

# Разработка переходов между ПрМВ и планарным интегрированным волноводом для 5G

Е.А. Серафимова, С.С. Чуркин, А.В. Можаровский

ООО Радио Гигабит

**Аннотация:** В данной работе представлены результаты разработки переходов с прямоугольного металлического волновода (ПрМВ) размера WR-28 на интегрированный в подложку (substrate integrated waveguide, SIW) волновод, изготовленный на однослойной печатной плате (ПП) из материала Rogers RT/Duroid 5880. Такие переходы находят применение в системах миллиметрового диапазона волн, где одновременно используется выход ПрМВ и устройства СВЧ интегрированные в ПП. В данной работе представлены результаты разработки двух конструкций таких переходов: “зондового” и “резонаторного” типов. Результаты лабораторных измерений прототипов подтвердили результаты моделирования S-параметров: малые вносимые потери <0.5 дБ и высокие обратные потери >15 дБ в интересующем диапазоне частот 27.5-29.5 ГГц.

**Ключевые слова:** SIW, прямоугольный металлический волновод, печатная плата, 5G

## 1. Введение

Технология волноводов, интегрированных в подложку, перспективна для разработки компонентов миллиметрового диапазона, в т.ч. для применений в 5G. SIW представляет собой волновод с диэлектрическим заполнением, выполненный в ПП, верхняя и нижняя (широкие) стенки которого образованы слоями металлизации ламината, а боковые стенки образованы рядами сквозных переходных отверстий, расположенных с определенным шагом для предотвращения утечки волны из этих стенок. SIW обладает важными преимуществами: выполнен с помощью техпроцесса ПП и имеет относительно низкую стоимость производства по сравнению с полым МВ, малые размеры, низкий профиль, малый вес и плоскую форму, которая хорошо подходит для устройств с высокой плотностью компонентов [1]. Недостатком SIW по сравнению с полым МВ можно считать относительно более высокие вносимые потери, уровень которых, однако, существенно ниже уровня потерь в микрополосковой (МПЛ) или полосковой линиях.

С другой стороны, полые ПрМВ, используются в оборудовании мм диапазона как линии передачи с низкими потерями и как выходные интерфейсы, в т.ч. для подключения измерительного оборудования. В настоящее время SIW не используется как стандартный интерфейс, поэтому необходим переход между ПрМВ и SIW.

## 2. Конструкции ПрМВ и SIW

В таблице 1 приведены основные технические требования к разрабатываемым переходам.

Таблица 1. Требования к переходам

Рабочий диапазон частот	Уровень вн. потерь (IL)	Уровень обр. потерь (RL)	Формат фланца ПрМВ	Конфигурация осей ПрМВ и SIW
27.5–29.5 ГГц	< 0.5 дБ	> 15 дБ	7.112×3.556 мм (WR28)	ПрМВ перпендикулярен SIW

Размеры сечения волновода WR-28 определены рабочим диапазоном частот Ка-

полосы, а размеры SIW были получены расчетом эквивалентного ПрМВ с диэлектрическим заполнением [4]. Размер широкой стенки эквивалентного волновода можно представить как:

$$siw_{a_{eff}} = siw_a - \frac{1.08d^2}{p} + \frac{0.1d^2}{siw_a} = 5.3 \text{ мм} \quad (1)$$

где  $siw_a$  – ширина между центрами переходных отверстий,  $p$  – шаг,  $d$  – диаметр переходных отверстий, как показано на рис.1.

Для фундаментальной моды  $H_{10}$  частота отсечки составляет:

$$f_{cr_{H10}} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r} \cdot siw_{a_{eff}}} \approx 19.1 \text{ ГГц} \quad (2)$$

Диэлектрической подложкой служит материал Rogers RT/Duroid 5880, который обладает диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=2.2$  и малым тангенсом угла диэлектрических потерь  $tg \delta=0.00125$ . Высота SIW и соответствующая толщина подложки была выбрана равной 0.787 мм для снижения потерь в волноводе и переходе.

Будем считать поперечный размер SIW-волновода по оси Y ( $siw_a$ ) шириной, высоту ПП по оси Z ( $h$ ) высотой волновода. Толщина медной фольги обозначена  $t$ .

### 3. Переходы зондового и резонаторного типов

Конструкция зондового перехода содержит прямоугольную апертуру (вырез) в одном из слоев металлизации SIW, к которой подсоединен участок ПрМВ с выступом в широкой стенке (т.н. “зонд”, probe). Отрезок волновода с зондом выполнен отдельной деталью и является элементом импедансного согласования (трансформатором) между ПрМВ и SIW. Внутренний профиль алюминиевого адаптера с зондом, представленный на рис.1а, был оптимизирован с помощью электромагнитного моделирования для обеспечения требуемого рабочего диапазона.

В переходе резонаторного типа используется дополнительный резонатор, рассчитанный на моду высшего типа, стенка которого имеет аналогичную предыдущему переходу апертуру для подключения ПрМВ. В качестве основной рабочей моды SIW-резонатора была выбрана мода  $TE_{130}$ , резонансная частота которой может быть найдена по эквивалентному прямоугольному резонатору с заполнением.

$$f_{130} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{1}{cv_{b_{eff}}^2} + \left(\frac{3}{cv_{a_{eff}}}\right)^2} = 28.7 \text{ ГГц} \quad (3)$$

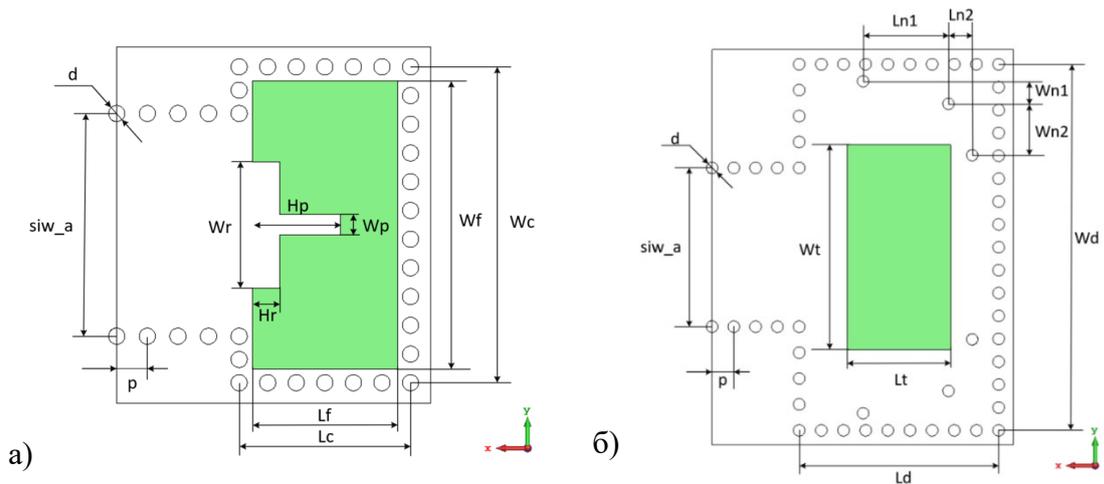
Для увеличения связи между SIW-резонатором и SIW-волноводом в резонаторе были размещены дополнительные металлизированные переходные отверстия (рис.1б), которые являются согласующими индуктивностями. Отличие перехода резонаторного типа от зондового в отсутствии дополнительного адаптера, а фланец ПрМВ может быть подсоединен непосредственно к ПП.

В таблице 2 приведены геометрические размеры для двух типов переходов.

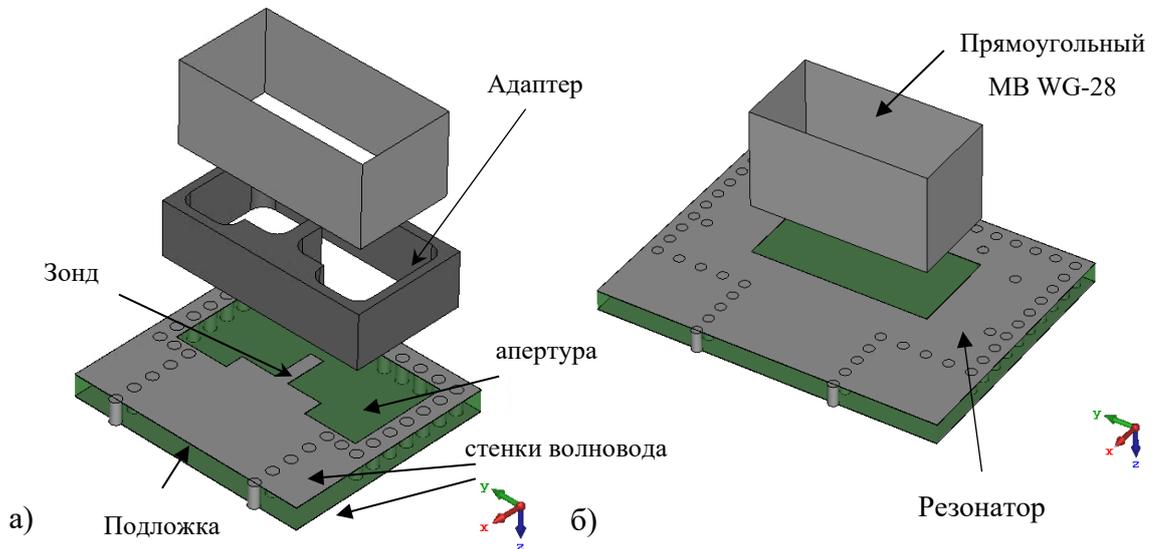
Таблица 2. Размеры переходов (в миллиметрах)

Общие размеры					Переход зондового типа							
$siw_a$	$p$	$d$	$h$	$t$	$L_f$	$W_f$	$L_c$	$W_c$	$H_r$	$W_r$	$H_p$	$W_p$
					3.556	7.112	4.2	7.8	0.675	3.12	2.16	0.5
					Переход резонаторного типа							
5.5	0.75	0.4	0.787	0.018	$L_d$	$W_d$	$L_t$	$W_t$	$L_{n1}$	$W_{n1}$	$L_{n2}$	$W_{n2}$
					6.87	12.68	3.556	7.112	2.942	0.776	0.817	1.784

На рис.2 изображены их конструкции в изометрии.

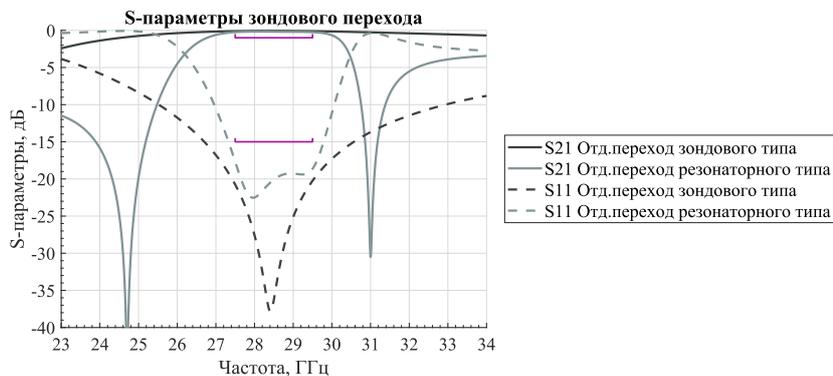


**Рисунок 1.** Вид и геометрические размеры двух типов переходов WR28-SIW: а – переход зондового типа; б – переход резонаторного типа.



**Рисунок 2.** Конструкция переходов WR28-SIW: а – переход зондового типа; б – переход резонаторного типа.

Результаты моделирования отдельных переходов WR28-SIW зондового и резонаторного типов представлены на рис.3.



**Рисунок 3.** Результаты моделирования S-параметров отдельных переходов WR28-SIW зондового и резонаторного типов

#### 4. Прототипы тестовых сборок переходов и результаты измерений

Поскольку при лабораторных измерениях прототипов переходов используются стандартные коаксиально-волноводные переходы (КВП) WR-28, то тестовые структуры для верификации разработанных переходов представляют собой back-to-back сборки пар переходов, которые показаны на рис.4: пара зондовых переходов с участком SIW длиной 30 и 20 мм (I, II), пара резонаторных переходов с участком SIW длиной 20 и 30 мм (III, IV).

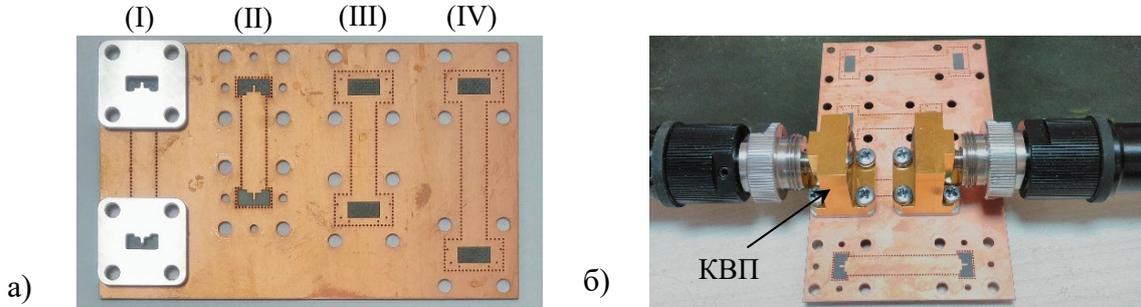


Рисунок 4. Изготовленные образцы переходов и схема измерений

Сравнение результатов электродинамического моделирования и измерений тестовых структур переходов представлены на рис.5 и рис.6.

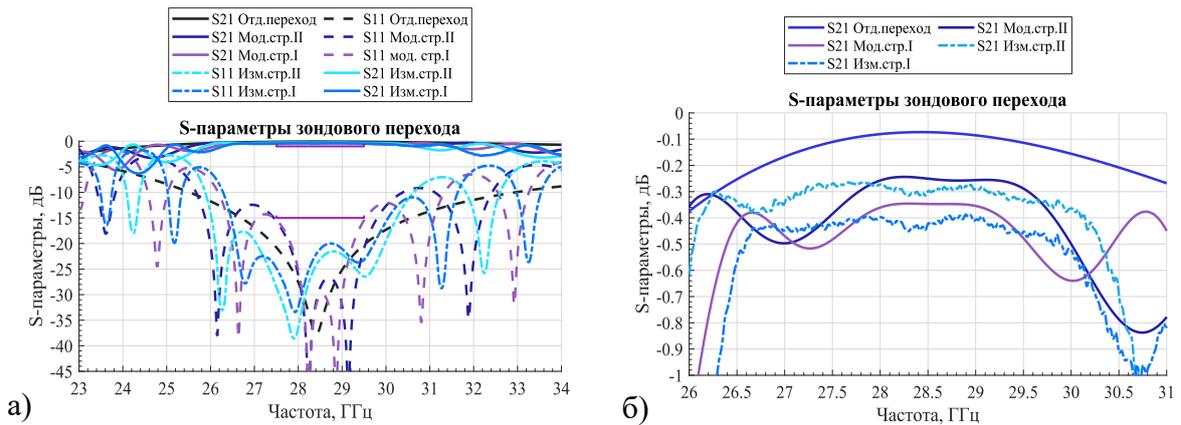


Рисунок 5. Результаты моделирования S-параметров и эксперимента перехода WR28-SIW зондового типа: а – в полосе 23...34 ГГц; б – S21 детально в полосе 26...31 ГГц.

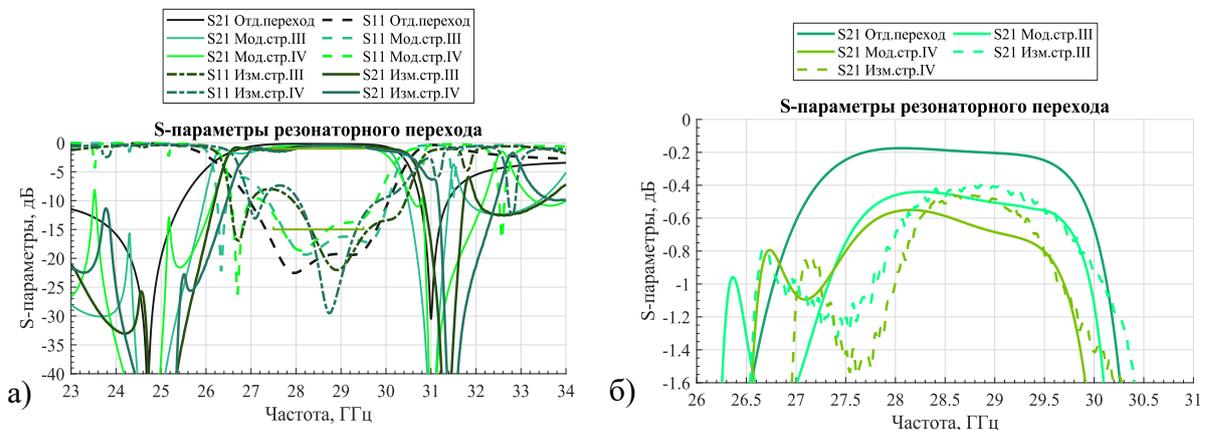


Рисунок 6. Результаты моделирования и эксперимента перехода WR28-SIW резонаторного типа: а – в полосе 23...34 ГГц; б – S21 детально в полосе 26...31 ГГц.

Результаты моделирования и измерений тестовых структур, в целом хорошо согласуются. Можно сделать вывод, что переходы удовлетворяют исходным требованиям при учете характерных искажений S-параметров в back-to-back сборках и дополнительных потерь в двух КВП.

Для сборки зондовых переходов: уровень  $RL > 15$  дБ, малый уровень  $IL < 0.5$  дБ. Тестовая структура переходов резонаторного типа обладает всплеском коэффициента отражения на частоте 27.5 ГГц, поэтому уровень вносимых потерь достигает 1.5 дБ. В остальном интересующем диапазоне  $IL \sim 0.6$  дБ. Уровень обратных потерь сборки резонаторных переходов может быть оценен в 10 дБ. По разности потерь между 20 и 30-мм структурами оценка уровня потерь 10 мм участка SIW в этом диапазоне составляет  $< 0.1$  дБ. Соответственно, экспериментально полученный уровень вносимых отдельными переходами потерь может быть оценен в 0.1 дБ и 0.15 дБ для переходов зондового и резонаторного типов соответственно.

Для сборки резонаторных переходов: согласование по уровню -18 дБ и малый уровень вносимых потерь не более 0.6 дБ. Полоса по уровню -3 дБ составляет 26.2-30.5 ГГц. На графиках измерений наблюдается частотный сдвиг +400 МГц относительно результатов моделирования и всплеск коэффициента отражения в районе 26.7 ГГц. Этот всплеск коэффициента отражения напрямую зависит от длины линии связи между двумя резонаторами. Таким образом, этот эффект характерен исключительно для системы прямых измерений пар резонаторных переходов и не отражает качества отдельных переходов. Преимущество перехода резонаторного типа – отсутствие дополнительных конструктивных элементов (адаптера), а стандартный фланец WR28 может быть непосредственно подсоединен к ПП.

## Заключение

В данной работе представлены результаты разработки и экспериментального исследования переходов двух типов между ПрМВ и SIW для диапазона 27.5-29.5 ГГц. Показано хорошее соответствие между результатами моделирования и измерений, а разработанные переходы удовлетворяют поставленным требованиям. Характерный уровень вносимых в рабочей полосе потерь отдельных переходов составляет: 0.1 дБ и 0.2 дБ для отдельного перехода зондового и резонаторного типа соответственно, а уровень коэффициента отражения по входу в рабочей полосе не превышает: -19 дБ для и -18 дБ. Разработанные переходы обладают малыми габаритными размерами, могут быть выполнены с помощью стандартного техпроцесса на ПП с двумя слоями металлизации и эффективны в применениях техники 5G.

## Список литературы

1. T. Li, et al. Broadband right-angle transition from substrate-integrated waveguide to rectangular waveguide// *Electronic Letters*. – 2014. – Т. 50. – № 19. – С. 1355-1356.
2. J. Dong, et al. Full Ka-band right-angle transition from substrate integrated waveguide to air-filled rectangular waveguide// *Electronic Letters*. – 2015. – Т. 51. – № 22. – С. 1796-1798.
3. L. Li et al. A Transition from Substrate Integrated Waveguide (SIW) to Rectangular Waveguide // *Microwave Conference, APMC*. – 2009. – С. 2605-2608
4. M. Kirillova, et. al. A Novel Technique for Operational Band Extension of SIW-Based Resonant Slot Array Antennas for 5G// *Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC)*, Saint Petersburg, Russian Federation. – 2023. – С. 26-30