

СВЧ-соединители мм-диапазона. Материалы для опорных диэлектрических шайб

К. Джуринский, к. т. н.¹, А. Андросов²

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Проанализированы особенности конструкции соединителей мм-диапазона длин волн и требования к материалам для изготовления опорных диэлектрических шайб этих соединителей. Приведены технические характеристики полимеров, из которых изготавливают опорные шайбы, и статистические данные применения полимеров восьми марок в мм-соединителях более 30 компаний США, Европы и Юго-Восточной Азии. Рассмотрены также возможности применения отечественных полимеров в соединителях мм-диапазона.

ОПОРНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ШАЙБА КАК ВАЖНЕЙШИЙ ЭЛЕМЕНТ ММ-СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Создание соединителей миллиметрового диапазона длин волн (далее – мм-соединители) началось в середине 1970-х годов и продолжается и сейчас. Для повышения предельной частоты необходимо было уменьшить размеры коаксиальной линии соединителей и перейти с линии, заполненной твердым диэлектриком, на воздушную линию [1]. Но с переходом на воздушную линию возникла проблема закрепления внутреннего проводника соединителя. Для ее решения были созданы опорные диэлектрические шайбы. В опорной шайбе закрепляют внутренний проводник концентрично относительно наружного проводника, а саму шайбу надежно фиксируют в корпусе соединителя.

Однако опорная шайба является неоднородностью и вносит рассогласование в коаксиальную линию соединителя, так как снижает возможность распространения в ней основной Т-волны без отражения и потерь. В результате этого ухудшаются параметры линии и снижается предельная частота соединителя. Поэтому необходимо компенсировать изменение геометрии коаксиальной линии и эффективную диэлектрическую проницаемость опорной шайбы. Оптимально сконструировать диэлектрическую шайбу можно в программах 3D-моделирования и расчета СВЧ-структур, таких как ANSYS® HFSS™ [2] или CST Microwave Studio®.

СОЕДИНИТЕЛИ ММ-ДИАПАЗОНА

К соединителям мм-диапазона относятся соединители, верхняя частота применения которых более 30 ГГц: 3.5 mm (33 ГГц), 2.92 mm (40 ГГц), 2.4 mm (50 ГГц), 1.85 mm (65 ГГц), 1.0 mm (110 ГГц) [1]. В последние годы

компания Anritsu разработала соединители 0.8 mm с рабочим диапазоном частот 0–145 ГГц [3]. Наряду с соединителями общего применения существуют прецизионные соединители мм-диапазона, в том числе инструментальные и метрологические, без которых невозможно создание радиоизмерительной аппаратуры.

Так как с ростом частоты соединители становятся все более миниатюрными, то возрастают потери и КСВН. Поэтому усилия разработчиков направлены на повышение точности изготовления и чистоты поверхности проводников коаксиальной линии, применение более совершенных покрытий, а также на выбор материалов и разработку технологии изготовления диэлектрической опорной шайбы оптимальной конструкции.

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ШАЙБЫ

Эти требования определяются техническими характеристиками соединителей, для которых они предназначены:

- **Предельная частота соединителя.**

Соединители мм-диапазона принято обозначать по величине диаметра наружного проводника их воздушной коаксиальной линии [1]. Диаметр опорной шайбы, как правило, немного больше диаметра этого проводника. Сравнительные размеры опорных шайб мм-соединителей показаны на рис. 1.

Материал опорной шайбы должен быть формоустойчивым и обеспечивать длительную стабильность ее размеров.

- **Технологические проблемы.**

Изготовление миниатюрной опорной шайбы достаточно сложной конструкции и закрепление в ней внутреннего проводника, а самой шайбы – в наружном проводнике коаксиальной линии – являются сложной и трудно разрешимой задачей. Методом литья

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

² АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина», alex-1@mail.ru.

под давлением можно обеспечить одновременное изготовление шайбы и закрепление в ней внутреннего проводника. Для этого потребуются простые литые формы и дополнительная механическая обработка, чтобы обеспечить точные размеры. Поэтому в большинстве случаев шайбы изготавливают механической обработкой на автоматизированных обрабатывающих центрах.

- **Обеспечение стабильного низкого уровня КСВН и прямых потерь соединителя.**

Для этого материал опорной шайбы должен иметь как можно более низкие величины эффективной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{эфф}$) и тангенса угла диэлектрических потерь ($tg \delta$) в широком диапазоне температур и частот.

- **Рабочий диапазон температур соединителя.**

Температурный диапазон применения материала опорной шайбы должен быть больше, чем у соединителя, в который она будет установлена. Для многих ответственных применений соединители должны работать в диапазоне температур от -60 до 120 °С.

- **Радиационная стойкость соединителя.**

Радиационная стойкость соединителя (специально назначения) определяется радиационной стойкостью материала его опорной шайбы.

ПОЛИМЕРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ШАЙБ

Аморфные и полукристаллические полимеры

Для изготовления опорных диэлектрических шайб соединителей мм-диапазона применяют аморфные и полукристаллические термопластичные полимеры. Эти полимеры характеризуются следующими параметрами: температурой стеклования и температурой плавления.

Стеклование – это процесс, происходящий в аморфных полимерах, цепи которых не выстроены в упорядоченные кристаллы, а расположены произвольным образом. При охлаждении полимера ниже температуры стеклования (T_g) он становится твердым и хрупким, как стекло. При превышении температуры T_g аморфные полимеры переходят из жестко-упругого и хрупкого состояния в гибкое и эластичное. При этом изменяются их свойства, резко снижаются механическая прочность и формоустойчивость [4].

Плавление происходит в кристаллических полимерах, при этом цепочки полимера выпадают из соответствующих кристаллических структур и становятся неупорядоченной жидкостью. При достижении температуры плавления полимер переходит из твердого агрегатного состояния в жидкое

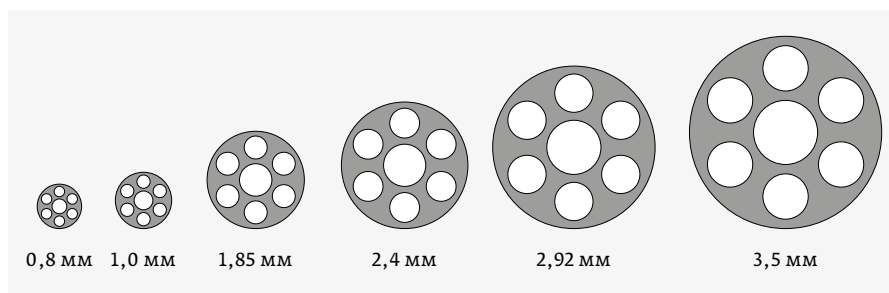


Рис. 1. Опорные диэлектрические шайбы мм-соединителей

и теряет свою кристаллическую структуру. Так как в кристаллических полимерах содержится некоторая доля вещества в аморфном состоянии, их называют полукристаллическими. Полукристаллические полимеры имеют как температуру стеклования, так и температуру плавления. Но важно понимать, что аморфная часть полимера претерпевает только стеклование, а его кристаллическая часть претерпевает только плавление [4].

Полукристаллические полимеры после достижения температуры T_g все еще продолжают сохранять определенную механическую прочность в связи с наличием в их структуре кристаллических областей. Поэтому полукристаллические полимеры хорошо подходят для изготовления деталей, подвергающихся механическим нагрузкам.

Температуры стеклования и плавления определяются жесткостью цепей и прочностью межмолекулярного взаимодействия полимеров. При выборе полимера желательно, чтобы его температура стеклования лежала вне рабочего диапазона температур соединителя.

Зарубежные полимеры для изготовления опорных диэлектрических шайб соединителей мм-диапазона представлены в табл. 1.

Технические характеристики полимеров

Основные механические, тепловые, электрические, а также диэлектрические (на частоте 1 МГц) характеристики полимеров приведены в табл. 2.

Ultem 1000. Полиэфиримидные материалы (PEI) серии Ultem были разработаны в начале 1980-х годов компанией General Electric, ныне входящей в состав компании Sabic Corporation (Саудовская Аравия) [7, 8]. Одним из лучших материалов этой серии является Ultem 1000.

Ultem 1000 – неармированный аморфный термопластичный полупрозрачный полимер янтарно-желтого цвета, имеющий высокие механическую прочность (близкую к прочности металлов и керамических материалов), термостойкость, химическую и радиационную стойкости. Материал негорючий и нетоксичный. Он сохраняет свои механические свойства при температурах до 170 °С. Детали, изготовленные из Ultem 1000, отличаются длительной стабильностью размеров.

Таблица 1. Полимеры, применяемые в соединителях мм-диапазона

Класс полимеров	Тип полимера	Сокращенное обозначение	Марка наиболее применяемого полимера	Структура полимера
Фторполимеры	PolyChloroTriFluoroEthene (полихлортрифторэтен)	PCTFE	Kel-F81	Полукристаллическая
	Polytetrafluoroethylene (политетрафторэтилен)	PTFE	Teflon	Полукристаллическая
Полиимиды	Polyetherimide (полиэфиримид)	PEI	Ultem 1000	Аморфная
	Polyimide (полиимид)	PI	Каптон	Полукристаллическая
Полимеры других классов	Polyphenylene Oxide (полифениленоксид)	PPO	Noryl EN265	Аморфная
	PolyEtherEtherKetone (полиэфирэфиркетон)	PEEK	-	Полукристаллическая
	Cross linked polystyrene (полистерен)	PS	Rexolite 1422	Полукристаллическая
	Polyoxymethylene (полиоксиметилен), Polyacetal (полиацеталь)	POM	Derlin	Полукристаллическая

Диэлектрические свойства Ultem 1000 лишь незначительно изменяются в широком диапазоне температур от -65 до 200 °C и частот от 1 до 10^{10} Гц (рис. 2) [8].

Ultem 1000 отвечает большинству требований к материалам опорных диэлектрических шайб, и поэтому его наиболее широко применяют в мм-соединителях.

В нашей стране в мм-соединителях компаний «Микран» и «Таир» для изготовления опорных шайб также используется Ultem 1000 [9].

Noryl EN265 – зарегистрированная торговая марка компании Sabic аморфного термопластичного полимера, состоящего из полифениленоксида (PPO) и полистерена (PS). Добавление полистирола позволило снизить температуру стеклования PPO с 210 до 120 – 130 °C. Noryl EN265 – химически стойкий, легкий полимер черного цвета.

Материал характеризуется высокой прочностью, стойкостью к ударным нагрузкам, формоустойчивостью, высоким сопротивлением ползучести, имеет небольшое влагопоглощение и невысокий коэффициент термического расширения. Для изготовления деталей из Noryl EN265 применяют технологии литья под давлением и экструзии, а также все виды механической обработки [10].

Rexolite 1422 – полупрозрачный полукристаллический полимер полистерен, разработанный компанией C-Lec Plastics для применения в СВЧ-технике [11]. Диэлектрические свойства Rexolite 1422 стабильны в диапазоне температур от -270 до 176 °C и в широком диапазоне частот от 1 МГц до более 50 ГГц. У него отсутствует остаточная деформация и пластическое течение при температуре 100 °C.

Этот материал отличается высокой радиационной стойкостью: после воздействия дозы 1000 Мрад диэлектрические потери и другие свойства не претерпевают существенных изменений.

Kel-F81 (торговая марка компании 3M) – полукристаллический гомополимер из серии фторполимеров PCTFE. Компания Daikin производит его под торговой маркой Neoflon™ PCTFE [5]. Степень кристалличности этого полимера (40 – 80%) зависит от скорости охлаждения в процессе его производства. От других фторполимеров Kel-F81 отличается низкой хладотекучестью, высокой стабильностью размеров и исключительно высокой влагостойкостью (см. табл. 2) [12]. Однако большая величина тангенса угла диэлектрических потерь ограничивает применение этого полимера случаями, когда потери СВЧ-соединителя не являются критической величиной.

Детали из Kel-F81, как и из всех других полимеров серии PCTFE, изготавливают литьем под давлением и экструзией с последующей механической обработкой, а также механической обработкой всех видов. В настоящее время этот полимер выпускают зарубежные компании в виде лент, листов, трубок и стержней. Стоимость Kel-F81 приблизительно в шесть раз больше стоимости широко применяемого полимера PTFE («Фторопласт-4»).

PEEK – термопластичный полимер серого цвета с частично кристаллической структурой ($\sim 40\%$), в котором удачно сочетаются малый вес, высокие механические свойства, приближающиеся к свойствам металлов, химическая и радиационная стойкости, стабильность размеров и приемлемые

Таблица 2. Основные технические характеристики полимеров, применяемых в производстве соединителей мм-диапазона

Свойства	Ultem 1000	Noryl EN265	Rexolite 1422	Kel-F81	PEEK	PTFE
Удельный вес, г/см ³	1,27	1,08	1,05	2,13	1,32	2,1
Температура стеклования, °С	217	123	114	170	143	165
Температура плавления, °С	382	>225	120	212	340	340
Твердость по Роквеллу	109	119	130	110	100	>50
КТР (-20...150 °С), 1/°С	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$
Теплопроводность, Вт/м·К	0,18	0,19	0,15	0,19	0,25	0,25
Диэлектрическая проницаемость	~3,1 (рис. 2)	2,7	2,53	2,6	3,2	2,1
Тангенс угла потерь	$\sim 6 \cdot 10^{-4}$ (рис. 2)	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$	$40 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Поверхностное сопротивление, Ом/квадрат	$1 \cdot 10^{17}$	$>4 \cdot 10^{15}$	$>4,5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$>1 \cdot 10^{14}$	$>1 \cdot 10^{16}$
Напряжение пробоя, кВ/мм	32,7	19,6	19,7	>20	20	24
Радиационная стойкость, Мрад	1 000	50	1 000	50	2 000	0,5
Влагопоглощение, %	0,25	0,07	<0,05	<0,01	0,14	<0,01
Диапазон рабочих температур, °С	-65...170	-40...130	-60...100	-200...190	-60...260	-269...260
Сортамент поставляемого материала	Гранулы, стержни Ø4,8-150 мм, пластины 6,3-70 мм	Гранулы, стержни Ø3,2-203 мм, пластины 0,8-152 мм	Стержни Ø1,5-200 мм, пластины 0,25-150 мм	Гранулы, стержни Ø3,2-70 мм, пластины 3,2-70 мм	Гранулы, порошок, стержни Ø5,0-200 мм, пластины 5-120 мм	Стержни, ленты, трубки и плиты практически любых размеров
Способы обработки	Литье под давлением, экструзия, механическая обработка	Литье под давлением, экструзия, механическая обработка	Все виды механической обработки, резка лазером	Экструзия, литье под давлением, механическая обработка	Экструзия, литье под давлением, 3D-печать, механическая обработка	Все виды механической обработки
Источник информации	[5-8]	[5, 10]	[5, 11]	[5, 12]	[5, 13]	[5]

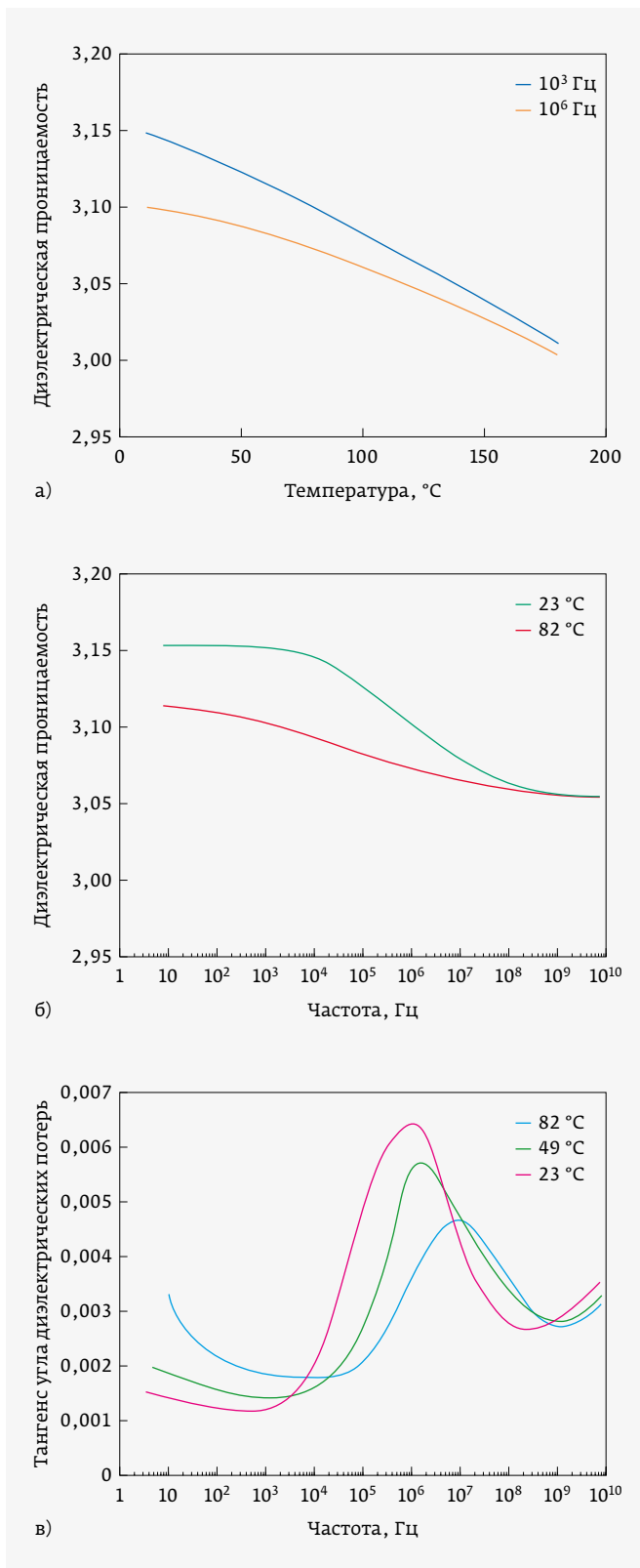


Рис. 2. Зависимости диэлектрической проницаемости от частоты (а) и температуры (б), тангенса угла диэлектрических потерь от частоты (в) материала Ultem 1000 при относительной влажности 50%

диэлектрические свойства при температурах до 260 °С [13]. РЕЕК имеет наилучшие среди всех термопластичных полимеров стабильность размеров и радиационную стойкость к гамма- и рентгеновскому излучениям. Коэффициент линейного термического расширения РЕЕК приблизительно в два раза меньше, чем у PTFE.

Изделия из РЕЕК изготавливают механической обработкой, плавлением в пресс-формах, экструзией, а также 3D-печатью. Этот полимер выпускают в виде порошка, гранул, стержней, листов, лент и трубок многие зарубежные компании, в том числе такие крупные, как Victrex, SABIC, Solvay.

PTFE, Teflon (торговая марка компании DuPont) – полукристаллический термопластичный политетрафторполимер, имеющий уникальные свойства [5, 13]. У него наименьшие величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот, высокие химическая стойкость и огнестойкость, широкий диапазон рабочих температур. Полимер PTFE является самым распространенным изоляционным материалом в конструкциях кабелей и соединителей сантиметрового диапазона длин волн.

Однако длительный опыт применения PTFE позволил выявить его некоторые серьезные недостатки:

- нестабильность геометрических размеров деталей из этого материала даже при отсутствии механической нагрузки из-за низкой твердости и высокой хладотекучести (склонности к деформации при постоянной температуре);
- при нагревании PTFE не переходит в вязко-текучее состояние, что исключает его обработку термопластическими способами;
- при температуре около 20 °С происходит структурная перестройка PTFE, приводящая к резкому увеличению коэффициента термического расширения;
- самая низкая из всех высокотемпературных полимеров радиационная стойкость. При дозе 0,5 Мрад он утрачивает до 44% своей прочности, а при дозе 5 Мрад становится хрупким и ломается при изгибе;
- значительное, порой необратимое, объемное расширение при воздействии высокой температуры, например, при пайке соединителей на кабель с изоляцией из PTFE.

Казалось бы, что из-за указанных недостатков PTFE не должен применяться в качестве материала опорных диэлектрических шайб мм-соединителей. Однако зарубежные компании применяют его для этой цели достаточно часто.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНЫХ ПОЛИМЕРОВ В ЗАРУБЕЖНЫХ мм-СОЕДИНИТЕЛЯХ

Результаты анализа применяемых материалов опорной диэлектрической шайбы мм-соединителей ведущих компаний США, Европы и Юго-Восточной Азии представлены в табл. 3.

МОНОЛИТ

www.monolit.by

ВИТЕБСКИЙ ЗАВОД РАДИОДЕТАЛЕЙ

**МНОГОСЛОЙНЫЕ
КЕРАМИЧЕСКИЕ
КОНДЕНСАТОРЫ**

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩАЯ ПРОДУКЦИЯ

для высоконадёжной аппаратуры

ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ

с положительным температурным
коэффициентом сопротивления

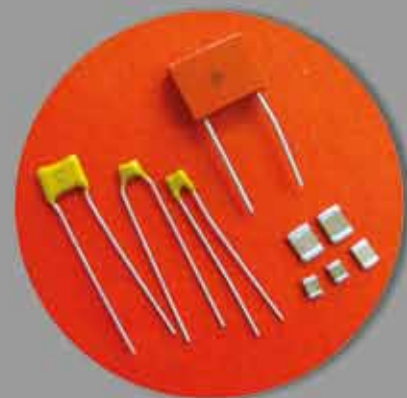
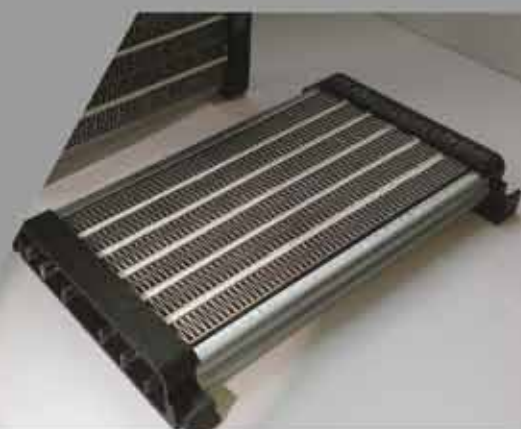
РЕГИСТРЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ

210101, РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ
г. Витебск, ул. М. Горького, 145

Отдел маркетинга:
тел.: + 375 (212) 36-44-52
факс: + 375 (212) 36-44-53
e-mail: monolmarket@mail.ru

Отдел продаж:
тел.: + 375 (212) 36-45-34
факс: + 375 (212) 36-44-65
e-mail: monosbet@mail.ru

www.monolit.by



Акционерное общество
«СПЕЦ-ЭЛЕКТРОНКОМПЛЕКТ»

**ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ДИЛЕР
НА ТЕРРИТОРИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Почтовый адрес: 125319, г. Москва, а/я 92.
Офис: г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2
+7 (495) 234-01-10, факс: +7 (495) 956-3346
sales@zolshar.ru

Таблица 3. Материалы опорных диэлектрических шайб мм-соединителей ведущих зарубежных компаний

Полимер Типы соединителей	Компания, источник информации	Применение других полимеров
Ultem 1000		
3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm, 1.0 mm	Amphenol/SV Microwave, www.svmicrowave.com	
3.5 mm, 2.92 mm (K), 2.4 mm, 1.85 mm, 1.0 mm, 0.9 mm (Super Mini)	Southwest Microwave, www.southwestmicrowave.com	2.92 mm – Kel-F81; 1.85 mm – PTFE
3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm, 1.35 mm, 1.0 mm	Anoison, www.anoison.com	1.85 mm, 2.92 mm и 2.4 mm – PTFE
3.5 mm, SMK (2.92 mm)	Micro-Mode, www.micromode.com	1.85 mm и 2.4 mm – PTFE
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	Siga-Tek, www.sigatek.com	2.92 mm и 2.4 mm – PTFE
2.92 mm	Fairview, www.fairview.com	
2.92 mm, 1.85 mm	Koaxis, www.koaxis.com	
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	Johnson (Bel Groups), www.belfuse.com	
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	TE Connectivity, www.te.com	
2.4 mm, 1.85 mm	Jyebao, www.jyebao.com	2.92 mm и 3.5 mm – Noryl EN265; 2.4 mm – PTFE и Noryl EN265
2.9 mm	Radiall, www.radiall.com	
2.4 mm, 1.85 mm	PCI (Precision Connector), www.precisionconnector.com	
Noryl EN265		
3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	Pasternack, www.pasternack.com	1.85 mm – Kel-F81; 2.4 mm и 2.92 mm – PTFE и Ultem 1000
2.92 mm, 2.4 mm	Jyebao, www.jyebao.com	
SK (2.92 mm)	Huber+Suhner, www.hubersuhner.com	
SMK (2.92 mm), 2.4 mm	Delta Electronics, www.deltarf.com	
1.85 mm, 2.92 mm	Hirose, www.hirose.com	2.92 mm – PTFE и Ultem 1000
3.5 mm	Field Components, www.fieldcomponents.com	
3.5 mm, 2.92 mm (SK)	Huber+Suhner, www.hubersuhner.com	
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	Tru/Winchester, www.winconn.com	
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	Pasternack, www.pasternack.com	2.92 mm, 2.4 mm – Ultem 1000, PTFE
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	SRI Connector Gage Co., www.sriconnectorgage.com	



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы
K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83,
K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91,
K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98

объемно-пористые танталовые конденсаторы
K52-1, K52-1М, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11,
K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24,
K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28.

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы
K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип),
K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип),
K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

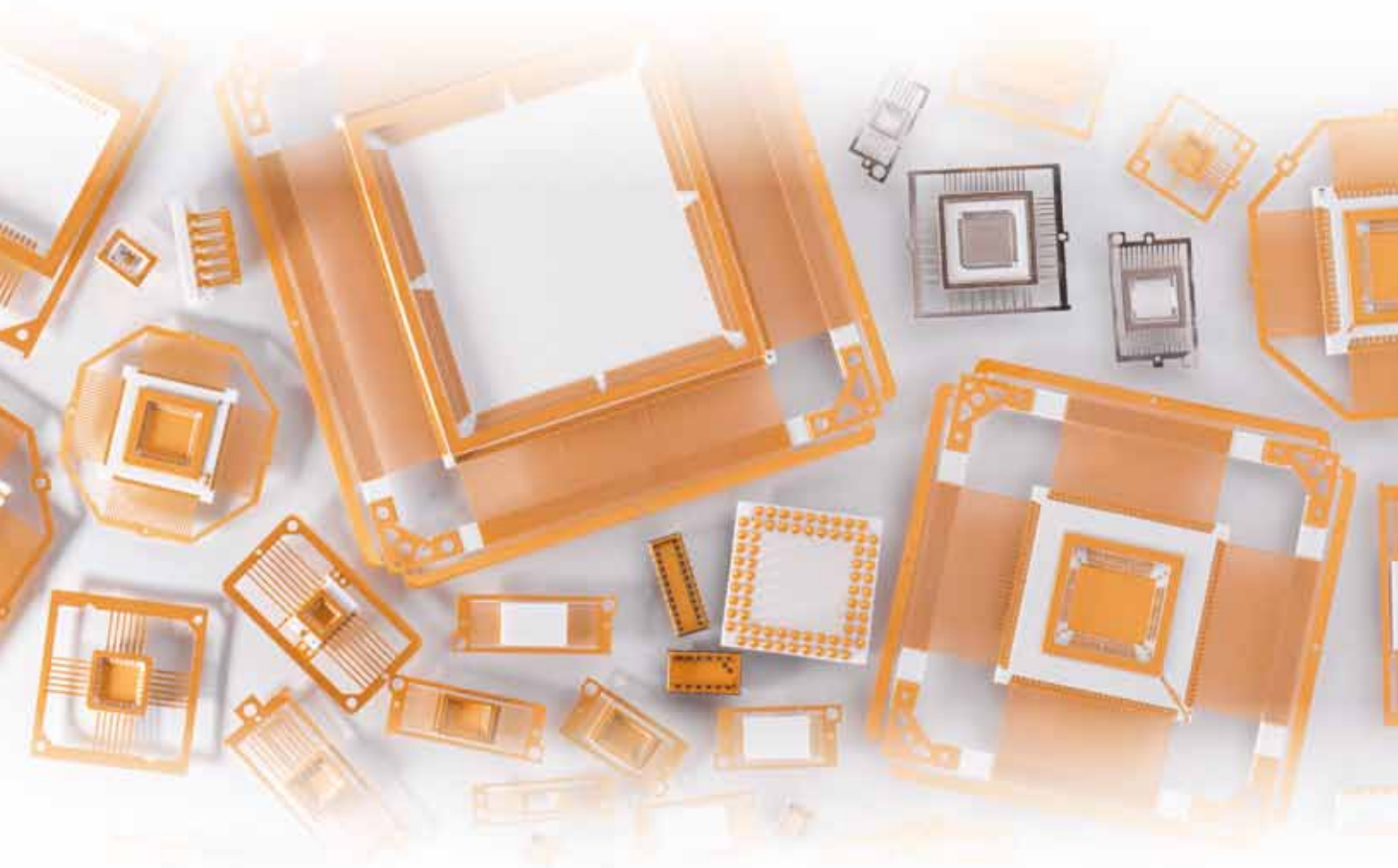
суперконденсаторы (ионисторы)
K58-26, K58-27

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

Таблица 3. Продолжение

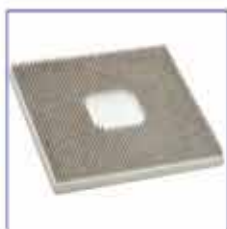
Полимер Типы соединителей	Компания, источник информации	Применение других полимеров
Rexolite 1422		
RPC-3.5, RPC-2.92	Rosenberger, www.rosenberger.com	RPC-2.92 – PEEK
PC3.5 (3.5 mm), SK (2.9 mm)	Huber+Suhner, www.hubersuhner.com	
3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm, 1.0 mm	Bo-Jiang Technology, www.bojiang.com.tw	Ultem 1000, Kel-F81
3.5 mm	Field Components, www.fieldcomponents.com	
2.92 mm	GTK a Volex Co, www.gtk.co.uk	
3.5 mm	RF Connector, www.rfcoaxconnectors.com	
RPC-3.50, RPC-2.92 (кабельные)	Rosenberger, www.rosenberger.com	
Kel-F81		
3.5 mm	SRI Connector Gage Co., www.sriconnectorgage.com	
1.0 mm, 3.5 mm, 1.85 mm	Pasternack, www.pasternack.com	1.85 mm, 3.45 mm – Noryl EN265
1.0 mm, 3.5 mm	Fairview Microwave, www.fairviewmicrowave.com	PTFE
3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	SGSM Microwave, www.sgmcmicrowave.com	
2.92 mm	PCI (Precision Connector), www.precisionconnector.com	Noryl EN265, Ultem 1000
SMK (2.92 mm)	Delta RF, www.deltarf.com	Noryl EN265
2.92 mm, 2.4 mm, 1.85 mm	Dynawave, www.dynawave.com	
PEEK		
RPC-1.00, RPC-1.35, RPC-2.92, RPC-1.85, RPC-2.40	Rosenberger, www.rosenberger.com	RPC-1.85, RPC-2.40 – PTFE
2.4 mm	Radiall, www.radiall.com	
2.92 mm	Huang Liang, www.thlp.com.tw	
2.92 mm	Field Components, www.fieldcomponents.com	
PTFE		
2.4 mm, 1.85 mm, 2.92 mm (SMK)	Micro-Mode, www.micromode.com	2.92 mm – Ultem 1000
2.92 mm	Siga-Tek, www.sigatek.com	Ultem 1000
2.4 mm, 1.85 mm, 2.92 mm (SMK)	Anoison, www.anoison.com	1.85 mm, 2.4 mm, 2.92 mm – Ultem 1000
3.5 mm	Tru/Winchester, www.winconn.com	



Предприятие располагает научно-технической и испытательной базой для проведения исследований, разработки и выпуска новой продукции



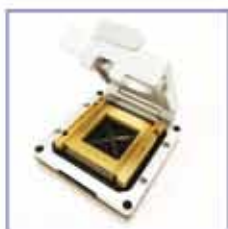
Выводные рамки



Металлокерамические корпуса



Нагревательные элементы



Контактные устройства



Графитовая оснастка



Оптоэлектронные корпуса



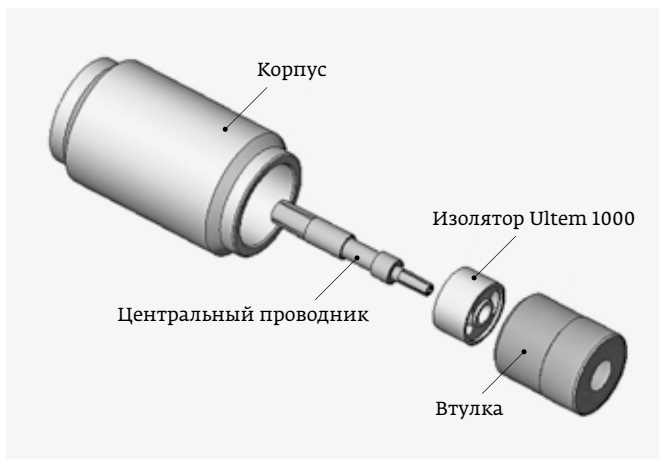


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции соединителя 2.92 mm компании Radiall

Наиболее широко для изготовления опорных шайб мм-соединителей применяют Ultem 1000 [6]. Список компаний, применяющих Ultem 1000, в табл. 3 неполный и отражает лишь часть компаний. Основной недостаток этого материала – высокая диэлектрическая проницаемость, равная 3,15. Чтобы снизить влияние диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, удаляют часть материала опорной шайбы, делая в ней отверстия и углубления. Этот материал имеет очень высокие твердость и прочность, и потому опорную шайбу приходится выполнять из двух половинок, которые вставляют в проточку центрального проводника, и затем сборку помещают в центрирующую втулку – рис. 3 [5].

В серийном производстве сборку можно получать литьем под давлением, установив центральный проводник по оси литьевой пресс-формы.

Многие компании применяют в качестве материала опорных шайб Noryl EN265. Этот полимер можно использовать при изготовлении соединителей по технологии литья под давлением. Noryl EN265 имеет лучшие

диэлектрические параметры по сравнению с Ultem 1000, но у него низкая радиационная стойкость.

Rexolite 1422 также входит в число традиционных материалов опорных шайб мм-соединителей и применяется многими компаниями. Однако недостаточно широкий рабочий диапазон температур ограничивает область его применения в соединителях военного назначения. Но для инструментальных мм-соединителей Rexolite 1422 является одним из лучших изоляционных материалов.

Фторполимер Kel-F8, несмотря на большую величину тангенса угла диэлектрических потерь и невысокую радиационную стойкость, применяют в мм-соединителях так же часто, как и Ultem 1000. Дело в том, что потери СВЧ-соединителя зависят не только от диэлектрических параметров материала опорной шайбы ($\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta$), но и от ее размеров. Так как шайбы миниатюрны, и с ростом частоты становятся все меньше, то это сглаживает возрастание потерь, если конструкция шайбы выбрана оптимальной.

Полимер РЕЕК благодаря удачному сочетанию физических и технологических свойств оказался востребованным в мм-соединителях компании Rosenberger и некоторых других компаний.


Несколько неожиданно казалось применение для опорных шайб фторполимера PTFE, имеющего невысокие твердость и прочность, нестабильность размеров и низкую радиационную стойкость. Однако это применение можно оправдать тем, что опорные шайбы имеют малые размеры и они закреплены во втулках. К тому же упрощается технология установки внутреннего проводника в шайбу: шайбу можно вставить в углубление на центральном проводнике, разрезав ее только по радиусу. Низкая радиационная стойкость PTFE также не является препятствием, так как шайба в соединенном состоянии вилки и розетки полностью окружена металлом. При хранении аппаратуры с соединителями, в которых применен PTFE, когда шайба открыта, достаточно надеть на соединитель вместо пластмассового или резинового колпачка защитный металлический.

Кроме вышеперечисленных полимеров, ограниченное применение имеют Kapton и Delrin. Kapton – полукристаллический полимер класса полиимидов. Из ленточного полимера Kapton изготовлена опорная шайба оригинальной конструкции для одного из соединителей 2.92 mm компании Radiall [5]. Delrin – полукристаллический гомополимер полиоксиметилена (полиацеталь) повышенной прочности, имеющий невысокий уровень диэлектрических параметров, диапазон рабочих частот: $-60...100$ °C и радиационную стойкость всего 1 Мрад. Delrin применила компания San-Tron (www.santron.com) в соединителях 2.92 mm.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Решение задачи импортозамещения требует применения отечественных полимеров в конструкции выпускаемых

ООО
СМП





ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные компоненты
для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Керамические конденсаторы до 100 мкФ
- Синфазные дроссели на ток 10 А

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

в нашей стране мм-соединителей. В настоящее время в нашей стране самые разнообразные полимеры производят 60 заводов. Выпускаются некоторые полимеры, аналогичные зарубежным. Так, например, полимер PTFE под маркой «Фторопласт-4» был создан в 1947 году в ОАО «Пласт-полимер». Промышленное производство этого полимера на предприятии в г. Кирово-Чепецке осуществляется с 1956 года [5]. «Фторопласт-4» по своему качеству практически не уступает зарубежным аналогам.

Необходимо также отметить, что в нашей стране специалистами ПО «Родонит» (www.rondonit.chepetsk.ru) совместно с ООО «АР-ПРО» (ar-pro.org) создан и выпускается радиационно-модифицированный фторполимерный материал «Арфлон», марки AR100 и AR200. «Арфлон» является аналогом PTFE, но превосходит его по таким важным свойствам, как отсутствие хладотекучести и более высокая (в 500 раз) радиационная стойкость [5].

Отечественными аналогами полимера Kel-F81 являются фторопласты Ф-3, ГОСТ 13744-87 и Ф-3М, ТУ 6-05-1812-87. «Фторопласт-3» перерабатывается в изделия обычными для термопластов методами горячего прессования, экструзии, литья под давлением. Механическая обработка позволяет получить из него детали с точными размерами.

Полиацеталь POM-C является отечественным аналогом полиоксиметилена Derlin и серийно выпускается для применения в автомобильной и электротехнической промышленности [14]. Однако его широкое применение в мм-соединителях вряд ли целесообразно.

Сдерживает производство в нашей стране мм-соединителей, не зависящих от импорта, отсутствие отечественного аналога Ultem 1000. Организация производства этого полимера осложняется тем, что требуемое количество этого материала невелико, учитывая малые размеры опорных шайб и небольшой объем выпуска мм-соединителей. Поэтому такое производство невыгодно с экономической точки зрения.

* * *

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для серийного изготовления опорных диэлектрических шайб соединителей мм-диапазона общего применения наиболее применяемым полимером является Ultem 1000.

Предсказать применение полимера определенной марки в мм-соединителе конкретного типа невозможно. Данные табл. 3 показывают, что разные компании в соединителе одного и того же типа применяют различные полимеры для изготовления опорной шайбы. Более того, одна и та же компания для изготовления соединителя конкретного типа применяет полимеры разных марок. По-видимому, всё определяется назначением соединителя, особенностями его конструкции и технологическими возможностями компании.

Отечественные полимеры фторопласты: Ф4 и Ф3, а также «Арфлон» также могут быть применены при создании мм-соединителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джуринский К. Б.** Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / Под ред. д. т. н. Борисова А. А. – СПб: Изд-во ЗАО «Медиа Групп Файнстрит», 2014. 426 с.
2. **Clupper T., Blair C., Broomall J.** Cut-off frequency Prediction for MMW Coaxial Interconnects. 2019. – www.edicononline.com.
3. **Джуринский К., Криворучко В.** Радиочастотные коаксиальные соединители с предельной частотой 145 ГГц. Конец эволюции соединителей? // Современная электроника. 2019. № 7. С. 42–45.
4. Пластики для аэрокосмических технологий. – www.polimer1.ru
5. **Джуринский К., Прокимов А., Смирнова Ю.** Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей // Компоненты и технологии. 2017. № 2. С. 105–113.
6. **Fuks R.** New Dielectric Bead for Millimeter-wave Coaxial Components. Introduction to a bead used for the dielectric structure for mechanical support of coaxial microwave components // Microwave Journal. 2001. № 5.
7. ULTEM™ Resin – Sabic. – www.sabic.com.
8. GE Plastics. PEI Resin ULTEM. GE Engineering Thermoplastics, Product Guide. docplayer.net.
9. **Джуринский К., Павлов С., Морозов О.** Отечественные радиочастотные соединители мм-диапазона длин волн // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 3. С. 154–168.
10. NORYL™ Resin – Sabic. – www.sabic.com.
11. Rexolite®. C-Lec Plastics Inc. 2015. – www.rexolite.com.
12. Neoflon™ PCTFE Molding Powder. – www.daikinchem.com.
13. Polyetheretherketone (PEEK): A Complete Guide on High-Heat Engineering Plastic.
14. Характеристики, производство и применение полиацетала. – www.kp.ru/guide/poliatsetal.html.

ООО "Руднев-Шиляев"

Разработка и производство:

- платы сбора данных
- измерительные приборы
- виброакустические системы
- инструментальные решения задач заказчика

Москва (495) 787-63-67
(495) 787-63-68

www.rudshel.ru
adc@rudshel.ru