

Особенности конструирования и технологии изготовления соединителей мм-диапазона длин волн

К. Джуринский, к.т.н.¹

УДК 621.389 | ВАК 2.2.2

Приведены основные параметры соединителей мм-диапазона длин волн (далее – мм-диапазона) с верхней частотой применения от 34 до 145 ГГц, выпускаемых компаниями США, Европы и Юго-Восточной Азии. Проанализированы проблемы конструирования соединителей мм-диапазона: точность размеров коаксиальной линии соединителей, материалы и технология изготовления опорной диэлектрической шайбы и герметичных металlostеклянных СВЧ-вводов мм-диапазона.

СОЕДИНИТЕЛИ ММ-ДИАПАЗОНА

К настоящему времени за рубежом разработаны радиочастотные соединители более 55 серий. Соединители мм-диапазона занимают около 20% от этого количества. Созданы 10 серий соединителей мм-диапазона (в скобках приведена верхняя частота их применения в ГГц): 0.8 mm (145), 1.0 mm (110), SMPs (100), 1.35 mm (90), 1.85 mm (65), Mini SMP (65), 2.4 mm (50), 2.9 mm (40), SMP (40) и 3.5 mm (34). Среди них семь серий прецизионных резьбовых соединителей и три серии защелкиваемых соединителей: SMP, Mini SMP и SMPs.

Соединители мм-диапазона выпускают большое число компаний США, Европы и Юго-Восточной Азии. Наиболее сложные соединители 1.0 mm в настоящее время производят более 15 компаний: SV Microwave/Amphenol, Pasternack Enterprises, Signal Microwave (США), Spinner, Rosenberger (Германия), Radiall (Франция), две тайваньские компании Bo-Jiang и Frontlynk, южнокорейская компания Withwave, две малоизвестные у нас компании Китая: Mechanc и Talent Microwave и др.

В табл. 1 приведены обобщенные значения их параметров по данным data sheet ряда зарубежных компаний: Rosenberger, Signal Microwave, Spinner, SV Microwave/Amphenol и др. [1, 2].

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЕЙ ММ-ДИАПАЗОНА

Теоретическая предельная частота, $f_{пред.}$, при которой в коаксиальной линии соединителя с внутренним диаметром наружного проводника D , диаметром центрального проводника d и диэлектрической проницаемостью

изолятора ϵ еще не возникают нежелательные волны высшего типа, равна [1]:

$$f_{пред.} \approx \frac{190,85}{\sqrt{\epsilon(D+d)}}.$$

Поэтому для повышения предельной частоты соединителей мм-диапазона необходимо было уменьшить размеры коаксиальной линии и от коаксиальной линии, заполненной твердым диэлектриком (обычно фторопластом), перейти на воздушную линию.

С ростом предельной частоты воздушная коаксиальная линия соединителей 3.5 mm, 2.9 mm, 2.4 mm, 1.85 mm, 1.35 mm, 1.0 mm и 0.8 mm становилась все меньше и меньше, а задача закрепления в ней внутреннего проводника все сложнее и сложнее. Возникла необходимость решить ряд проблем.

Точность размеров коаксиальной линии соединителей

С ростом частоты допуски на размеры наружного и внутреннего проводников коаксиальной линии уменьшаются до 5–7 мкм (табл. 2) [1].

Для прецизионных соединителей мм-диапазона возрастают требования и к чистоте поверхности проводников коаксиальной линии. Соединители мм-диапазона должны иметь микроскопически гладкие поверхности коаксиальной линии с высотой микронеровностей по 7–8 классам чистоты.

Требования к точности размеров и чистоте поверхности в полной мере относятся также и к соединителям SMP, Mini SMP и SMPs.

Опорная диэлектрическая шайба

Для закрепления внутреннего проводника воздушной коаксиальной линии соединителей мм-диапазона были

¹ АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», kbd.istok@mail.ru.

созданы опорные диэлектрические шайбы [3]. В опорной шайбе закрепляют внутренний проводник концентрично наружному проводнику, а саму шайбу фиксируют в корпусе соединителя.

Опорная шайба является неоднородностью и вносит рассогласование в коаксиальную линию соединителя, так как снижает возможность распространения в ней без отражения и потерь основной Т-волны. В результате этого ухудшаются электрические параметры соединителя и снижается его предельная частота. Чтобы получить приемлемые параметры соединителя, необходимо компенсировать изменение геометрии его коаксиальной линии. Для расчета оптимальной конструкции диэлектрической шайбы используют программы 3D-моделирования и расчета СВЧ-структур, такие как ANSYS® HFSS™ и CST Microwave Studio®.

С ростом частоты возрастают КСВН и потери соединителей, а их опорные шайбы становятся все более миниатюрными. Выбор материала опорной диэлектрической шайбы определяется электрическими параметрами соединителя (рабочий диапазон частот, КСВН, вносимые потери) и технологией закрепления в ней внутреннего проводника коаксиальной линии соединителя. Кроме того, материал опорной шайбы должен быть формоустойчивым и обеспечивать длительную стабильность ее размеров.

Для изготовления опорной шайбы применяют следующие полимеры: Kel-F81, Teflon, Ultem 1000, PEEK, Kapton, Noryl EN265, Rexolite 1422 [3]. В зарубежных и отечественных мм-соединителях наиболее широко применяют Ultem 1000 – аморфный термопластичный полимер, имеющий высокие механическую прочность (близкую к прочности металлов и керамических материалов), термостойкость, химическую и радиационную стойкость. Он сохраняет свои механические свойства при температуре до 170 °С. Детали, изготовленные из Ultem 1000, отличаются длительной стабильностью размеров [2, 3]. Диэлектрические свойства Ultem 1000 лишь незначительно изменяются в широком диапазоне температур: –65...200 °С и частот: 1–100 ГГц. Опорные шайбы из Ultem 1000 и других полимеров изготавливают механической обработкой на автоматизированных обрабатывающих центрах.

По нашему мнению, перспективным материалом опорных шайб является PEEK – термопластичный полимер с частично кристаллической структурой, в котором удачно сочетаются малый вес, высокие механические свойства, приближающиеся к свойствам металлов, химическая и радиационная стойкости, стабильность размеров и приемлемые диэлектрические свойства при температурах до 260 °С [3]. PEEK имеет наилучшие среди всех термопластичных полимеров стабильность размеров и радиационную стойкость к гамма- и рентгеновскому излучениям. Изделия из PEEK изготавливают механической

обработкой, плавлением в прессформах, экструзией, а также 3D-печатью.

Полимер PEEK благодаря удачному сочетанию физических и технологических свойств оказался востребованным в мм-соединителях Rosenberger, Radiall и некоторых других компаний [4]. В нашей стране АО «Соединитель» (г. Миасс) при разработке кабельных соединителей с предельной частотой 40 ГГц была создана оригинальная технология точного литья опорной шайбы из полимера PEEK совместно с установленным в ней внутренним проводником коаксиальной линии [4].

Важнейшее значение при сопряжении соединителей мм-диапазона вилки и розетки имеет правильная концентричность проводников их коаксиальных линий [5]. Концентричность показывает, насколько сбалансированными и центрированными являются вилка и розетка. В идеале, концентричность должна составлять 100%. Без достаточной концентричности правильное сопряжение невозможно, а повреждение соединителей неизбежно. Поэтому необходим постоянный контроль концентричности.

Герметичность соединителей мм-диапазона

Требование герметичности предъявляют только к составным коаксиально-микрополосковым переходам, СВЧ-вводам и выводам энергии. Степень герметичности характеризуется величиной скорости натекания гелия через соединитель. Скорость натекания отечественных и зарубежных герметичных радиокомпонентов для микроэлектроники СВЧ должна быть не более $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ ($1,3 \cdot 10^{-8} \text{ cc/s}$ за рубежом). Это самый высокий уровень герметичности – вакуумная плотность. Контроль герметичности осуществляют масс-спектрометрическим способом при помощи гелиевого течеискателя.

Герметичные СВЧ-вводы применяют в составных соединителях (field replaceable connectors – соединители, заменяемые в полевых условиях). Составные соединители мм-диапазона представляют собой сочетание миниатюрного СВЧ-ввода и собственно соединителя, часто называемого «СВЧ-разъемом», с цанговым соединением между ними (рис. 1) [1, 2].

Волновое сопротивление стандартных СВЧ-вводов принято равным $(50 \pm 2) \text{ Ом}$, прецизионных вводов – $(50 \pm 1) \text{ Ом}$ [1]. Погрешности величин КСВН и волнового сопротивления зависят от ряда факторов: допусков на диаметры проводников, эксцентриситета их взаимного расположения, зазоров между проводниками и изолятором, шероховатости поверхностей проводников, изменения величины диэлектрической проницаемости стекла, формы свободных поверхностей стеклянного изолятора [9–11].

Чем меньше геометрические размеры СВЧ-ввода и, следовательно, чем выше его предельная частота, тем более жесткими должны быть требования к точности

Таблица 1. Параметры соединителей мм-диапазона

Типы соединителей	3.5 mm	2.92 mm	SMP	2.4 mm	Mini SMP	1.85 mm	1.35 mm	SMPS	1.0 mm	0.8 mm
Верхняя частота применения, ГГц	34	40-45	40	50	65	67	90	100	110	145
Диаметр центрального проводника, мм	1,52	1,27	0,85	1,042	0.64	0,803	0,598	–	0,434	0,35
Диаметр наружного проводника, мм	3,5	2,92	2,72	2,4	2,05	1,85	1,35	–	1,0	0,8
Диаметр штыря вилки, мм	0,92	0,92	0,40	0.511	0,28	0,511	0,290	0,23	0,250	–
Максимальный КСВН в рабочем диапазоне частот	1,22	1,25	1,50	1,50	1,50	1,35	1,67	1,25****	1,92	1,67
Величина потерь, дБ, в рабочем диапазоне частот, f, ГГц	≤0,01vf	≤0,04vf	≤0,1vf	≤0,05vf	≤0,1vf	≤0,05vf	≤0,05vf	≤0,12vf	≤0,05vf	0,70
Рабочее напряжение, В	500	250	335	150	325	150	150	250	150	150
Диапазон рабочих температур, °C	–40.. 125	–65...165	–65...165	–40...85	–65...165	–55...125	–40...85	–55...165	–40...85	–54..125
Допустимое количество соединений и рассоединений	≥ 500	≥ 500	≥ 100* ≥ 500** ≥ 1000***	≥ 500	≥ 100* ≥ 500***	≥ 500	≥ 3000	≥ 100* ≥ 500***	≥ 500	≥ 500
Экранное затухание, дБ, на частоте f, ГГц	–90 (26,5)	–90	–65 (3–26,5) –80 (3,0)	–(120 –f)	–65 (3–65) –80 (0–3)	–(120 –f)	–90	–	–100	–

Примечания: * Количество соединений и рассоединений при полном защелкивании; ** Количество соединений и рассоединений при ограниченном защелкивании; *** Количество соединений и рассоединений при скользящем соединении; **** Величина КСВН на частоте 65 ГГц.

Таблица 2. Размеры коаксиальной линии соединителей мм-диапазона

Типы соединителей	Диаметры проводников коаксиальной линии соединителей и штыря кабельной вилки, мм		
	наружный	внутренний	штыря кабельной вилки
3.5 mm	3,5±0,005	1,52±0,01	0,93 _{-0/025}
2.9 mm	2.9±0,05	1,27±0,007	0,93 _{-0/025}
2.4 mm	2.40±0,05	1,042±0,01	0,516 _{-0,014}
1.85 mm	1,85±0,007	0,803±0,007	0,511 _{-0,014}
1.35 mm	1.35 ±0,007	0,598±0,007	0,290 _{-0,005}
1.0 mm	1,0±0,007	0,434 ±0,005	0,250 _{-0,005}

его изготовления. При этом большее внимание следует уделять точности изготовления центрального проводника ввода. Так, например, в составных соединителях 1.0 mm диаметр центрального проводника СВЧ-ввода равен всего 0,15 мм или 150 мкм, что только в два-три раза больше диаметра человеческого волоса. Для таких размеров допуск составляет относительно большой процент от самого размера проводника.

Влиянием эксцентриситета на волновое сопротивление СВЧ-ввода, применяемого в качестве самостоятельного элемента, можно пренебречь. Однако если ввод используется в составном соединителе, эксцентриситет приводит к появлению отражений из-за неточности совмещения с «СВЧ-разъемом».

Величина и форма менисков стекла на торцевых поверхностях ввода также влияют на параметры СВЧ-ввода. В отличие от низкочастотных вводов, в СВЧ-вводах торцевая поверхность стекла должна быть плоской и не иметь формы мениска. Стекло не должно выступать за пределы наружного проводника ввода.

Шероховатость поверхности проводников влияет на их поверхностное сопротивление (из-за удлинения пути токов).

Волновое сопротивление зависит также от величины диэлектрической проницаемости стеклянного изолятора. Причинами изменения диэлектрической проницаемости являются ее частотная зависимость, колебание химического состава стекла разных партий, наличие в стекле неоднородностей и газовых пузырей. Такие пузыри в монолитном стекле возникают в процессе его пайки с металлом при наличии загрязнений и при перегреве.

В качестве материала диэлектрика СВЧ-вводов применяют также спеченное порошковое стекло, особенностью которого является закрытая пористость. Из-за этого диэлектрическая проницаемость порошкового стекла



Рис. 1. Коаксиально-микрополосковый переход с внутренним металлостеклянным спаем (а), составной соединитель (б), СВЧ-вводы (в)

меньше, чем у монолитного стекла такого же состава, и существенно зависит от величины пористости. Изоляторы из порошкового стекла имеют более высокую термостойкость и выдерживают большие механические напряжения. Однако, в отличие от прозрачного монолитного стекла, при применении непрозрачного порошкового стекла пропадает возможность контроля в стекле внутренних дефектов и напряжений оптическими способами, что важно для изделий повышенной надежности.

Величина КСВН зависит также от способа применения СВЧ-ввода: правильности его установки в корпус изделия и соединения с микрополосковой линией. Основной способ установки СВЧ-вводов в корпуса изделий – низкотемпературная пайка эвтектическими припоями олово-свинец, олово-золото. Необходимо, чтобы ввод был установлен заподлицо с поверхностью корпуса изделия и не выступал за нее. Состав покрытия корпуса в месте

установки, а также размеры компенсационной ступеньки определяет сам потребитель.

Герметичные СВЧ-вводы являются широко востребованными компонентами элементной базы микроэлектроники СВЧ.

В настоящее время многие зарубежные компании освоили производство соединителей 1.0 mm с верхней частотой применения 110 ГГц, и несколько компаний уже начали выпускать соединители 0.8 mm с верхней частотой применения 145 ГГц.

В нашей стране предприятия «Микран» и «Таир» (г. Томск) в последние годы разработали соединители 2.4 mm (предельная частота 50 ГГц) и 1.85 mm (предельная частота 65 ГГц). Уверенно наращивает производство соединителей мм-диапазона АО «Завод Атлант» (г. Изобильный), в номенклатуре продукции которого появились розетки кабельные и вилки приборные Mini SMP и резьбовые соединители с предельной частотой 65 ГГц – аналоги соединителей компании Rosenberger.

Пока это еще единичные соединители, составляющие малую часть номенклатуры зарубежных аналогов. К тому же отечественные соединители, по-видимому, выполнены с использованием зарубежного полимера Ultem 1000 для изготовления опорных диэлектрических шайб и стекла Corning 7070 с низкой диэлектрической проницаемостью для изготовления СВЧ-вводов.

В ближайшее время предстоит еще решить немало проблем, чтобы создать в стране серийное производство соединителей мм-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джуринский К.Б.** Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры // Под ред. д.т.н. Борисова А.А. СПб: Изд-во ЗАО «Медиа Группа Файнстрит», 2014. 428 с.
2. **Джуринский К., Павлов С., Морозов О.** Отечественные радиочастотные соединители мм-диапазона длин волн // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 3. С. 154–168.
3. **Кишинский А.А., Журинский К.Б.** Твердотельные усилители СВЧ диапазона. Новые радиочастотные соединители. М.: ООО «Ваш Формат», 2022. 432 с.
4. **Джуринский К.Б.** Радиочастотные соединители, адаптеры и кабельные сборки. М.: ООО «Ваш Формат», 2018. 400 с.
5. **Джуринский К.** Современная отечественная база коаксиальных радиокомпонентов для модулей и блоков СВЧ // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2023. № 7. С. 122–131.
6. **Tumbaga C., Anritsu Co.** Connectors with a diameter of 0.8 mm allow for coaxial measurements in the D-Band Coaxial Measurements. Reprinted with permission of Microwave Journal® from the March 2019 issue.
7. **Андросов А., Журинский К.** Герметичные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Зарубежная и отечественная продукция // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 6. С. 64–72.
8. **Андросов А., Журинский К.** Герметичные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Электрические параметры и методика их измерения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 5. С. 84–90.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1960 руб.

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ. КРАТКИЙ КУРС «БЕЛОЙ МАГИИ»

Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.

Под общей редакцией А. И. Белоуса

В монографии рассмотрены основные теоретические и практические аспекты проектирования быстродействующих электронных устройств «по полной цепочке» – от верхнего системного уровня иерархии до уровня базовых элементов и плат.

Книга ориентирована на широкий круг читателей: студентов, аспирантов, преподавателей технических университетов, инженеров, специализирующихся в области разработки и организации производств различного рода радиоэлектронных устройств, приборов и систем, к которым предъявляются требования обеспечения высокой скорости обработки и передачи данных.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2020. – 872 с.,
ISBN 978-5-94836-500-8

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



ТЕХНОЛОГИИ для микро- электроники

вакуумное напыление

плазмохимическое травление

дисковая резка и обработка

фотолитография

термические процессы

подготовка пластин

испытания

аналитика

измерения



**Разработка и производство
технологического оборудования**



**Поставка зарубежного оборудо-
вания и комплексных технологий**



**Разработка и внедрение совре-
менных технологий**



**Модернизация и сервисное
обслуживание технологического
оборудования**