – это полимер тетрафторэтилена, разработанный в 1938 году Роем Планкеттом, компания DuPont. Торговая марка этого материала, зарегистрированная компанией, – "Тефлон". В нашей стране этот материал

называется фторопластом. Для изготовления изоляторов радиочастотных соединителей широко применяют фторопласт-4. Фторопласт-4 – полукристаллический полимер с температурой плавления 327°С. При нагреве выше этой температуры исчезает кристаллическая структура, и фторопласт превращается в аморфный прозрачный материал с температурой разложения свыше 415°С (при разложении выделяется токсичный фтор).

Фторопласт-4 перерабатывают в изделие методом предварительного прессования заготовок с последующим спеканием при температуре 360–390°С, а изоляторы для радиочастотных соединителей изготавливаются преимущественно механической обработкой. Обработка фторопласта-4 имеет особенности, связанные с его физико-механическими свойствами, которые определяют технологические режимы обработки и геометрию режущего инструмента [3-5].

Во-первых, низкая теплопроводность фторопласта (более чем на три порядка ниже, чем у конструкционной стали) препятствует рассеиванию теплоты и служит причиной нагрева обрабатываемого материала.

Во-вторых, большой коэффициент термического расширения (в 10–15 раз больше, чем у конструкционной стали) является причиной искажения линейных размеров обрабатываемой детали и отрицательно сказывается на точности изготовления.

К тому же КТР фторопласта сильно зависит от температуры. При низких температурах (от -60 до -10°С) КТР изменяется мало и равен в среднем $8 \cdot 10^{-5}$ 1/°С. Начиная с температуры -10°С, КТР резко возрастает, достигая при 20°С максимума – $25 \cdot 10^{-5}$ 1/°С, а затем снова резко падает до $11 \cdot 10^{-5}$ 1/°С

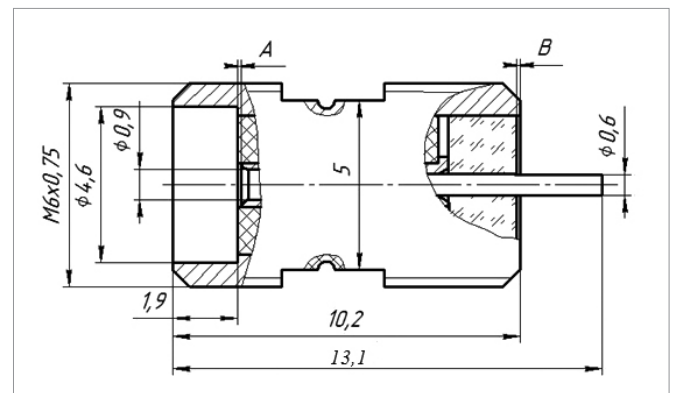


Рис.2. Конструкция базового соединителя SRG50-751FB. Допуски на размеры соответствуют ГОСТ 20265-83

при 50°C. При дальнейшем повышении температуры КТР возрастает ступенчато: в промежутке от 100 до 120°C – до $15 \cdot 10^{-5}$ 1/°C, а в интервале от 200 до 210°C – до $21 \cdot 10^{-5}$ 1/°C. При повышении температуры с 25 до 50°C линейные размеры детали увеличиваются на 0,31%, а при снижении температуры от 25°C до нуля уменьшаются на 0,5%.

Кроме того, при температуре 19,6°C во фторопласте происходит переход одной кристаллической модификации в другую. Вследствие этого резко меняется КТР фторопласта, и увеличивается объем детали – увеличение может достигать 1,5%. Поэтому обработка фторопласта и контроль размеров должны проводиться при постоянной температуре (23 ± 2) °C. Перед измерением геометрических размеров деталей из фторопласта необходима их выдержка при температуре измерения в течение не менее 4 ч. При контроле размеров механическим измерительным инструментом следует учитывать, что результаты измерения искажаются, если инструмент создает давление на измеряемую деталь.

Считается, что стабильно обеспечить допуски на размеры деталей из фторопласта можно только в диапазоне $\pm 0,1$ мм [3]. Но для изоляторов КМПП с низким уровнем КСВН такие допуски неприемлемы. Поясним это положение. Для уменьшения КСВН необходимо, чтобы изолятор плотно прилегал к стенкам корпуса соединителя и охватывал гнездовой проводник, не выступал бы выше проточки в корпусе (размер А на рис.2), но и не был бы ниже ее более чем на 0,10–0,15 мм (идеальный случай, когда торец изолятора на одном уровне с проточкой). Если диаметр изолятора занижен, то возможно его выдергивание из корпуса соединителя при сочленениях с кабельным соединителем. А усилить крепление изолятора в корпусе, увеличивая глубину пуклевки, не представляется возможным из-за опасности прорыва стенки корпуса в этом месте и увеличения КСВН. Анализ показывает, что для создания КМПП высокого качества необходимо, чтобы точность изготовления фторопластовых изоляторов была 0,03–0,05 мм, что является достаточно сложной технической задачей.

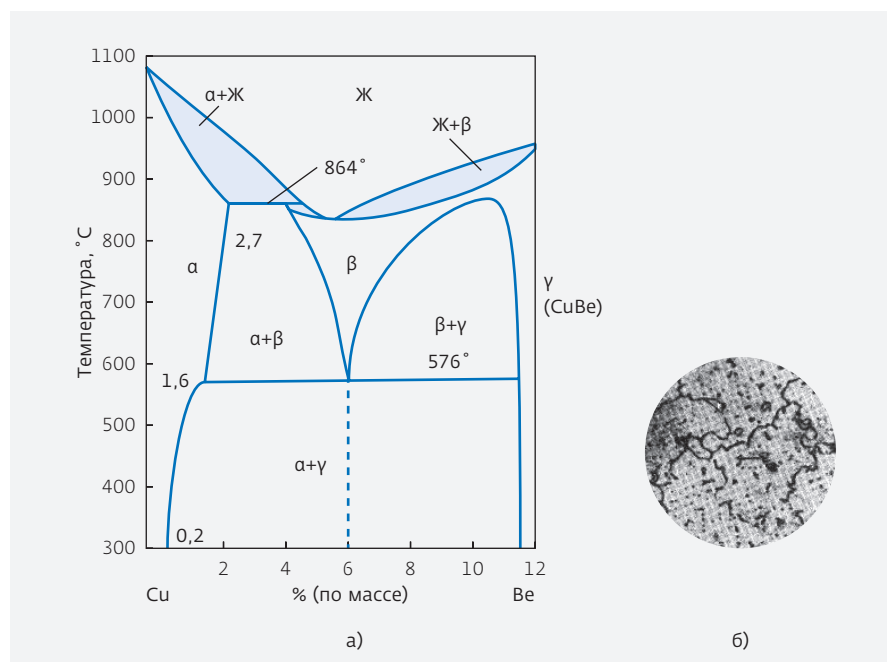


Рис.3. Диаграмма состояния системы Cu–Be (а); микроструктура бериллиевой бронзы БрБ2 после закалки и отпуска, видны включения фазы CuBe по границам и внутри зерен α -фазы (б). Увеличение в 250 раз

ГНЕЗДОВОЙ ПРОВОДНИК

Гнездовые проводники с цанговыми контактами для радиочастотных соединителей во всем мире изготавливаются исключительно из бериллиевой бронзы (2,0% бериллия (Be) и 98% меди (Cu)). Марка этой бронзы за рубежом – CuBe2, alloy 25, C17200, отечественная – БрБ2 [8]. Применение бериллиевой бронзы обусловлено ее высокой электропроводностью, твердостью, упругостью, прочностью и коррозионной стойкостью. Бронза характеризуется повышенным сопротивлением усталости, ползучести, износу, а также морозостойкостью.

Бериллиевая бронза относится к классу дисперсионно-упрочняемых сплавов, характерной особенностью которых является зависимость растворимости легирующих компонентов от температуры. Согласно диаграмме состояния медь-бериллий (рис.3а), бронза состоит из твердого α -раствора бериллия в меди, β -фазы и γ -фазы соединения CuBe [8, 9].

Растворимость бериллия в меди ограничена и значительно уменьшается с понижением температуры. Это позволяет проводить упрочняющую термическую обработку – закалку и искусственное старение (отпуск) бериллиевой бронзы. При закалке с температуры 770–780°C из однофазной α -области в твердом растворе фиксируется избыточное количество

атомов бериллия по сравнению с равновесным состоянием для данной системы, и структура бронзы представляет собой пересыщенный α -твердый раствор. Пересыщенный твердый раствор термодинамически неустойчив и быстро распадается в интервале температур 380–500°C. Поэтому скорость охлаждения при закалке должна быть большой (бериллиевую бронзу закалывают погружением в воду). Резкое охлаждение до комнатной температуры сохраняет концентрацию бериллия в твердом растворе. Медленное же охлаждение приводит к частичному распаду пересыщенного раствора и локализации выделений γ -фазы по границам зерен, что вызывает охрупчивание бронзы и снижает эффект упрочнения при последующем старении. В закаленном состоянии бериллиевая бронза отличается высокой пластичностью (30–40%) и хорошо деформируется.

При последующем нагреве до температур 320–340°C в течение 2–5 ч (отпуск или искусственное старение) происходит упрочнение бронзы в результате распада пересыщенного α -твердого раствора и образования выделений γ -фазы в форме пластинок толщиной 5–10 нм (рис.3б). После закалки и отпуска бронза приобретает повышенные

упругость (предел упругости 1000 МПа) и прочность (предел прочности 1250 МПа).

Знание рассмотренных особенностей материала необходимо изготовителям гнездовых проводников с цанговыми контактами. В случае недостаточного упрочения материала гнездового проводника не обеспечиваются требуемые по техническим условиям на КМПП контактное сопротивление, усилие соединения с ответным штыревым кабельным соединителем и количество циклов их соединения и разъединения. Если же гнездовой проводник имеет повышенную жесткость и низкую упругость, то он с большим усилием надевается на центральный вывод из сплава 29НК, спаянный со стеклянным изолятором (см. рис.2), иногда даже срезая стружку с поверхности вывода. Повышенное усилие передается стеклянному изолятору, и возникающие в нем напряжения приводят к появлению радиальных трещин в стекле, распространяющихся от вывода к середине изолятора.

Возможен и другой дефект гнездовых проводников – продольные микротрещины в ламелях цанговых контактов. Эти микротрещины трудно увидеть после механической и термической обработки гнездовых проводников, но после их очистки и гальванического покрытия они хорошо

видны под микроскопом при увеличении в 12–16 раз. По нашему мнению, причина образования микротрещин – низкое качество исходной проволоки из бериллиевой бронзы. Материал для изготовления гнездовых проводников – проволока ДКРНТ 2БТ БрБ2 по ГОСТ 15834-77. Обозначения: Д – холоднодеформированная, КР – круглая форма сечения, Н – нормальная точность изготовления, Т – твердая в состоянии поставки, БТ – поставляется в мотках, бухтах. Согласно ГОСТ 15834-77, поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин. Не допускаются поверхностные риски, раковины, пузыри, вмятины глубиной, превышающей предельные отклонения по диаметру. Однако контроль внешнего вида проволоки разрешено проводить без применения увеличительных приборов. Дефекты, обнаруженные на поверхности проволоки, допускается зачищать до полного исчезновения, а за величину дефекта принимают разность диаметров проволоки в месте зачистки и рядом с ним. Естественно, что такой контроль не позволяет обнаружить расслоения и трещины, видимые лишь при увеличении в 12–16 раз. Поэтому для проволоки из бериллиевой бронзы, применяемой в радиочастотных соединителях, необходимо ужесточить требования к дефектам внешнего вида и методам их контроля.

СТЕКЛЯННЫЙ ИЗОЛЯТОР И МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫЕ СПАИ

Герметичность КМПП, точную установку фторопластового изолятора и гнездового проводника обеспечивает стеклянный изолятор, спаенный с корпусом соединителя и с центральным проводником. Выступающий из корпуса КМПП конец центрального проводника соединяют с микрополосковой платой изделия, второй его конец внутри корпуса предназначен для цангового соединения с гнездовым проводником КМПП. На высоких частотах наибольшая доля потерь КМПП приходится на стеклянный изолятор, так как диэлектрические потери преобладают над потерями проводимости. Поэтому толщина изолятора, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь стекла должны быть как можно меньше. Отечественная промышленность выпускает только одну марку стекла с приемлемой диэлектрической проницаемостью (5,2 на частотах выше 10 ГГц) – это боросиликатное стекло марки С52-1 с коэффициентом термического расширения

$52 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$. В связи с этим корпус перехода придется изготавливать из сплава 29НК (он образует согласованный спай со стеклом С52-1) или из стали 15Х25Т (сжатый спай с этим стеклом), а центральный проводник – только из сплава 29НК.

К точности размеров стеклянного изолятора и к качеству металлостеклянных спаев изолятора с корпусом и центральным проводником КМПП предъявляют высокие требования. Допуски на размеры изолятора должны быть не больше 0,03–0,04 мм.

При этом недопустимы:

- выступание изолятора из корпуса;
- расположение изолятора "заподлицо" с корпусом или его "утопание" в корпусе (размер В на рис.2) более, чем на 0,2 мм. По нашим данным, этот размер оказывает существенное влияние на КСВН соединителя;
- мениски на торцевых поверхностях изолятора и наплывы стекла на центральном проводнике и на внутренней поверхности корпуса. Наплыв стекла на центральном проводнике создает дополнительную неоднородность вследствие образования зазора между торцом цангового контакта и стеклянным изолятором, а также из-за раскрытия ламелей гнездового контакта при его насадке на центральный проводник;
- неплоскостность поверхности изолятора;
- трещины, сколы и пузыри в стекле.

По внешнему виду стеклянного изолятора опытный специалист может сделать заключение о качестве соединителя. Размеры изолятора формируются в процессе пайки металлостеклянного корпуса с применением графитовой оснастки. Качество спаев определяют размеры исходной таблетки стекла. Ее изготавливают из стандартных стеклянных капилляров. Обычно эти капилляры сортируют по наружному диаметру и, в зависимости от диаметра, нарезают алмазным диском на таблетки требуемой высоты. Такая "ручная" технология не обеспечивает необходимой точности и воспроизводимости размеров изоляторов. Производственная же технология изготовления стеклянных таблеток должна включать бесцентровую шлифовку стеклянных капилляров по наружному диаметру, сборку набора отшлифованных капилляров, резку набора на заготовки с припуском по высоте, наклеивание заготовок на планшайбу плоскошлифовального станка и шлифовку в размер по торцевым поверхностям. Такая технология обеспечивает точность размеров таблеток ± 25 мкм и идентичность таблеток разных партий.

Таблица 1. Свойства покрытий зарубежных радиочастотных соединителей

Материал покрытия	Состав, % масс.	Толщина, мкм	Износостойкость	Микротвердость, HV	Коррозионная стойкость	Паяемость
Никель электролитический	Ni 99,9	1–10	Низкая	300–400	Высокая	Пайка не рекомендуется
Химический никель (Sudocur)	Ni–P (10,5–13)	1–5	Очень высокая	600–1000	Очень высокая	Пайка не рекомендуется
Твердое золото	Au–Ni (0,3)	0,2–1,3	Очень высокая	–	Очень высокая	Очень высокая
Серебро	Ag 99,9	2–10	Низкая	90–120	Высокая	Очень высокая
“Белая” бронза (Sucoplate 31, Optalloy, White Bronze, Miralloy и др.)	Cu 55 Sn 25–30 Zn 15–20	1–4	Низкая	600–700	Низкая	Пайка не рекомендуется
Sucoplate 30 (Optargen)	Sucoplate – Ag	Ag 2 Sucoplate 0,5	Низкая	600–700	Низкая	Очень высокая
Sucopro	Au–Ni (0,3), Ni–P	Au–Ni (0,1–0,3), Ni–P (2–5)	Очень высокая	600	Очень высокая	Очень высокая
AuroDur	Au–Ni–P	Au 0,15, Ni–P (2–3,5)		–		
Стандартное золотое покрытие	Au–Ni	Au 0,8 Ni (2–3,5)	Низкая	–	Очень высокая	Очень высокая

За рубежом широко применяют изоляторы из спеченного порошкового стекла, особенность которого – закрытая пористость. В связи с этим оно имеет повышенную термостойкость, несколько меньшую диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь и выдерживает большие напряжения без образования трещин. Однако спеченные таблетки, изготавливаемые отечественными предприятиями, имеют слишком большие допуски на размеры – до 0,15 мм. Кроме того, непрозрачное порошковое стекло не позволяет осуществлять контроль внутренних дефектов и напряжений в стекле оптическими методами, применяемыми для монолитного стекла.

ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КМПП

Состав и свойства покрытий наружных и внутренних проводников КМПП существенно влияют на основные параметры соединителей, их надежность

и сохраняемость. К покрытиям предъявляют следующие требования [3, 10]:

- низкое и стабильное переходное контактное сопротивление;
- высокая износостойчивость;
- высокая коррозионная стойкость;
- температурная стойкость;
- хорошая паяемость;

Таблица 2. Состав и свойства покрытий отечественных КМПП

Элементы КМПП	Покрытие	Износостойкость	Коррозионная стойкость	Паяемость	Предприятие
Корпус	М1.НЗ.Зл-Ко(99,9)З	Очень высокая	Очень высокая	Очень высокая	ОАО "НПП "Исток" им. А.И.Шокина [1]
Гнездовой проводник				–	
Центральный проводник				Очень высокая	
Корпус	М1.ХимНЗ.Зл-Ко(99,9)З	Очень высокая	Очень высокая	Очень высокая	ОАО "Иркутский релейный завод" [2]
Гнездовой проводник				–	
Центральный проводник				Очень высокая	
Корпус	НЗ.О-Ви(99,7)6	Низкая	Низкая	Очень высокая	ФГУП "ПО "Октябрь" www.neywa.ru
Гнездовой проводник	М1.Ср-Су(99,9)6	Очень высокая	Высокая	–	
Центральный проводник	НЗ.О-Ви(99,7)6	Низкая	Низкая	Очень высокая	
Корпус	НЗ.О-Ви(99,7)З	Низкая	Низкая	Очень высокая	НПФ "Микран" www.micran.ru
	Н1.Зл-НЗ	Очень высокая	Очень высокая		
Гнездовой проводник	Н1.Зл-НЗ	Высокая	Очень высокая	–	
Центральный проводник	НЗ.О-Ви(99,7)З	Низкая	Низкая	Очень высокая	
	Н1.Зл-НЗ	Очень высокая	Очень высокая		
Корпус	Н2.Зл-Ко. (99,9) 0,8; НЗ.Зл-Ко(99,9) 0,5; НЗ.Зл-Ко(99,9)1,27	Высокая	Высокая	Очень высокая	ООО "Амитрон Электроникс" www.amel.ru
Гнездовой проводник	Н2.Зл-Ко. (99,9) 0,8; НЗ.Зл-Ко(99,9) 0,5; НЗ.Зл-Ко(99,9)1,27	Высокая	Высокая	–	
Центральный проводник	Н2.Зл-Ко. (99,9) 0,8 НЗ.Зл-Ко(99,9) 0,5; НЗ.Зл-Ко(99,9)1,27	Высокая	Высокая	Очень высокая	

- немагнитность (для специальных применений);
- оптимальное соотношение цена/качество;
- экологичность, отсутствие в составе покрытия свинца и других вредных веществ (соответствие директиве RoHS – Restriction of Hazardous Substances).

Состав и основные свойства покрытий, применяемых в зарубежных соединителях, представлены в табл.1 [3, 10].

За рубежом не прекращаются работы по совершенствованию покрытий радиочастотных соединителей. При разработке новых покрытий стремятся сохранить преимущества золота, но уменьшить толщину его слоя.

Состав и основные свойства покрытий, применяемых в отечественных КМПП, представлены в табл.2.

В отечественных КМПП применяют следующие покрытия: сплавы золото-кобальт, серебро-сурьма и палладий-никель для гнездовых проводников, золото-кобальт и олово-висмут для корпусов и центральных проводников. По совокупности свойств лучшим покрытием, по нашему мнению, является золотое покрытие Ni.Зл-Ко (99,9)3 – сплав золото-кобальт с подслоем гальванического никеля. Барьерная прослойка никеля уменьшает пористость финишного покрытия. Применение в качестве подслоя химического никеля может привести к внутренним напряжениям в покрытии и повышению его твердости.

Электролитически нанесенный сплав золото-кобальт образует твердое (микротвердость более 190 кгс/мм²) износостойкое покрытие с низким контактным сопротивлением (0,4 мОм) [10].

Покрытие серебро-сурьма с подслоем меди, даже несмотря на самую высокую электрическую проводимость, очень низкое контактное сопротивление, достаточную износостойкость и высокую паяемость, нельзя признать оптимальным, так как при хранении оно реагирует с серой и фосфором и темнеет из-за образования сульфидов серебра. Для замены серебряных покрытий можно использовать сплав палладий-никель (80% палладия) толщиной 6 мкм. Его электропроводность хуже, чем у серебряного и золотого покрытий, но оно имеет высокую износостойкость и коррозионную стойкость, а также значительно лучшую паяемость по сравнению с чистым никелевым покрытием.

Покрытие олово-висмут не применяется даже в самых дешевых зарубежных КМПП из-за опасности образования хрупких интерметаллидов, низкой износостойкости и коррозионной стойкости. В серийно выпускаемых отечественных

соединителях СРГ-50-751ФВ, а также в КМПП НПФ "Микран" корпус и центральный проводник, который соединяют в изделиях с микрополосковой платой, покрывают этим сплавом.

Общепризнано, что лучшим является золотое покрытие. Однако высокая стоимость и дефицитность золота предопределили направленность работ за рубежом на уменьшение толщины золотого покрытия и его замену на менее дефицитные покрытия. В 2011 году цена золота достигла рекордных высот – более 1000 долл. за унцию, и это обстоятельство заставило задуматься над проблемой уменьшения влияния цены драгметалла в соединителях на цену изделий, в которых они применяются [11].

Для уменьшения толщины золотого покрытия есть и физические предпосылки.

Во-первых, в процессе пайки припоями, содержащими олово, золотое покрытие полностью растворяется в жидком припое с образованием хрупких интерметаллических соединений AuSn, AuSn₂, AuSn₄. Специалисты компании Huber+Suhner показали, что прочность паяного соединения уменьшается при увеличении количества золота и что для предотвращения хрупкости паяного соединения количество золота в паяном шве должно быть менее 3% масс.[3]. Прочность спая с покрытием Suropro (толщина золота 0,15 мкм) была на 10-20% выше, чем в случае золотого покрытия толщиной 0,8 мкм. Таким образом, стремление компаний – производителей радиочастотных соединителей уменьшить толщину золотого покрытия продиктовано не только соображениями экономии дорогостоящего и дефицитного золота, но и необходимостью повышения надежности паяных соединений.

Во-вторых, толщина покрытия должна быть соизмерима с толщиной скин-слоя. С увеличением

частоты его толщина уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из частоты. Для золота на частоте 1 ГГц она равна 2,6 мкм, на частоте 10 ГГц – 0,85 мкм и на 18 ГГц – 0,61 мкм. Поэтому при повышении предельной частоты соединителей можно уменьшить толщину.

Однако имеются серьезные доводы и против уменьшения толщины золотого покрытия.

Во-первых, покрытие должно быть сплошным – полностью заполнять поверхность проводников с учетом ее неровностей. Чистота обработки поверхности проводников отечественных КМПП в лучшем случае определяется величиной $\sqrt{2,5}$, а на практике эта величина может быть больше – до $\sqrt{5}$. Поэтому уменьшение толщины покрытия возможно только при одновременном повышении чистоты обработки поверхностей проводников.

Во-вторых, непосредственное соединение центрального проводника с микрополосковой линией пайкой используют только в измерительной технике и в исследовательской практике. Его не применяют в производстве изделий микроэлектроники СВЧ, так как такое соединение не выдерживает испытания на термоциклы [1]. В производстве принято соединение микросваркой центрального проводника КМПП и микрополосковой линии тонкой золотой перемычкой. По нашим данным, для качественной микросварки толщина золотого покрытия должна быть не менее 2 мкм.

И наконец, есть сомнения в том, что очень тонкие золотые покрытия выдержат требуемые по техническим условиям сотни циклов сочленения-расчленения, а также жесткие климатические испытания.

Max Peel из Contech Research Inc. [11] исследовал проблему пористости и коррозии золотых покрытий с подслоем никеля. Проблема возникла в середине 1960-х годов в связи с уменьшением толщины золотого покрытия с 2,5–5 мкм до стандартной величины 1,27 мкм, а затем и до десятых долей микрона. Автор показал, что уменьшать толщину покрытия нужно с большой осторожностью. Очень тонкое покрытие неприемлемо для радиочастотных соединителей, если количество циклов соединения-рассоединения более 10 и если соединители работают при жестких условиях окружающей среды.

Хотя соединители типа "Град" выпускаются в нашей стране уже более 30 лет, работа по их совершенствованию не должна прекращаться. Прежде

всего, использованы не все возможности коаксиальной линии этого соединителя. Коаксиальная линия размерами 4,1/1,27 мм, заполненная фторопластом, имеет предельную частоту 26–27 ГГц, а с выпускаемыми в настоящее время КМПП она работает на частотах только до 18 ГГц [12]. Для улучшения основных параметров и повышения надежности выпускаемых КМПП необходимо применение материалов с улучшенными свойствами, совершенствование технологий механической обработки и нанесения покрытий.

Автор выражает признательность главному специалисту НПП "Спецкабель" А.А.Прокимову за полезные критические замечания, сделанные при подготовке статьи к публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джуринский К.Б.** Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Изд. второе. – М: Техносфера, 2006.
2. **Герентьев А.П.** Отечественные герметичные коаксиально-микрополосковые переходы с сечением тракта 4,1/1,27 мм. – Компоненты и технологии, 2013, №4, с.46–48.
3. Suhner RF Connector Guide. 3rd. ed., 2003. Проспект фирмы.
4. **Сафронов А., Сафронов Л.** Прямоугольные электрические соединители. Основные принципы проектирования и изготовления деталей из фторопласта-4 методом механической обработки. – Технологии в электронной промышленности, 2013, №6, с. 56–62.
5. **Аскадский А.А., Матвеев Ю.И.** Химическое строение и физические свойства полимеров. – М: Химия, 1983.
6. **Горяинова А.В., Божков Г.К., Тихонова М.С.** Фторопласты в машиностроении. – М: Машиностроение, 1971.
7. Механическая обработка фторопласта. ЗАО "Фторопластовые технологии". – www.ftoroplast.com.ru.
8. Свойства и применение бериллиевых бронз. – www.nbt08.ru/menu/bronze.
9. **Лактин Ю.М.** Металловедение и термическая обработка металлов. 3-е изд. – М.: Металлургия, 1983.
10. **Джуринский К.Б.** Покрытия радиочастотных соединителей. – Производство электроники, 2008, №1, с.67–71.
11. Porosity: Real World Concerns. By Max Peel, Senior Fellow, Contech Research. – www.connectorsupplier.com11.
12. **Джуринский К.Б.** Соединители SMA с предельной частотой до 27 ГГц. – Современная электроника, 2013, №9, с.28–35.