

ОСОБЕННОСТИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ РАДИОЧАСТОТНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены требования к герметичности радиочастотных соединителей и СВЧ-вводов и методы ее обеспечения.

Обоснована необходимость применения согласованного и несогласованного металлостеклянного спае с изолятором из монолитного или порошкового стекла. Приведены химические составы и основные характеристики широко применяемых марок стекол. Показаны особенности применения в радиочастотных соединителях и СВЧ-вводах монолитного и порошкового стекла.

О ГЕРМЕТИЧНОСТИ РАДИОЧАСТОТНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Требование герметичности предъявляют только к приборным соединителям: коаксиально-микрополосковым переходам, СВЧ-вводам и выводам энергии, частично к адаптерам, применяемым в герметизированных изделиях микроэлектроники. Степень герметичности характеризуется величиной скорости натекания гелия через соединитель. Поэтому утверждение о том, что соединитель герметичен, не имеет практической пользы без указания величины скорости натекания.

Существует три уровня герметичности соединителей:

1. Герметичность не регламентирована и поэтому не гарантируется. Это относится к соединителям, герметизированным органическими диэлектриками.
2. Скорость натекания $1,3 \cdot 10^{-6} - 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ — средний уровень герметичности, допустимый для изделий менее ответственного назначения или кратковременного действия. Такой уровень герметичности обеспечивают, например, пластмассовые корпуса микросхем.
3. Соединители и СВЧ-вводы первых двух уровней недопустимо применять в надежных изделиях микроэлектроники с большим сроком службы.
3. Скорость натекания $1,3 \cdot 10^{-9} - 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ («вакуумная плотность») — высокий уровень герметичности. Такую скорость натекания определяют масс-спектрометрическим методом при помощи гелиевого течеискателя.

Для зарубежных и отечественных герметичных радиочастотных соединителей



▲ Рис.1. Коаксиально-микрополосковые переходы с внутренним спаем (а) и составные (б)

и СВЧ-вводов скорость натекания гелия должна быть не более $1 \cdot 10^{-8} \text{ cc/s}$ ($1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$) [1].

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Скорость натекания $1,3 \cdot 10^{-9} - 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ имеют соединители, герметичность которых обеспечивается металлостеклянным спаем. Существует два типа герметичных соединителей [1]:

1. С внутренним металлостеклянным спаем (рис. 1а).
2. Составные соединители: миниатюрный металлостеклянный ввод с центральным проводником диаметром 0,3–0,6 мм в сочетании с СВЧ-разъемом, имеющие цанговое соединение между собой (рис. 1б).

ПОЧЕМУ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫЙ СПАЙ?

Для обеспечения герметичности соединителей и СВЧ-вводов и в нашей стране, и за рубежом применяют спай стеклянного изолятора с наружным и внутрен-

ним проводниками коаксиальной линии соединителя. При этом изолятор полностью заполняет пространство между ними. Кроме герметизации и защиты от воздействия внешней среды изолятор выполняет следующие функции:

- фиксацию внутреннего проводника относительно наружного и изоляцию этих проводников;
- развязку между внутренним проводником соединителя и внутренним проводником устройства СВЧ (предотвращение передачи механических усилий в устройство).

Поскольку изолятор представляет собой неоднородность в коаксиальной линии соединителя, необходимо, чтобы он вносил минимальные рассогласование и потери в ней. В первом приближении изолятор можно представить отрезком коаксиальной линии с однородным диэлектрическим заполнением. Компенсацию отражений в такой линии производят путем оптимального выбора конфигурации и толщины изолятора и соотношения диаметров наружного и внутреннего проводников линии. Геометрические размеры изолятора — внутреннего (d) и наружного

(D) диаметров проводников — рассчитывают из условия равенства волновых сопротивлений коаксиальной линии в ее областях с изолятором и без него так, чтобы волновое сопротивление в любом сечении линии было 50 Ом, принятым в микроэлектронике.

Зная величину диэлектрической проницаемости материала изолятора ϵ , отношение диаметров D/d рассчитывают по формуле:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{D}{d} \text{ или}$$

$$\log \frac{D}{d} = 0,362\sqrt{\epsilon}. \quad (1)$$

У стекла $\epsilon = 5,2$, у алюмооксидной керамики $\epsilon = 9,8$. Поэтому для стекла $D/d = 6,7$, а для керамики $D/d = 13$.

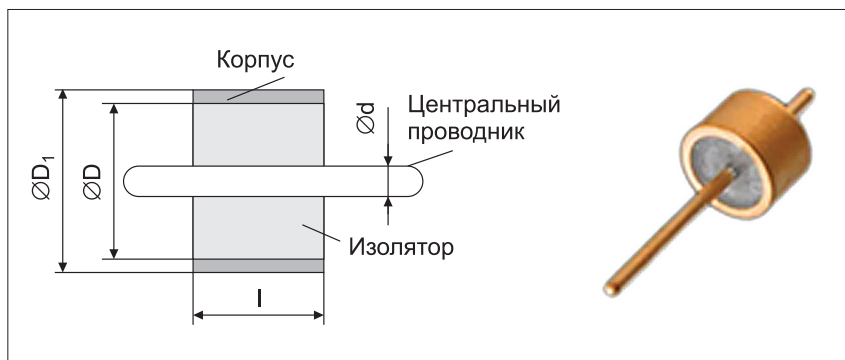
Таким образом, размеры коаксиальной линии соединителя с керамическим изолятором приблизительно вдвое больше, чем линии со стеклянным изолятором. Но дело не только в этом. Повышение диэлектрической проницаемости изолятора становится причиной уменьшения предельной рабочей частоты соединителя, а значит, снижения его широкополосности [1]. Не последним аргументом в пользу применения стекла является простота технологии и сравнительно невысокая стоимость получения металлоглазчатого спая. Для получения герметичного спая с керамикой необходима ее предварительная металлизация и пайка в восстановительной среде припоями, содержащими драгоценные металлы. Пайку со стеклом выполняют в среде азота, при этом не требуются металлизация стеклянного изолятора и припой. Спай образуется в результате смачивания металла стеклом, нагретым до состояния расплава, и химических процессов.

ВИДЫ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Хотя размеры изолятора формируются в процессе получения металлоглазчатого спая, однако все определяют размеры исходной таблетки стекла. Изоляторы герметичных соединителей и СВЧ-вводов (стеклотаблетки) изготавливают из монолитного или порошкового стекла одним из двух способов:

1. Из стандартных стеклянных капилляров

Предварительно капилляры сортируют по наружному и внутреннему диаметрам и в зависимости от этого нарезают алмазным диском на таблетки требуемой высоты. Такая технология не обеспечивает нужной точности и воспроизводимости размеров изоляторов. Производственная технология изготовления стеклянных таблеток должна включать бесцентровую шлифовку сте-



▲ Рис.2. Конструкция и внешний вид металлоглазчатого СВЧ-ввода

кляных 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. Данная технология обеспечивает точность размеров таблеток ± 25 мкм и идентичность размеров таблеток разных партий.

2. Из стеклянного порошка

Стеклянный порошок смешивают со связкой (обычно парафином), затем прессуют в пресс-формах и спекают в печи (выжигают связку). Особенность порошкового стекла — закрытая пористость. В связи с этим оно имеет меньшие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, повышенную термостойкость и выдерживает большие механические напряжения без образования трещин.

ТРЕБОВАНИЯ К СТЕКЛЯННОМУ ИЗОЛЯТОРУ

На частотах свыше нескольких гигагерц стеклянный изолятор вносит наибольшую долю в высокочастотные потери герметичных соединителей и СВЧ-вводов. Поэтому диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь стекла, а также толщина изолятора должны быть минимально возможными [1].

К точности размеров стеклянного изолятора и качеству металлоглазчатого спая изолятора с корпусом и центральным проводником соединителя и СВЧ-ввода (рис. 2) предъявляют высокие требования: допуски на размеры ΔD , Δd и l должны быть в пределах 0,025–0,040 мм.

Недопустимо:

- выступание изолятора из корпуса;
- мениски на торцевых поверхностях изолятора и наплывы стекла на центральный проводник. Наплыв стекла на центральный проводник создает дополнительную неоднородность вследствие образования зазора между торцом контакта и стеклянным изолятором, а также из-за раскрытия ламелей гнездового кон-

такта 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.

СТЕКЛА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕРМЕТИЧНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ СОЕДИНИТЕЛЯХ И СВЧ-ВВОДАХ

Значения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ стекол зарубежного и отечественного производства, наиболее часто применяемых в радиочастотных соединителях и СВЧ-вводах, а также (для сравнения) алюмооксидной керамики приведены в таблице 1.

Температура размягчения стекол отечественных марок соответствует вязкости 10^{11} пз. Для зарубежных стекол приведена температура, при которой вязкость равна $10^{7,6}$ пз — точка Литтлтона (softening point — стекло деформируется под действием собственного веса). Термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) всех стекол приведен для диапазона температур 0...+300 °С.

Диэлектрическая проницаемость стекол повышается с увеличением температуры и уменьшается с ростом частоты электрического поля. Рост температуры также вызывает увеличение тангенса угла диэлектрических потерь — потерь, связанных с электропроводностью, релаксационных и резонансных потерь. На частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь наблюдается минимум в области частот 10^5 – 10^7 Гц.

Химический состав отечественных и зарубежных стекол приведен в таблице 2 [5, 6].

Все стекла, представленные в таблице 2, являются боросиликатными. Стекла марок Corning 7052, EN-1, C52-1 и C48-2 предназначены для получения согласованных спаев со сплавом ковар, отечественный аналог которого — железо-никель-кобальтовый сплав 29 НК

Таблица 1. Основные параметры отечественных и зарубежных стекол и алюмооксидной керамики [2–5]

Марка стекла, тип керамики	Диэлектрические свойства	Значение параметра на частоте, ГГц			ТКЛР $\alpha \cdot 10^7$, $К^{-1}$	Температура размягчения/точка Литтлтона, $^{\circ}C$
		3	10	38		
Corning 7052, Corning Glass, США	ϵ	5,04	4,93	4,9	47	712
	$tg\delta \cdot 10^4$	58	81	–		
EN-1, Electro-Glass Products, США	ϵ	5,1	–	–	48	716
	$tg\delta \cdot 10^4$	–	–	–		
С 52-1	ϵ	5,3	5,2	5,1	52	585
	$tg\delta \cdot 10^4$	–	95	140		
С 48-2	ϵ	5,1	5,0	–	48	570
	$tg\delta \cdot 10^4$	–	–	–		
Corning 7070, Corning Glass, США	ϵ	4,1	4,0	–	32	820
	$tg\delta \cdot 10^4$	12	21	–		
С37-2	ϵ	4,1	–	–	33	590
	$tg\delta \cdot 10^4$	20	–	–		
Алюмооксидная керамика	ϵ	–	9,8	–	79	–
	$tg\delta \cdot 10^4$	–	2	–		

Таблица 2. Химический состав отечественных и зарубежных стекол

Марка стекла	Химический состав, %								
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O
Corning 7052	67	22	2	–	–	–	9,0	–	–
EN-1	65	18,0	8,0	2,7	0,1	0,1	2,3	3,2	0,6
С 52-1	68,7	19,0	3,5	–	–	–	4,4	4,4	–
С 48-2	67,3	21,0	3,5	–	–	–	3,0	5,0	0,2
Corning 7070	69,9	25,7	1,0	0,2	0,3	–	1,5	1,4	–
С 37-2	69,5	26,5	1,0	–	–	–	1,4	1,2	0,4

(28,5–29,5% Ni, 17–18% Co, остальное Fe). Стекла марок С48–2 и Corning 7070 предназначены для изготовления изоляторов спеканием из стеклопорошка.

Стекло С37–2 считается аналогом стекла Corning 7070. У этих стекол близкий химический состав и схожие диэлектрические свойства. Технология электроварки стекла С37–2 и изготовления из него тонкостенных трубок для прецизионных линий замедления ламп бегущей волны была разработана в нашей стране в начале 1980-х годов [4]. Однако наряду с высоким уровнем диэлектрических свойств стекло С37–2 имеет низкую химическую стойкость и подвержено расстекловыванию. При нагреве до температуры пайки со сплавом 29 НК на поверхности этого стекла, изготовленного из капилляра, образовывалась непрозрачная корка. В настоящее время стекло С37–2, по-видимому, не производится в нашей стране.

Возможно, из-за низкой химической стойкости изоляторы из стекла Corning 7070 изготавливают из порошкового стекла.

МОНОЛИТНОЕ ИЛИ СПЕЧЕННОЕ ПОРОШКОВОЕ СТЕКЛО?

Применение в радиочастотных соединителях и СВЧ-вводах изоляторов, из-

готовленных из стеклянных капилляров (монолитного стекла), имеет ряд преимуществ:

1. Изолятор можно выполнить с высокой точностью размеров.
2. При серийном выпуске все изоляторы одной партии имеют стабильные и воспроизводимые размеры.
3. Особенно важны эти преимущества для соединителей и вводов с низким и стабильным уровнем КСВН, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, так как с увеличением частоты необходимо не только уменьшать размеры коаксиальной линии, но и повышать их точность.
4. Монолитное стекло прозрачно, что позволяет иммерсионно-поляризационными методами измерять внутреннюю геометрию и напряжения в спаянном изоляторе. Благодаря этому удается обнаруживать внутренние дефекты в стекле изолятора и прогнозировать долговременную герметичность соединителя.

Однако у изоляторов из монолитного стекла есть и недостатки:

1. Для изготовления изоляторов требуемых размеров необходимо наличие капилляров с соответствующими значениями внутреннего диаметра и тол-

щины стенки. Технология изготовления стеклотаблеток из капилляров достаточно трудоемка. Более 20% стекла идет в отходы и до 10% таблеток могут оказаться забракованными из-за наличия трещин, сколов и сквозных микрокапилляров в стекле.

2. По этой технологии нельзя изготавливать изоляторы с двумя и более отверстиями.

Изоляторы из порошкового стекла имеют следующие достоинства:

1. Технология изготовления из порошкового стекла позволяет получать изоляторы с любыми необходимыми размерами и любой конфигурацией, в том числе и со многими отверстиями. Порошковое стекло незаменимо для применения в низкочастотных соединителях, прежде всего в многослойных соединителях.
2. Изоляторы имеют повышенную прочность и термостойкость и менее подвержены образованию микротрещин при температурных воздействиях.
3. Наличие замкнутой пористости несколько снижает величину диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь порошкового стекла. Это обстоятельство следует учитывать при расчете коаксиальной линии проектируемого соединителя. Наши измерения на частоте 8 ГГц показали, что диэлектрическая проницаемость стекла марки С52–1, изготовленного из стеклянного капилляра, равна 5,2, а стекла, спеченного из порошка, — 5,0. Снижение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь позволяет увеличить широкополосность соединителя и снизить величину потерь.

Недостатками изоляторов из порошкового стекла являются:

1. Низкая точность размеров изоляторов. Допуск на наружный диаметр отечественных изоляторов может быть 0,15 мм. Для сравнения: допуск на наружный диаметр изоляторов, изготовленных из капилляров, равен 0,025–0,040 мм. К тому же размеры изоляторов разных партий недостаточно воспроизводимы, так как зависят от размера зерна порошка, количества связки и температурного режима спекания. Это не позволяет обеспечить приемлемую воспроизводимость электрических параметров соединителей.
2. Непрозрачность такого стекла не позволяет осуществить контроль внутренней геометрии, дефектов и напряжений в стекле оптическими методами, применяемыми для монолитного стекла.

СОГЛАСОВАННЫЙ ИЛИ НЕСОГЛАСОВАННЫЙ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫЙ СПАЙ?

В согласованном металlostеклянном спае металл и стекло имеют близкие значения ТКЛР в интервале температур от комнатной до температуры размягчения стекла [5]. Согласованность ТКЛР металла и стекла позволяет избежать образования в спае внутренних напряжений или ограничить эти напряжения величиной, неопасной для целостности спая.

Несогласованными (сжатыми, компрессионными) считаются спаи, в которых ТКЛР металла больше ТКЛР стекла. В этом случае в стекле возникают значительные внутренние напряжения сжатия, величина которых должна быть меньше предела прочности стекла.

Деление спаев на согласованные и несогласованные является до некоторой степени условным. Идеально согласованной по ТКЛР пары металл–стекло не существует. Поэтому получить ненапряженный спай практически невозможно. Напряжения всегда возникают и в несогласованном, и в согласованном спае. Важно только, чтобы эти напряжения не превышали предела прочности и приводили к сжатию стекла, а не к его растяжению, так как прочность стекла на сжатие на порядок больше, чем на растяжение [7].

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается только два вида стекла с приемлемой диэлектрической проницаемостью: марок С52–1 и С48–2 с коэффициентом термического расширения соответственно $52 \cdot 10^{-7}$ и $48 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$. В связи с этим корпус соединителя или СВЧ-ввода изготавливают из сплава 29 НК (согласованный спай) или из стали 15Х25 Т (сжатый спай), а центральный проводник — только из сплава 29 НК [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для снижения величин КСВН и потерь и повышения широкополосности герметичных радиочастотных соединителей

и СВЧ-вводов необходимо применение изоляторов с точными размерами из стекла с низкими значениями диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. За рубежом для этой цели широко применяют стекло марки Corning 7070. В нашей стране аналог этого стекла в настоящее время не выпускается. Поэтому для создания радиочастотных соединителей и СВЧ-вводов с предельной частотой более 26,5 ГГц приходится приобретать изоляторы этого стекла за рубежом или же использовать конструктивные решения, которые все равно не позволяют получить такие же параметры соединителей, как у зарубежных аналогов [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Джурицкий К. Б. *Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры*. Под ред. д. т. н. Борисова А. А. СПб, Медиа Группа Файнстрит, 2014.
2. Максимов А. *Корпуса для полупроводниковых приборов. Металlostеклянные и металлокерамические*//Электроника НТБ. 2010. № 6.
3. Джурицкий К. *Стекла зарубежных компаний для электронной техники*//Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2009. № 5.
4. Джурицкий К. Б. *Стекло в электронике СВЧ*//Электронная техника. Серия 1, «Электроника СВЧ». 1990. Вып. 6.
5. Эспе В. *Технология электровакуумных материалов*. Том 2. *Силикатные материалы*. Пер. с немецкого под ред. Нилендера Р. А. и Котляра А. А. М.: Энергия, 1968.
6. ОСТ 11 027.010. *Стекло электровакуумное*. Марки. 1986.
7. Любимов М. Л. *Спаи металла со стеклом*. Под ред. Девяткова Н. Д. 2-е изд. М.: Энергия. 1968.
8. Джурицкий К. *Радиочастотные соединители. Импортзамещение или снижение зависимости от импорта*//Электроника НТБ. 2017. № 8.