

# 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  $(50 \pm 2)$  Ом, прецизионных вводов –  $(50 \pm 1)$  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

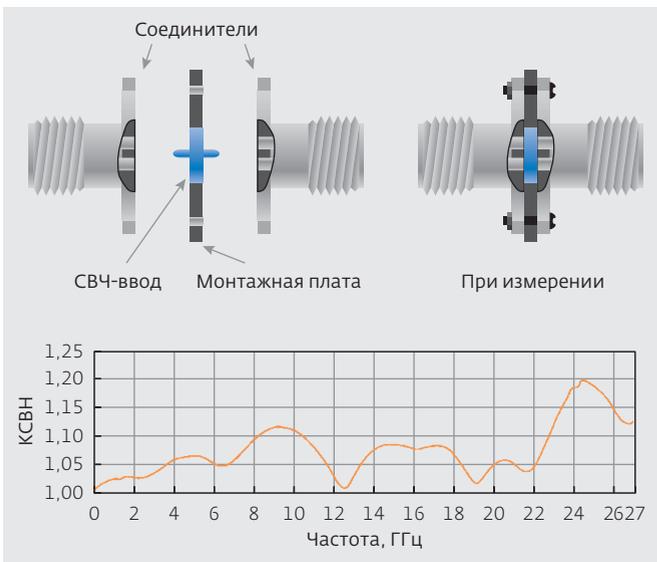
Таблица 1. Формулы для расчета электрических параметров вводов

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:	$\Delta Z_0$	$\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\Delta D}{D}$ $\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\Delta d}{d}$ $\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}$ $\Delta Z_0 = -240 \cdot \left(\frac{e^2}{D^2 + d^2}\right)$ $\frac{\Delta Z_0}{Z_0} = -\frac{\Delta \epsilon}{2\epsilon}$
допуска на $\varnothing D$ , мм	$\Delta D$	
допуска на $\varnothing d$ , мм	$\Delta d$	
допусков $\Delta D$ и $\Delta d$ , 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:	$\alpha$	$\alpha_{мет} = \frac{1,98 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D}\right)}{\log \frac{D}{d}} \sqrt{\epsilon \mu \rho f}$ $\alpha_{диэл} = 9,08 \cdot 10^{-8} f t g \delta \sqrt{\epsilon}$ $\alpha_{общ} = \alpha_{мет} \cdot \alpha_{диэл}$
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;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $tg\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь изолятора; f – частота;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материалов проводников, (Ом·мм<sup>2</sup>)/м;  $\mu$  – 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.

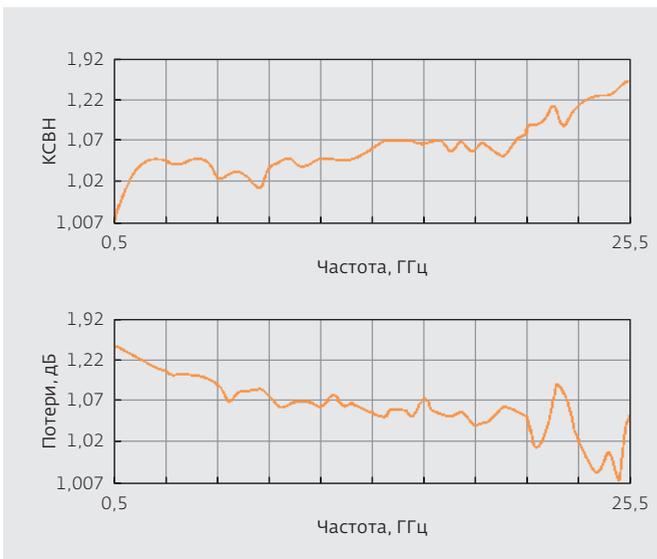
Высокочастотные потери вводов условно разделяют на потери в проводниках и потери в диэлектрике. Потери в проводниках пропорциональны  $\sqrt{f}$  и зависят от размеров проводников и свойств материалов, из которых они изготовлены. При этом около 80% всех потерь приходится на потери в центральном проводнике 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

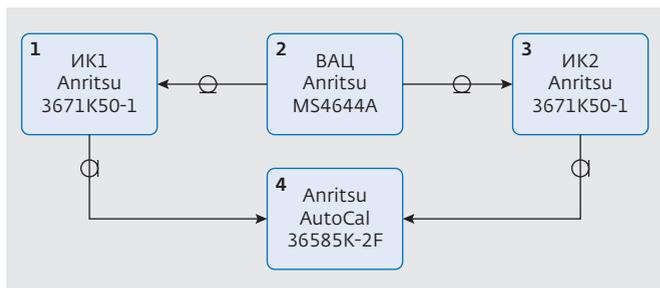


Рис.4. Блок-схема установки для калибровки нового диапазона частот векторного анализатора цепей (ВАЦ): 1 и 3 – измерительные кабели (ИК1 и ИК2); 2 – ВАЦ; 4 – модуль автоматической калибровки

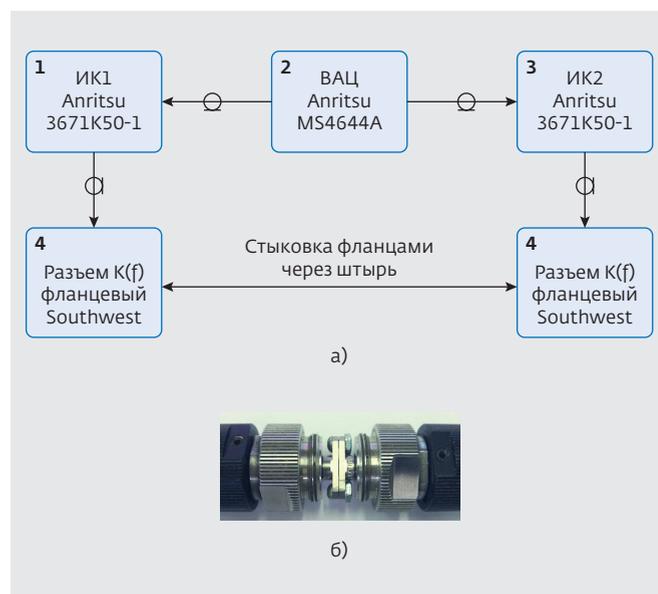


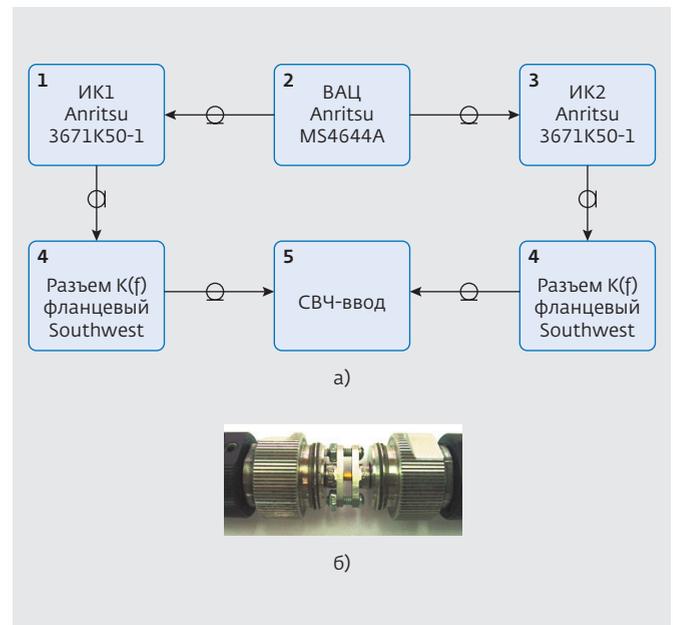
Рис.5. Блок-схема установки пользовательской калибровки ВАЦ (а) и внешний вид измерительных соединителей (б) (обозначения 1, 2, 3 и 4 такие же, как на рис.4)

**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),



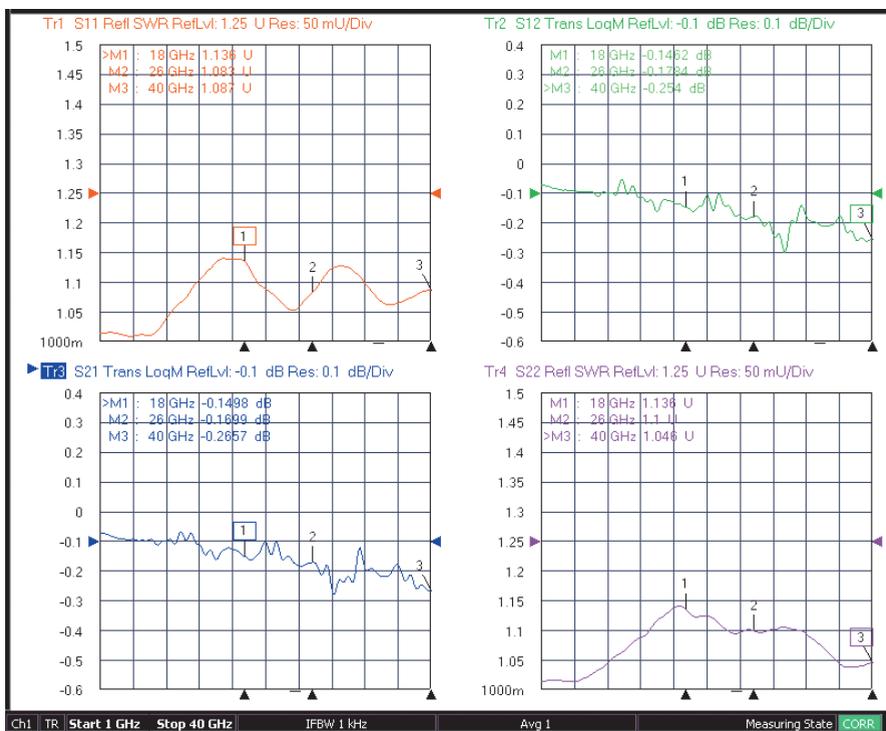
**Рис.6.** Блок-схема установки измерения параметров вводов (а) и внешний вид измерительных соединителей с вводом между ними (б) (обозначения 1, 2, 3 и 4 такие же, как на рис.4)

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

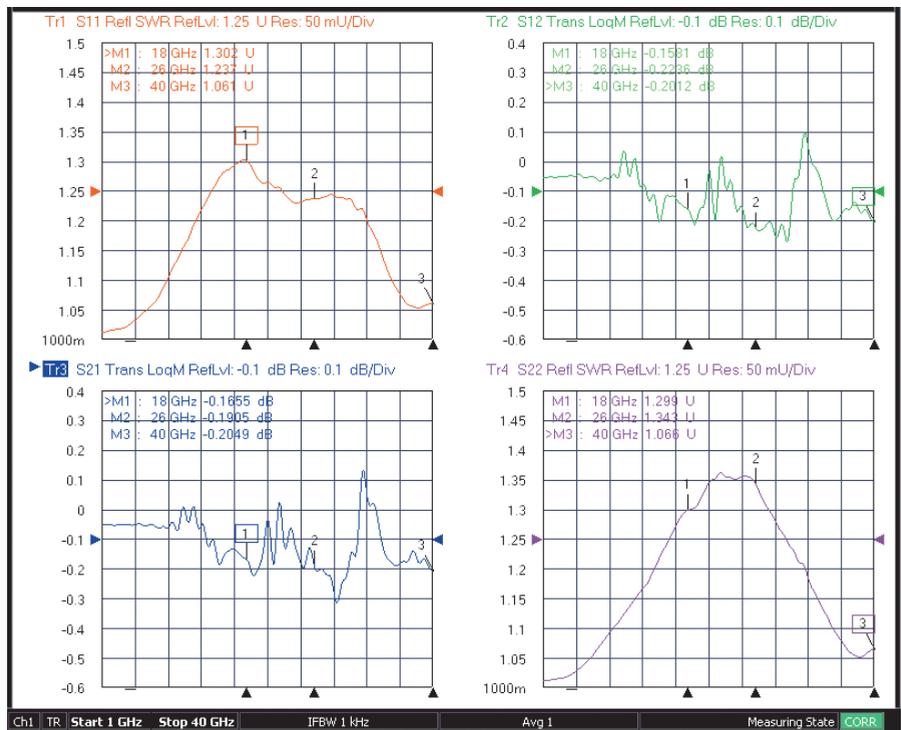


Рис.8. S-параметры ввода КРПГ.433434.015-02 ( $\varnothing d = 0,4$ )

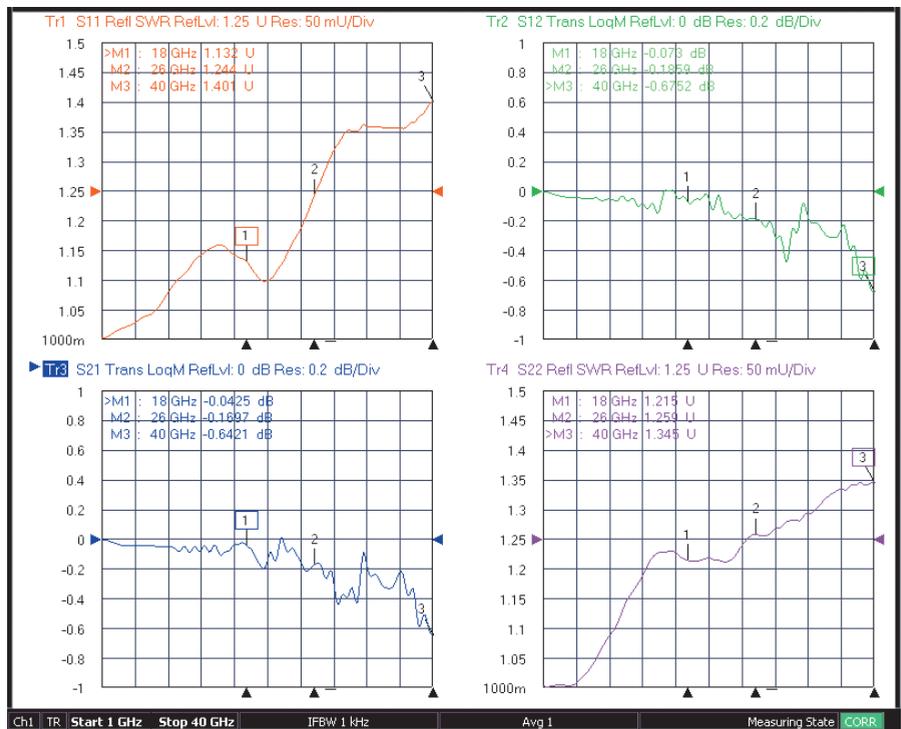


Рис.9. S-параметры ввода КРПГ.433434.015-03 ( $\varnothing d = 0,5$ )

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-микроразветвляемых переходов. – Компоненты и технология, 2008, №4, с.53.
6. [www.southwestmicrowave.com](http://www.southwestmicrowave.com)

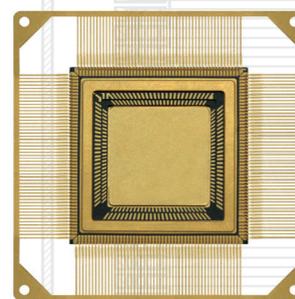
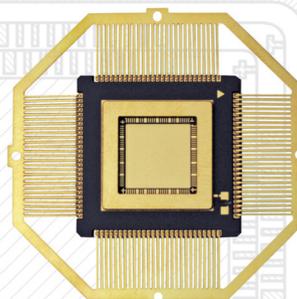
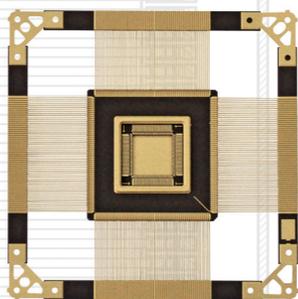
# МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫЕ КОРПУСА

## 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

