

# Интегрированные в подложку волноводы, их свойства и применимость при решении практических задач X- и Ku-Диапазонах

А.В. Парижанкова, В.В. Демшевский, И.А. Богачев, С.Б. Ключев, С.С. Сидоренко,  
В.В. Лободин

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** В работе рассмотрена применяемая в СВЧ- и КВЧ-диапазонах направляющая волнующая структура - интегрированный в подложку волновод. Проведен сравнительный анализ характеристик интегрированного в подложку волновода с характеристиками основных типов полосковых линий передачи. Проведена оценка применимости стандартных технологических процессов изготовления полосковых линий передачи для изготовления рассматриваемой линии передачи - интегрированный в подложку волновод.

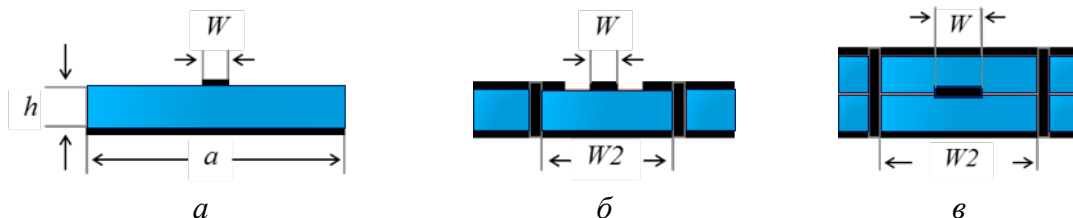
**Ключевые слова:** СВЧ-элементы, микрополосковая линия, заземленная копланарная линия, симметричная полосковая линия, интегрированный в подложку волновод, электромагнитная совместимость, коэффициент прохождения, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость

## 1. Введение

Процесс развития радиоэлектронных устройств (РУ) все более направлен на усложнение их конструкции и обуславливает требования к их многофункциональности и характеристикам в СВЧ- и КВЧ-диапазонах. Для реализации предъявляемых требований в настоящее время уделяется внимание не только к разработке, проектированию, конструированию и применению новых типов линий передач (ЛП) в РУ, но их комбинация с базовыми полосковыми ЛП (например, микрополосковой линией, копланарной линией и др.), а также их интегрирование в существующие технологические процессы изготовления печатных плат.

Наиболее распространенным видом печатных линий передачи, применяемых на практике в современных РЭС, являются несимметричная микрополосковая линия (МПЛ), заземленная копланарная линия, экранированная симметричная полосковая линия (рисунок 1).

Широкополосные свойства полосковых линий, как двухпроводных и коаксиальных, обусловлены распространением в них *ТЕМ*-волн, которые, как известно не имеют отсечки.



**Рисунок 1.** Общий вид МПЛ (а), заземленной копланарной линии (б) и экранированной симметричной полосковой линии (в)

Интегрированные в подложку волноводы, в зарубежной литературе Substrate Integrated Waveguides (SIW), представляют собой волноводоподобные элементы, созданные двумя рядами металлических цилиндров, расположенных в

диэлектрической подложке и соединяющих два параллельных слоя металлизации (рисунок 2). В результате, объемный классический прямоугольный волновод может быть изготовлен в планарной форме с применением существующих интегральных технологий производства печатных плат. При этом ИПВ – это закрытый тип линий СВЧ, сочетающий в себе свойства как классических волноводов (те же самые частотные и дисперсионные характеристики), так и свойства микрополосковых линий (размеры, вес и стоимость изготовления).

Ширина ИПВ является наиболее важным параметром, влияющим на распространение ЭМВ внутри их структуры. В типичной конструкции ИПВ (рисунок 2) – это расстояние между двумя рядами переходных металлизированных отверстий. Из-за цилиндрической формы переходных отверстий, это расстояние нельзя использовать напрямую, так как ЭМВ внутри ИПВ не ведет себя точно так же, как в классическом прямоугольном волноводе той же ширины [1].

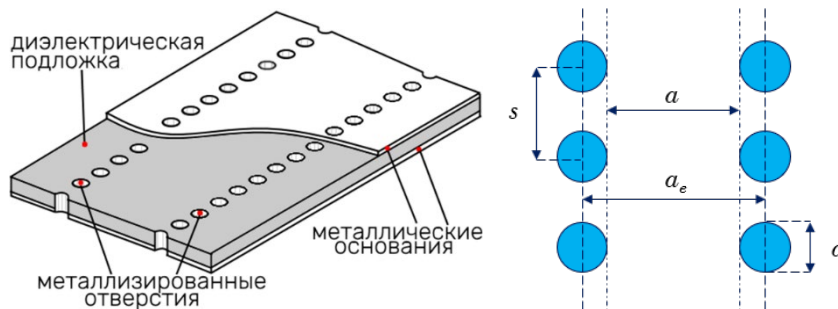


Рисунок 2. Общий вид ИПВ

Из работы [6] известно, что ИПВ имеют потери при передаче сигнала меньше, чем микрополосковые линии, однако системные исследования по этому вопросу в отечественной и зарубежной научно-технической литературе не приведены. Более того, при разработке устройств на основе ИПВ возникает потребность каждый раз рассчитывать исходные параметры линии (ширина, диаметр и шаг отверстий) под заданный диэлектрик.

Количество публикаций по тематике ИПВ на сегодняшний день достаточно большое и имеет тенденцию к росту, так как растет и практическое применение этого типа ЛП, особенно в спутниковых системах различного назначения.

## 2. Постановка задачи

В работе исследованы и представляются результаты расчета характеристик ИПВ на 4-х типах диэлектриков с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  равной 2.2, 3.38, 6.15 и 10.2.

Поперечный размер  $a$  для ИПВ был выбран для ряда стандартных сечений  $a \times b$  классических прямоугольных волноводов, а их электродинамические характеристики рассчитаны в различных полосах частот, представленных ниже. Физическая длина волноводов, ИПВ и исследуемых типов микрополосковой и копланарной линий в каждом из поддиапазонов частот была одинаковой и определена как  $10 \times \lambda_{кр}$  для классических прямоугольных волноводов. Толщина диэлектрической подложки была равна  $h=0.635$  мм (одна из стандартных толщин диэлектриков для многослойных ламинатов марки *Rogers*). Соотношение поперечных размеров ИПВ и классического прямоугольного волновода, а также поперечных размеров сигнальных проводников  $w$  и ширин линий  $w_2$  для других исследуемых ЛП (несимметричная МПЛ и заземленная копланарная линия) для различных материалов. Отметим, что МПЛ и заземленная копланарная линия во всех случаях имеют входное сопротивление 50 Ом.

### 3. Сравнение характеристик ИПВ с другими типами линий

Для проведения комплексных исследований, были разработан, построен и рассчитан ряд строгих электродинамических моделей ИПВ. На рисунке 3(а, б), показаны результаты электродинамических расчетов коэффициента передачи  $S_{21}$ , выполненных на различных материалах диэлектрических подложек.

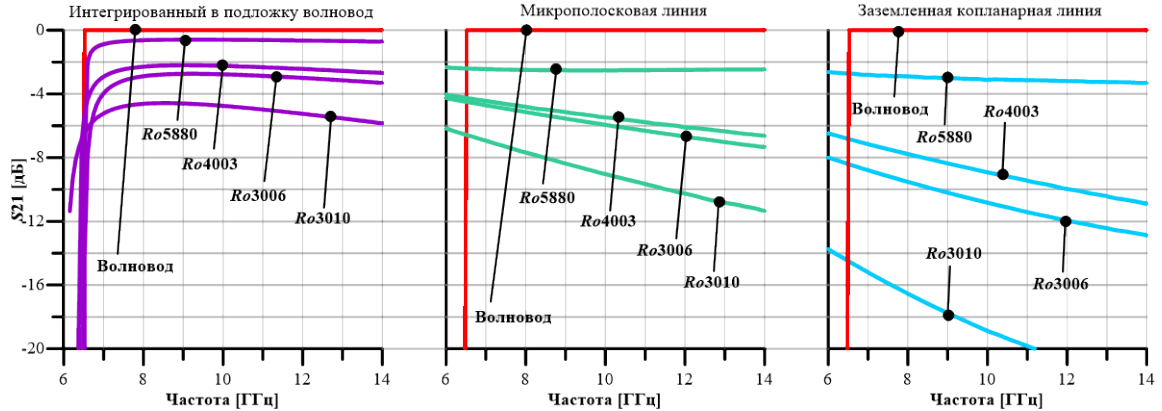


Рисунок 3(а). Коэффициент передачи ЛПВ в X-диапазоне частот

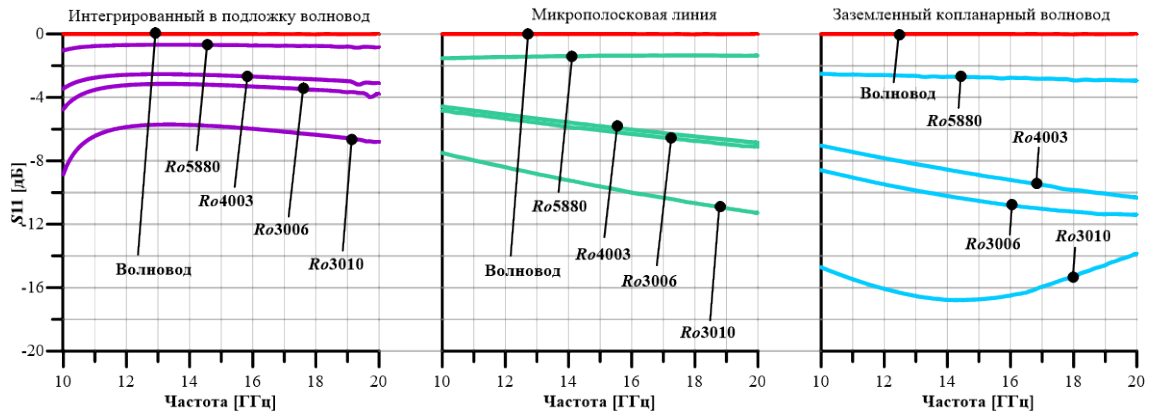


Рисунок 3(б). Коэффициент передачи ЛПВ в Ku-диапазоне частот

Анализируя рис. 3(а, б), видно, что отрезки ЛПВ на основе ИПВ имеют явное преимущество по коэффициенту передачи в сравнении с МПЛ и ЗКЛ, выполненных на тех же материалах.

При использовании результатов исследования для проектирования и конструирования РУ, стоит обратить внимание на то, что размеры ИПВ при увеличении рабочей частоты и увеличении  $\epsilon$  материала подложки, становятся меньше (Таблица 1а – X-диапазон, 1б – Ku-диапазон), чем размеры полосков МПЛ и ЗКЛ, что делает ИПВ более предпочтительным решением для использования, особенно если учитывать их экранированную структуру.

Таблица 1 (а). Размеры линий передачи в X-диапазоне.

№ п/п	Материал диэлектрической подложки	Прямоугольный волновод $a \times b$	Интегрированный в подложку волновод $a \times h$	Несимметричная микрополосковая линия $w \times h$	Заземленная копланарная линия $w2 \times h$
1.	Ro5880	16x8 мм	10.8x0.635 мм	2.5 x0.635 мм	8 x0.635 мм
2.	Ro4003	16x8 мм	8.69x0.508 мм	1.1 x0.508 мм	4 x0.635 мм
3.	Ro3006	16x8 мм	6.47x0.635 мм	0.9 x0.635 мм	4 x0.635 мм
4.	Ro3010	16x8 мм	5x0.635 мм	0.6 x0.635 мм	3 x0.635 мм

Таблица 1 (б). Размеры линий передачи в Ku-диапазоне.

№ п/п	Материал диэлектрической подложки	Прямоугольный волновод $a \times b$	Интегрированный в подложку волновод $a \times h$	Несимметричная микрополосковая линия $w \times h$	Заземленная копланарная линия $w2 \times h$
1.	Ro5880	11x5.5 мм	7.43x0.635 мм	2.5 x0.635 мм	8 x0.635 мм
2.	Ro4003	11x5.5 мм	5.97x0.508 мм	1.1 x0.508 мм	4 x0.635 мм
3.	Ro3006	11x5.5 мм	4.45x0.635 мм	1 x0.635 мм	4 x0.635 мм
4.	Ro3010	11x5.5 мм	3.4x0.635 мм	0.6 x0.635 мм	3 x0.635 мм

#### 4. Экранированные свойства ИПВ и технические рекомендации.

Ранее в представленной статье говорилось о металлизированных переходных отверстиях, которые образуют стенки ИПВ. При практической реализации интегрированных в подложку волноводов особое внимание уделяется определению соотношения диаметра металлизированного отверстия  $d$  и расстоянию между центрами соседних отверстий (или периоду)  $s$ . При этом нельзя встретить строгих рекомендаций по выбору отношения  $d/s$ , потому что этот вопрос затрагивает не только сходимость решения электродинамической задачи, но и реальную технологическую возможность изготовления таких отверстий с заданным шагом на выбранном материале, гарантированно обеспечивая качественную их металлизацию и не допуская разрывов материала в промежутке между отверстиями.

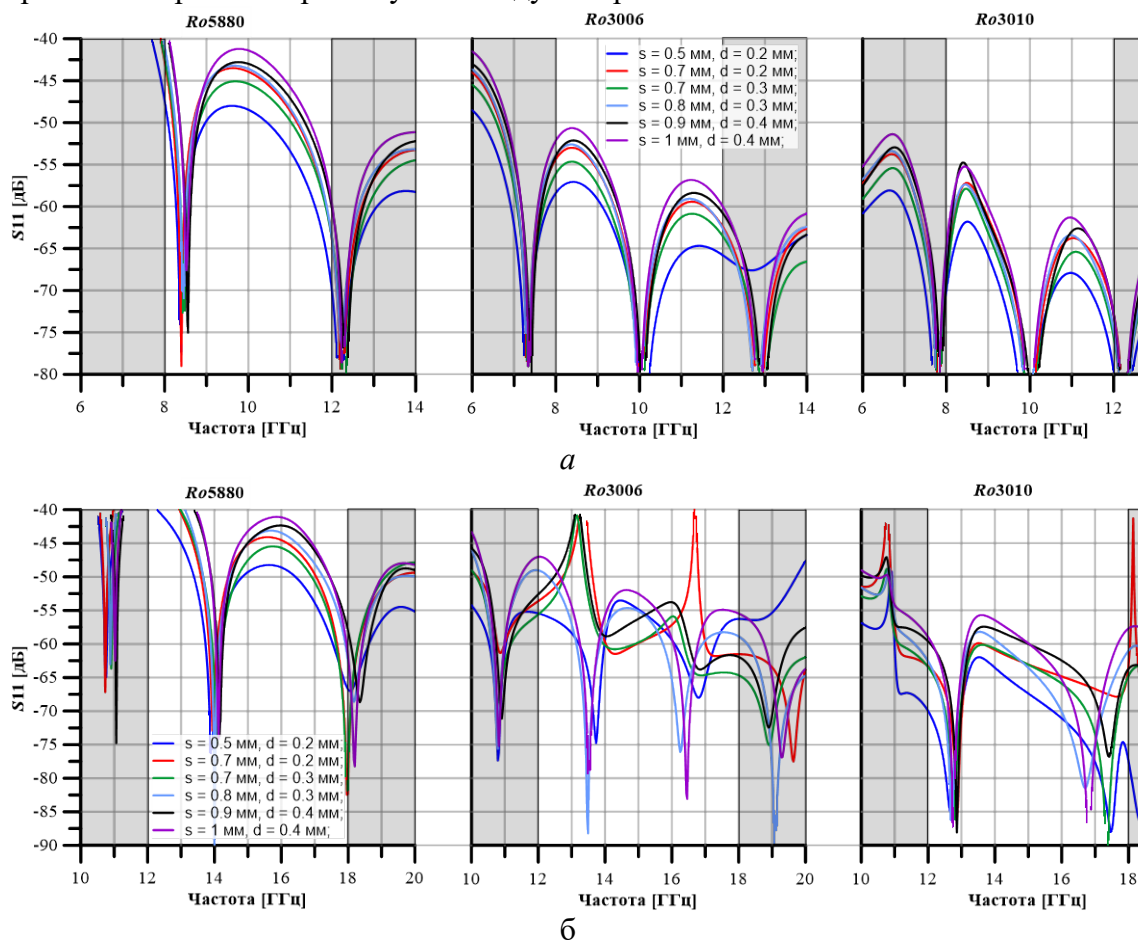


Рисунок 4. Влияние диаметра и шага переходных металлизированных отверстий на распространение ЭМП ИПВ (а – X-диапазон частот, б – Ku-диапазон частот)

Из практики применения ИПВ в радиотехнических (радиоэлектронных) устройствах (особенно для  $Ku$ -диапазона и ниже) диаметр переходных отверстий предлагается выбирать из условия  $d=0.1 \times \lambda_{кр. equ}$ . где  $\lambda_{кр. equ}$  – критическая длина волны. Наш практический опыт работы с ИПВ, отраженный в публикациях [7, 8], показал, что в  $X$  и  $Ku$  диапазонах, достаточно  $d=0.6$  мм и  $s=1$  мм для обеспечения всех требуемых характеристик. Причем это соотношение актуально для всех материалов.

#### 4. Выводы

Результаты, представленные в статье, показывают применимость стандартной технологии создания печатных плат для изготовления-производства ИПВ и их основных свойств для проектирования современных многофункциональных РУ. Установлено, что размеры ИПВ с ростом частоты, пропорционально уменьшаются вместе с длиной волны, но при этом коэффициент передачи в них остается примерно на том же уровне. При этом следует учитывать размер переходных металлизированных отверстий и шаг между ними, потому что они могут существенным образом повлиять и на согласование, и на коэффициент передачи в ИПВ.

Несмотря на то, что ИПВ – это полностью закрытые структуры, для того чтобы использовать их в составе РУ, РЭС или отдельных блоков, требуется разработка специальных переходов в которых могут быть и дополнительные потери, и рассогласование. Сами эти переходы часто являются открытыми и подвержены влиянию внешнего ЭМП.

Основные выявленные недостатки ИПВ – это ширина рабочей полосы для ряда устройств, которая как правило не более 40% и проблема согласования СВЧ-переходов МПЛ-ИПВ и коаксиальный кабель-ИПВ.

ИПВ уже начинают активно применяться в технике, работающей в СВЧ- и КВЧ-диапазонах и, даже более, вплоть до частот 1 ТГц. На их основе строятся не просто отдельные элементы, наподобие делителей мощности, циркуляторов, фильтров, направленных ответвителей и т.д., но и целые каскады многослойных плат, а также ФАР и АФАР.

#### Список литературы

1. Danyang Huang / The Concept of Substrate Integrated E-plane Waveguide and Circuits // All Theses, Dissertations, and Other Capstone Projects. – 2016. – P. 590.
2. Denis G. Chen / Substrate Integrated Waveguide with Corrugated Wall / Denis G. Chen and Kimberley W. Eccleston // IEEE, 978-1-4244-2642-3/08. – 2008.
3. Belenguer, A. / Empty Substrate Integrated Waveguide Technology for E plane High-Frequency and High-Performance Circuits / Belenguer, A., J. L. Cano, H. Esteban, E. Artal, and V. E. Boria // Radio Sci. – 2016. – Vol. 52. – P. 49–69.
4. Hiba Abdel Ali / Cost-effective and Green Manufacturing Substrate Integrated Waveguide (SIW) BPF for Wireless Sensor Network Applications / Hiba Abdel Ali, Rachida Bedira, Rachida Bedira, Hichem Trabelsi, Ali Gharsallah // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2016. – Vol. 7, No. 6. – P. 150-154.
5. Mohamad Khalil / Half-Mode Slow-Wave Substrate Integrated Waveguide Analysis / Mohamad Khalil, Mahmoud Kamarei, Jalal Jomaah, Hussam Ayad, Majida Fadlallah // Progress in Electromagnetics Research M. – 2016. – Vol. 60. – P. 169–178.
6. T. Djerafi / Design and Implementation of a Planar 4×4 Butler Matrix in SIW Technology for Wide Band High Power Applications / T. Djerafi, N.J.G. Fonseca, K. Wu // Progress in Electromagnetics Research B. – 2011. – Vol. 35. – P. 29-51.
7. V.V. Demshevsky / Theoretical an experimental study of the microstrip structure in closed space / V.V. Demshevsky, A.A. Tsitovich, M.S. Levashov // RSEMW – 2017.
8. В.В. Демшевский / Разработка и электродинамический анализ СВЧ-плат на основе волновода, интегрированного в подложку / В.В. Демшевский, А.А. Цитович, М.С. Левашов // Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника. - 2018. – Вып. 3 (538) - С. 25 – 30.