

ГЕРМЕТИЧНЫЕ СВЧ-ВВОДЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДИКА ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

А.Андросов alex-1@mail.ru
К.Джуринский, к.т.н. kbd.istok@mail.ru

Электрические параметры герметичных СВЧ-вводов, применяемых в изделиях микроэлектроники, в значительной степени определяют КСВН, потери и другие характеристики этих изделий. На практике их можно определить только расчетным путем. Авторами статьи предложена методика измерения КСВН с максимальной погрешностью 7% и потерь вводов – с погрешностью 6%. Методика может применяться при разработке и проведении испытаний СВЧ-вводов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВВОДОВ

Основными электрическими параметрами герметичных вводов являются волновое сопротивление, КСВН и потери. Формулы для расчета этих параметров приведены в табл.1 [1-3].

Волновое сопротивление стандартных СВЧ-вводов принято равным (50 ± 2) Ом, прецизионных вводов – (50 ± 1) Ом и оно должно быть одинаковым в любом сечении ввода. Погрешности величин волнового сопротивления и КСВН зависят от ряда факторов: допусков на диаметры проводников, эксцентриситета их взаимного расположения, зазоров между проводниками и диэлектриком, шероховатости поверхностей проводников, изменения величины диэлектрической проницаемости, формы свободных поверхностей стеклянного изолятора. Чем меньше геометрические размеры ввода, а, следовательно, чем выше его предельная частота, тем более жесткими должны быть требования к точности его изготовления. При этом большее внимание следует уделять точности изготовления центрального проводника СВЧ-ввода.

Влиянием эксцентриситета на волновое сопротивление 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 мениска стекла на торцевых поверхностях ввода также влияют на его параметры в радиочастотном тракте. В отличие от низкочастотных в СВЧ- вводах поверхность стекла должна быть плоской и не иметь менисков. Изолятор не должен выступать за пределы наружного проводника ввода.

Влияние шероховатости поверхности проводников на их поверхностное сопротивление (из-за удлинения пути токов) и на эффективные диаметры проводников, т.е. на волновое сопротивление, становится ощутимым только тогда, когда величина шероховатости одного порядка с допусками на диаметры проводников.

Волновое сопротивление определяется и диэлектрической проницаемостью изолятора. А она, в свою очередь, зависит от частоты, химического состава стекла (от партии к партии он может меняться), наличия в стекле неоднородностей и газовых пузырьков. Такие пузырьки в монолитном стекле возникают в процессе его пайки с металлом при перегреве

Таблица 1. Формулы для расчета электрических параметров вводов

Параметры	Обозначение	Формулы
Волновое сопротивление, Ом	Z_0	$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{D}{d}$
Погрешность волнового сопротивления, Ом в зависимости от:	ΔZ_0	$\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\Delta D}{D}$ $\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\Delta d}{d}$ $\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}$ $\Delta Z_0 = -240 \cdot \left(\frac{e^2}{D^2 + d^2}\right)$ $\frac{\Delta Z_0}{Z_0} = -\frac{\Delta \epsilon}{2\epsilon}$
допуска на $\varnothing D$, мм	ΔD	
допуска на $\varnothing d$, мм	Δd	
допусков ΔD и Δd , мм		
эксцентриситета, мм	e	
отклонения диэлектрической проницаемости	$\Delta \epsilon / \epsilon$	
КСВН	$K_{ст.У}$	$K_{ст.У} = 1 + \frac{ \Delta Z_0 }{Z_0}$
Потери, дБ/м:	α	$\alpha_{мет} = \frac{1,98 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D}\right)}{\log \frac{D}{d}} \sqrt{\epsilon \mu \rho f}$ $\alpha_{диэл} = 9,08 \cdot 10^{-8} f t g \delta \sqrt{\epsilon}$ $\alpha_{общ} = \alpha_{мет} \cdot \alpha_{диэл}$
в проводниках	$\alpha_{мет}$	
в диэлектрике	$\alpha_{диэл}$	
общие	$\alpha_{общ}$	

Примечание: d – диаметр центрального проводника ввода; D – внутренний диаметр ввода (диаметр изолятора); e – эксцентриситет расположения центрального проводника в корпусе ввода; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изолятора; f – частота; ρ – удельное электрическое сопротивление материалов проводников, (Ом·мм²)/м; μ – магнитная проницаемость материалов проводников (на СВЧ $\mu=1$).

и при наличии загрязнений. Нередко в качестве диэлектрика вводов применяют спеченное порошковое стекло, особенностью которого является закрытая пористость. Из-за этого диэлектрическая проницаемость порошкового стекла меньше, чем у монолитного стекла аналогичного 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 применение непрозрачного порошкового стекла исключает возможность контроля в нем внутренних дефектов и напряжений, а это очень важно для изделий повышенной надежности.

Высокочастотные потери вводов условно разделяют на потери в проводниках и потери в диэлектрике. Потери в проводниках пропорциональны \sqrt{f} и зависят от размеров проводников и свойств материалов, из которых они изготовлены. При этом около 80% всех потерь приходится на потери в центральном проводнике ввода. Потери в диэлектрике линейно зависят от частоты, определяются его диэлектрическими свойствами и не зависят от диаметров проводников. Потери вводов возрастают с увеличением частоты, особенно на частотах, выше 10 ГГц. При этом уровень потерь выше для более миниатюрных вводов. На низких частотах преобладают потери в проводниках. Однако, начиная с частоты, равной нескольким гигагерцам,

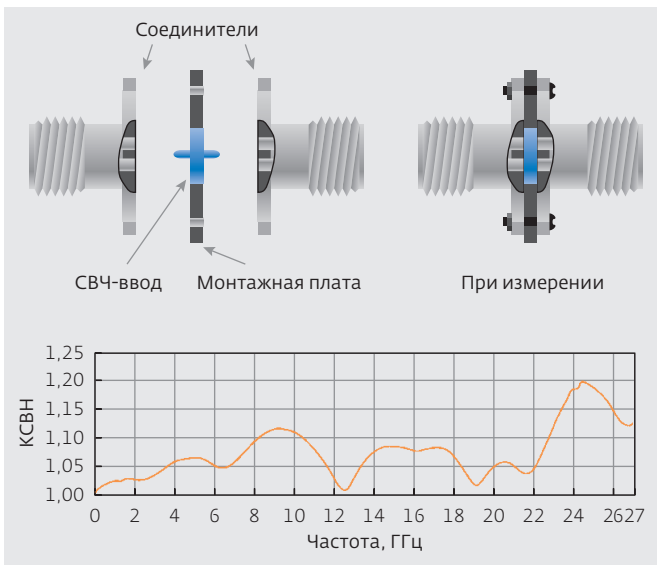


Рис.1. Измерение КСВН и потерь ввода методом Back-to-Back Connector Testing

основной вклад в величину потерь вносят потери в диэлектрике.

Уровень высокочастотных потерь в реальных вводах менее 0,1 дБ на частотах до 10 ГГц и менее 0,25 дБ на частотах до 26,5 ГГц. Для некоторых применений (сверхмаломощные устройства, измерительные устройства высокой чувствительности) необходим более низкий уровень потерь вводов. В таких вводах в качестве диэлектрика применяют стекла с лучшими диэлектрическими свойствами, например, стекло Corning 7070. Диэлектрическая проницаемость этого стекла на

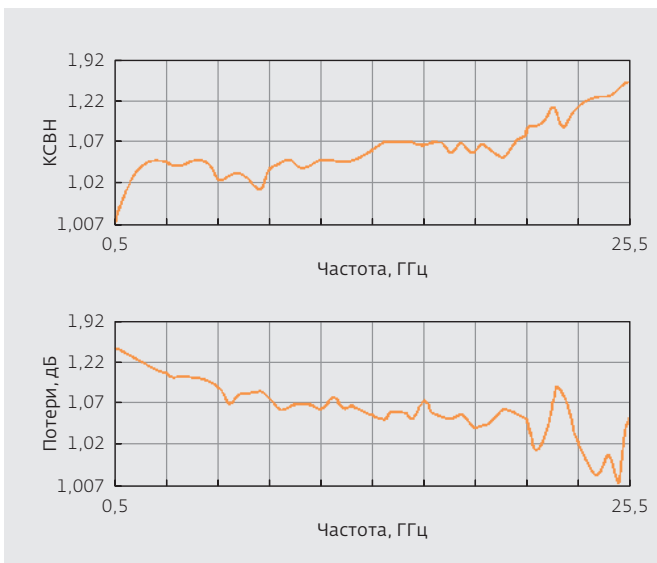


Рис.2. КСВН и потери вводов компании Thunderline-Z

20-27%, а тангенс угла диэлектрических потерь в 4-4,5 раза меньше, чем у широко используемого за рубежом стекла Corning 7052, а также и у отечественного стекла С52-1. За счет меньшей величины диэлектрической проницаемости можно увеличить диаметр центрального проводника при неизменном диаметре наружного проводника, сохранив при этом требуемую величину волнового сопротивления. Благодаря применению стекол с лучшими диэлектрическими свойствами уровень потерь на СВЧ снижается в несколько раз. Потери можно уменьшить также, укорачивая длину наружного проводника и соответственно диэлектрика. Поэтому у большинства зарубежных вводов миллиметрового диапазона этот размер менее 1,4 мм [2].

КСВН И ПОТЕРИ

В каталогах зарубежных компаний в большинстве случаев отсутствует информация о КСВН и потерях в выпускаемых вводах. Часто указывается, что эти сведения могут быть предоставлены по специальному запросу. Немногие приводимые данные о КСВН и потерях относятся исключительно к вводам, применяемым в составных коаксиально-микрополосковых переходах. Они носят лишь ознакомительный характер, так как официальной методики измерения КСВН и потерь составных соединителей и вводов не существует.

Компании Johnson Components, Delta, Southwest Microwave, АЕР и некоторые другие применяют методику измерения КСВН и потерь, названную Back-to-Back Connector Testing (рис.1, данные Delta). Фланцевые измерительные соединители предварительно градуируют. Для этого между их центральными гнездовыми контактами вставляется проводник соответствующего размера и фланцы соединителей прикручивают друг к другу винтами. Ввод впаивают в монтажную плату так, чтобы он не выступал за ее плоскости. На выступающие из платы концы центрального проводника ввода надевают фланцевые измерительные соединители "розетка" и соединяют между собой винтами (см. рис.1). Возможно проведение измерений и без применения монтажной платы, непосредственно контактируя ввод с измерительными соединителями. Измерение S-параметров выполняют на векторном анализаторе цепей. Подробное описание методики измерения компании не приводят.

Вводы компании Thunderline-Z с центральным проводником диаметром 0,51 мм имеют волновое сопротивление от 49 до 51 Ом, максимальные

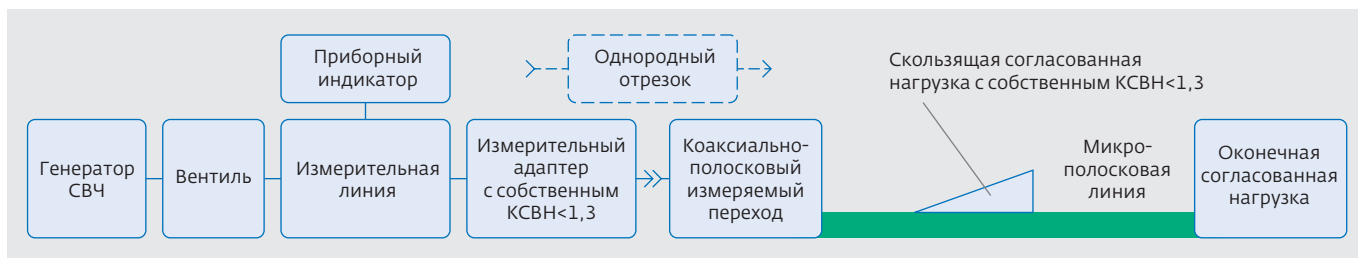


Рис.3. Блок-схема измерения КСВН коаксиально-полосковых переходов методом скользящей нагрузки

КСВН и потери в диапазоне частот до 25,5 ГГц соответственно 1,43 и 0,39 дБ (рис.2).

Величина потерь вводов компании AEP с центральным проводником диаметром 0,51 мм с изоляторами из стекла марок Corning 7052 и Corning 7070 не превышает 0,1 дБ в диапазоне частот до 12,4 ГГц, 0,2 дБ на частотах до 18 ГГц и 0,25 дБ на частотах до 26 ГГц. Величина КСВН в этом диапазоне частот не приведена, отмечено лишь, что она зависит от особенностей применения вводов. КСВН вводов компании Gilbert Corning в диапазоне частот до 26,5 ГГц не превышает 1,15; а в диапазоне частот до 40 ГГц – не более 1,35.

Компания Emerson для вводов с центральным проводником диаметром от 0,3 до 0,51 мм с изолятором из стекла марок Corning 7052 и Corning 7070 приводит величину потерь $\alpha = 0,15\sqrt{f}$ в диапазоне частот до 26,5 ГГц.

Блок-схема установки для измерения КСВН коаксиально-полосковых переходов и вводов методом скользящей нагрузки в соответствии с отечественным ГОСТ 20465-85 приведена на рис.3 [4].

Однако этот метод не обеспечивает точного измерения КСВН в диапазоне частот до 40 ГГц, так как результаты зависят от многих факторов: собственных КСВН всех элементов радиочастотного тракта, точности установки платы

с микрополосковой линией и ее соединения с центральным проводником измеряемого ввода [5].

Авторы статьи предложили методику измерения КСВН и потерь вводов на основе метода Back-to-Back Connector Testing. Измерение выполняется при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ) Anritsu MS4644A в четыре этапа: калибровка нового диапазона частот, пользовательская калибровка, измерение параметров вводов, анализ и интерпретация результатов.

Калибровка диапазона частот (до 40 ГГц) проводится с использованием модуля автоматической калибровки (МАК) AutoCal 36585K-2F (рис.4).

При такой калибровке устраняются ошибки, связанные с возможностью подключения неправильных или поврежденных калибровочных мер, на порядок уменьшается износ разъемов измерительных кабелей, а также существенно

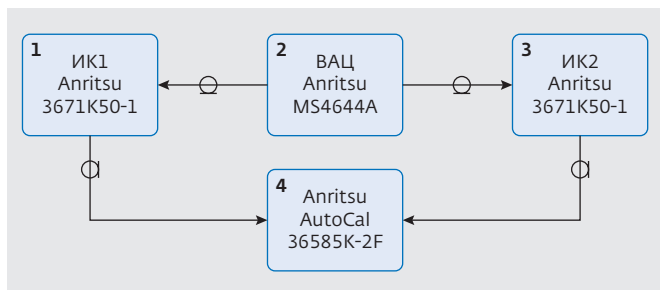


Рис.4. Блок-схема установки для калибровки нового диапазона частот векторного анализатора цепей (ВАЦ): 1 и 3 – измерительные кабели (ИК1 и ИК2); 2 – ВАЦ; 4 – модуль автоматической калибровки

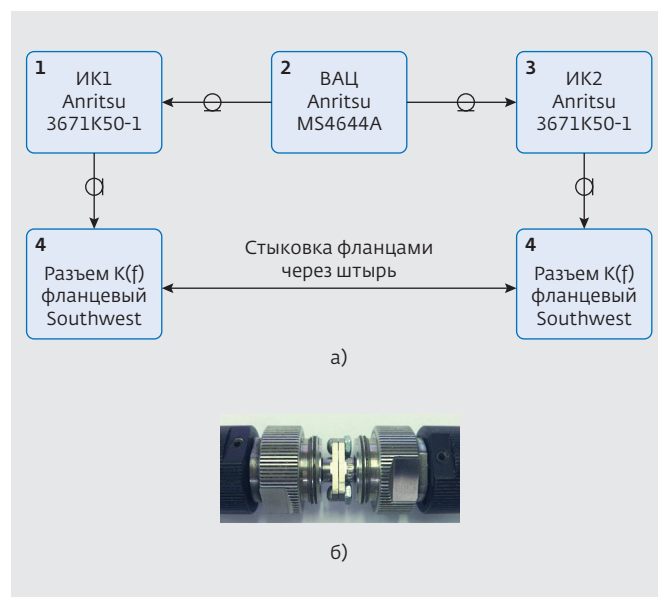


Рис.5. Блок-схема установки пользовательской калибровки ВАЦ (а) и внешний вид измерительных соединителей (б) (обозначения 1, 2, 3 и 4 такие же, как на рис.4)

Таблица 2. Типы соединителей для измерения параметров разных вводов

СВЧ-ввод	Ød, мм	K(f)-соединители (по 2 шт.)
ТС3.575.343-01	0,3	1014-01SF
КРПГ.433434.015-02	0,4	1014-16SF
КРПГ.433434.015-03	0,5	1014-05SF

сокращается время калибровки (меньше минуты после выбора автоматического режима).

Пользовательская калибровка необходима для исключения влияния на результаты измерений измерительных соединителей. Для измерений параметров вводов были выбраны фланцевые (прямоугольный фланец с двумя отверстиями) измерительные соединители "розетка" (f) серии JK (2,92-мм или K-соединители) компании Southwest Microwave, имеющие высокий уровень параметров в диапазоне частот до 40 ГГц: КСВН до 1,1 и потери менее 0,15 дБ [6]. При калибровке центральные контакты соединителей стыкуют между собой при помощи штырей соответствующего диаметра (0,3; 0,4 или 0,5 мм),

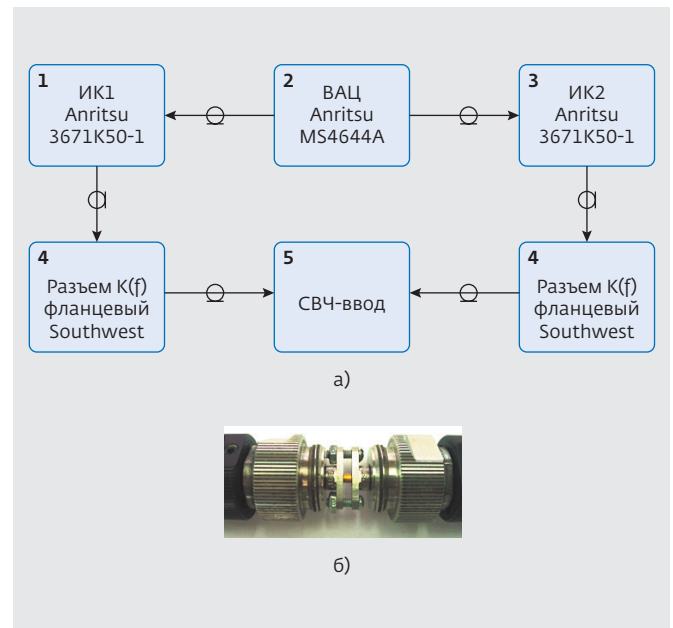


Рис.6. Блок-схема установки измерения параметров вводов (а) и внешний вид измерительных соединителей с вводом между ними (б) (обозначения 1, 2, 3 и 4 такие же, как на рис.4)

а фланцы прикручивают друг к другу винтами. Блок-схема установки пользовательской калибровки векторного анализатора цепей показана на рис.5.

S-параметры после проведения пользовательской калибровки представляют собой горизонтальные линии: КСВН ($S_{11}=S_{22}$)=1 и потери ($S_{21}=S_{12}$)=0 дБ.

Измерение параметров вводов. Блок-схема установки для измерения параметров вводов представлена на рис.6. Были выполнены измерения КСВН и потерь отечественных вводов ТС3.575.343-01, КРПГ.433434.015-02 и КРПГ.433434.015-03 [2, 3] с использованием соединителей "розетка" серии JK (K(f)-соединители) компании Southwest Microwave (табл.2).

Результаты измерений S-параметров вводов отечественного производства представлены на рис. 7-9 и в табл.3. Для сравнения в таблицу внесены параметры некоторых зарубежных вводов,

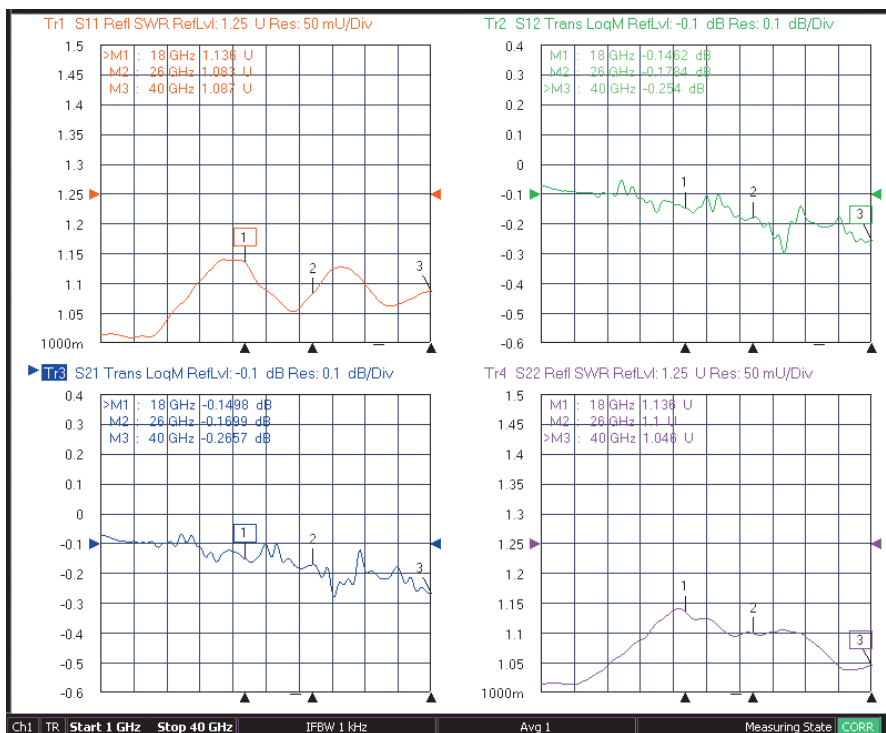


Рис.7. S-параметры ввода ТС3.575.343-01 (Ød=0,3)

информацию по которым удалось найти.

При анализе и интерпретации результатов измерений вводов учитывались следующие положения:

- отсутствие полной симметрии вводов из-за конструктивных особенностей;
- минимальное влияние человеческого фактора на результаты измерений благодаря использованию автоматической калибровки ВАЦ;
- несущественное влияние измерительных соединителей с КСВН<1,1, так как пользовательская калибровка исключает влияние их параметров на результаты измерений параметров вводов;
- большое различие диэлектрической проницаемости в области сочленения поверхностей ввода и измерительных соединителей (у воздуха $\epsilon=1$, у стекла C52-1 $\epsilon=5,2$).

Кроме того, некоторые конструктивные особенности металlostеклянных вводов, обусловленные технологией их изготовления, также существенно влияют на их параметры:

- "утопание" стекла (реcessия) в металлическом корпусе ввода;
- выступание стекла (протрузия) из корпуса ввода.

Поскольку ввод является устройством взаимного типа, должно выполняться условие $S_{11}=S_{22}$ и $S_{21}=S_{12}$. Однако результаты измерений (см. рис.7-9) показывают, что $S_{11} \neq S_{22}$ и $S_{21} \neq S_{12}$. Это объясняется в первую очередь отсутствием полной симметрии вводов. Все измеренные отечественные вводы имели небольшую recessию с одной стороны, а в местах выхода центрального проводника из стекла существовал небольшой конусообразный наплыв

стекла на центральный проводник. Выступы стекла приводят к тому, что К-соединители не надеваются на центральные проводники ввода

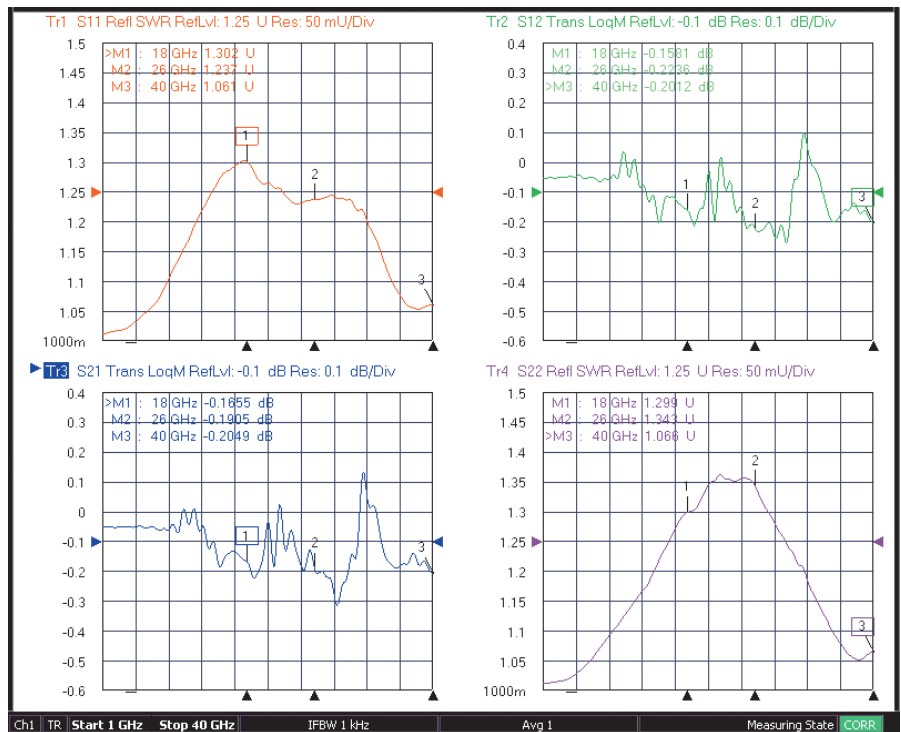


Рис.8. S-параметры ввода КРПГ.433434.015-02 ($\varnothing d = 0,4$)

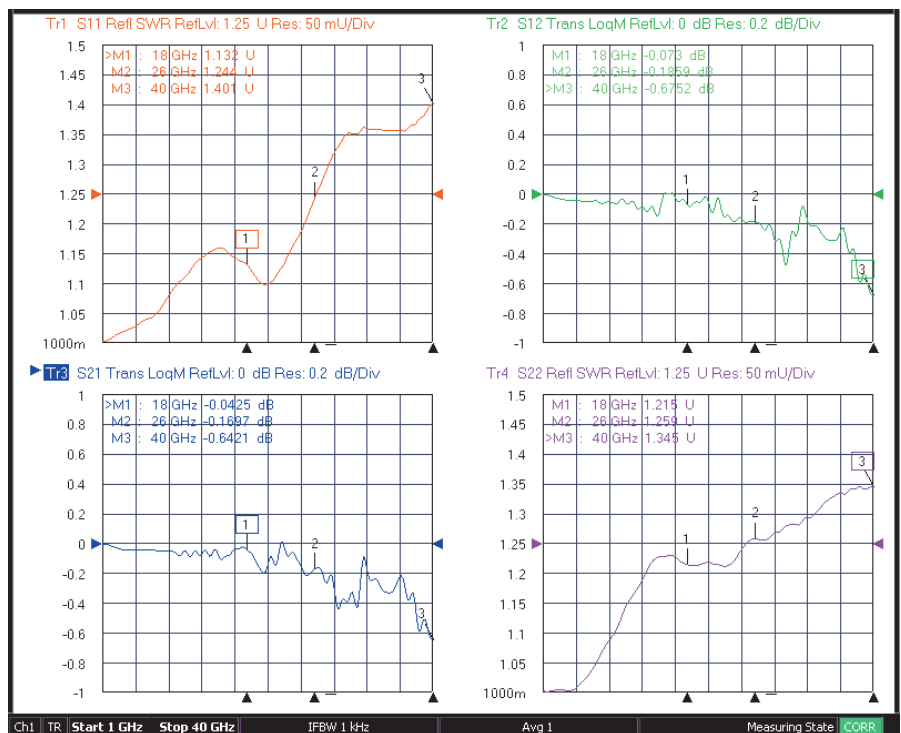


Рис.9. S-параметры ввода КРПГ.433434.015-03 ($\varnothing d = 0,5$)

Таблица 3. Параметры герметичных СВЧ-вводов

Обозначение СВЧ-ввода	Δf, ГГц	Максимальные значения	
		КСВН	Потерь, дБ
Отечественные, ТС3.575.343-01 ød = 0,3 мм	0–18	1,14	0,22
	18–26	1,14	0,26
	26–40	1,14	0,39
Компания Corning, ød = 0,3 мм	0–26,5	1,15	–
	26–40	1,35	–
Отечественные, КРПГ.433434.015-02, ød = 0,4 мм	0–18	1,37	0,49
	18–26	1,46	0,7
	26–40	1,45	0,72
Компания Emerson, ød = 0,38; 0,51 мм	0–26,5	–	0,77
Отечественные, КРПГ.433434.015-03 ød = 0,5 мм	1–18	1,24	0,31
	18–26	1,26	0,38
	26–40	1,40	0,86
Компания АЕР, ød = 0,51 мм	1–12,4	–	0,1
	12,4–18	–	0,2
	18–26	–	0,25

до полного упора в его торцевую поверхность. При этом создается обрыв наружного проводника коаксиальной линии ("земли"). Образовавшийся зазор приходится устранять электропроводным клеем. Если же К-соединители попытаться стянуть плотнее, то ламели их цанг раскрываются на выступающем наплыве стекла и нарушается плотный контакт цанги с центральным проводником ввода. В результате этого образуется дополнительная неоднородность. Таким образом, общая погрешность измерений параметров определяется конструкцией и точностью размеров вводов и степенью несогласованности поверхностей ввода и К-соединителей вследствие большого различия диэлектрической проницаемости.

Проведенные расчеты позволили установить, что разработанная методика обеспечивает максимальные погрешности измерения КСВН – 7%, а потерь – 6%. Такая точность измерений параметров позволяет использовать данную методику при разработке и проведении испытаний СВЧ-вводов. Согласно отечественному стандарту [4] допустимая погрешность измерения КСВН составляет 10%,

измерение же потерь этот стандарт не рассматривает.

Результаты измерений показали, что в диапазоне частот до 40 ГГц наряду с зарубежными вводами можно применять и отечественные вводы ТС3.575.343-01 и КРПГ.433434.015-02, при этом первый из них имеет лучшие параметры до 40 ГГц, чем второй. Ввод КРПГ.433434.015-03 применим в диапазоне частот до 18 и даже до 26 ГГц (при качественном его изготовлении). Отечественные герметичные вводы по своим параметрам соответствуют зарубежным аналогам. Параметры отечественных вводов можно еще улучшить, если использовать стекло, аналогичное стеклу Corning 7070.

Дальнейшее улучшение электрических параметров герметичных СВЧ-вводов должно осуществляться путем совершенствования технологии их изготовления: устранения "утопания" и наплывов стекла, неплоскостности и шероховатости поверхностей, пузырей и пористости в стеклянном изоляторе. Для создания отечественных вводов, работающих в частотном диапазоне до 65 ГГц, необходимо уменьшение размеров коаксиальной линии передачи (диаметр центрального проводника должен быть менее 0,3 мм) и применение для изолятора стекла, аналогичного стеклу Corning 7070. Очень важно также совершенствование методики измерения параметров вводов с целью уменьшения погрешности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sladek N.J.** Основные соображения по расчету и применению прецизионных коаксиальных соединителей. – Зарубежная радиоэлектроника, 1967, №10, с.101.
2. **Джуринский К.Б.** Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006.
3. **Джуринский К.Б.** Миниатюрные коаксиальные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Конструирование, расчет параметров, применение. – Электроника: НТБ, 2000, №6, с.18.
4. ГОСТ 20465-85. Соединители радиочастотные коаксиальные. Общие технические условия.
5. **Алексеев В., Верещагин А., Журинский К.** Экспериментальное исследование частотной зависимости КСВН коаксиально-микроразъемных переходов. – Компоненты и технология, 2008, №4, с.53.
6. www.southwestmicrowave.com

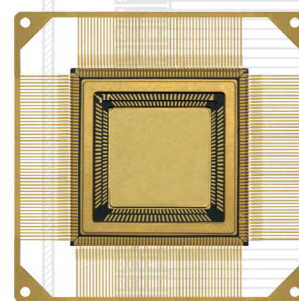
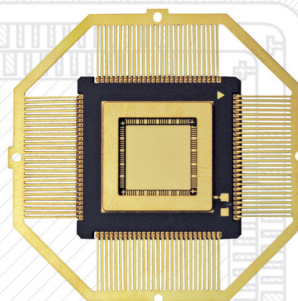
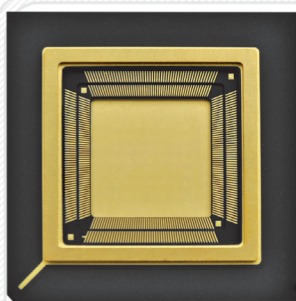
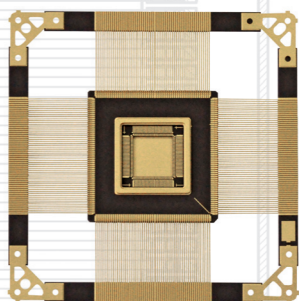
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫЕ КОРПУСА

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОРПУСОВ

- для интегральных микросхем
- специального назначения
- для полупроводниковых приборов

Возможные варианты исполнения корпусов:

- DIP
- SOP/SOJ
- PGA
- BGA
- QFJ
- QFP
- QFN
- LCC
- TO
- SMD



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ:

по желанию заказчика

ГЛУБИНА МОНТАЖНОГО КОЛОДЦА:

по желанию заказчика

МОНТАЖНЫЕ ПЛОЩАДКИ:

металлизированные / неметаллизированные

СПОСОБ ГЕРМЕТИЗАЦИИ:

пайка / сварка

ПОКРЫТИЕ:

никель-золото / никель

- Короткие сроки проектирования и изготовления

- Производимые корпуса соответствуют мировым стандартам качества

- Поставка изделий с приемкой «1» и «5» со склада и под заказ

- Компания «ТЕСТПРИБОР» сертифицирована на право разработки и производства продукции ВВТ

- Контроль производства осуществляется ВП МО РФ

