

УДК

# Проектирование полосового SIW-фильтра Ku-диапазона

С.И. Горбунов, Д.А. Фролов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Аннотация:** в данной статье представлен новый тип фильтра с высококачественными электрическими характеристиками и гибкостью изготовления, основанных на недавно внедренной технологии – SIW (интегрированный с подложкой волновод). Разработанный фильтр работает в Ku диапазоне с полосой пропускания 11,5%.

**Ключевые слова:** полосовой фильтр, SIW-фильтр, интегрированный с подложкой волновод, волноводы

## 1. Введение

Высокая избирательность, низкие вносимые потери, небольшие размеры и невысокая стоимость — главные задачи при проектировании и производстве микроволновых схем. Традиционные технологии такие как микрополосковые и волноводные, неспособны обеспечить все эти характеристики одновременно. Фактически, прямоугольные волноводы обладают низкими вносимыми потерями и высокой избирательностью. Однако их производство является дорогостоящим, а их интеграция с другими компонентами систем требует специального перехода от интегральных структур к волноводу.

Для микрополосковых схем характерна низкая добротность, но они обладают лучшей совместимостью с интегральными схемами и низкой стоимостью изготовления. Эти ограничения и стали поводом использовать технологию substrate integrated waveguide (SIW), чтобы объединить соответствующие преимущества упомянутых ранее технологий. На рисунке 1 представлены виды резонаторов относительно их потерь, размеров и стоимости, из которых видно различие СВЧ-технологий относительно друг друга [1].

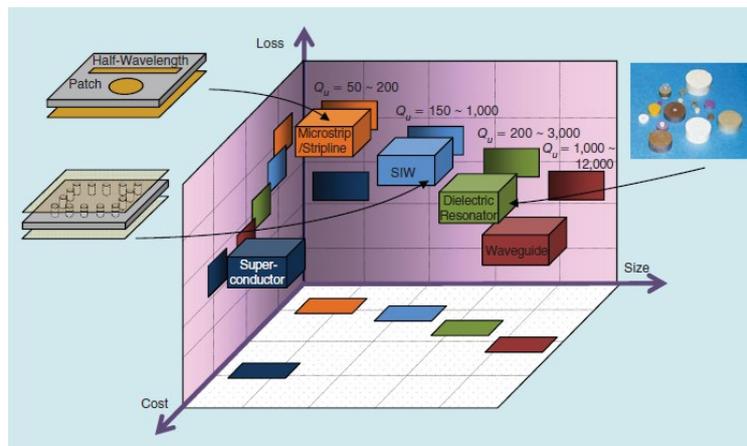


Рисунок 1. Относительные вносимые потери, размер и стоимость различных ВЧ-резонаторов.

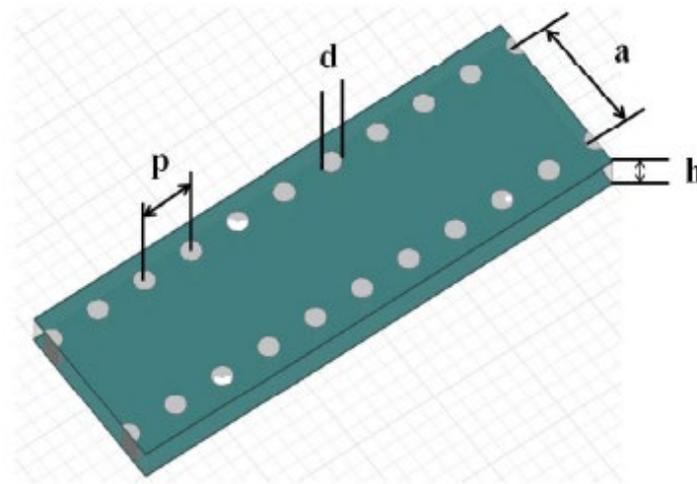
Эта концепция связывает использование планарной технологии и функционирование полостей, в которых будет распространяться электромагнитная волна [2]. Технически, полости включены в подложку и ограничены металлизацией

для верхней и нижней граней, а для боковых граней рядами металлических отверстий. Металлические отверстия, у которых рассчитан диаметр и расстояние между ними, будут являться электрическими стенками [2-4]. Однако замена электрических стенок металлическими отверстиями подразумевает, что паразитные волны не могут резонировать.

SIW-технология была успешно применена в концепции плоских компактных компонентов для применения в микроволновой печи и на миллиметровых волнах. Например, фильтры [3-5], работают на миллиметровых длинах волн, а фильтры [4-7] на субмиллиметровых длинах волн. Результаты показывают, что добротность таких фильтров превышает те схемы, которые могут быть получены с помощью планарной технологии.

## 2. Конструкция SIW-структуры

SIW-структура образована двумя плоскостями сплошного проводника, разделенными диэлектрической подложкой, со стороны проводника – стенки имитированы рядами металлизированных сквозных отверстий. Геометрия и расположение переходных отверстий показаны на рисунке 2[8].



**Рисунок 2.** Геометрические параметры SIW-структуры:  $p$  – расстояние между центрами двух соседних переходов;  $d$  – диаметр отверстий;  $a$  – расстояние между двумя центрами параллельных отверстий;  $h$  – толщина диэлектрика.

Ширина SIW-структуры — это расстояние  $a$  между двумя рядами отверстий, которое определяется от центра к центру и обозначается  $a$ . Расстояние между двумя последовательными отверстиями одного ряда равно  $p$ , а диаметр отверстий обозначается  $d$ . Для расчетов необходимо знать длину волны несущей сигнала —  $\lambda$ .

Расчет значений производится по формулам [9]:

$$a < \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon}} < 2a \quad (1)$$

$$d < \frac{\lambda}{5} \quad (2)$$

$$s < 2d \quad (3)$$

В классическом прямоугольном волноводе с твердыми стенками распространение включает суперпозицию поперечных электрических (H) и магнитных (E) волн. Каждая из них связана с определенными полями и токами. В случае E-волн ток в вертикальных стенках является продольным, т.е. параллельным оси распространения, обычно обозначаемой как  $z$ . Тогда, учитывая вертикальную геометрию отверстий, появление таких режимов в SIW-структуре невозможно: электрический ток не может распространяться от отверстия к отверстию. Только H волны способны распространяться через SIW-структуру.

Каждая волна появляется выше точной частоты среза, определяемой размерами волновода и заполняющей средой. Для E-волны уменьшение толщины волновода (обычно обозначаемой как  $b$ ) увеличивает частоту среза на  $1/b$ . В случае SIW-структуры толщина настолько мала, что частота среза E-волны намного выше, чем волна, на которую спроектирована SIW-структура.

### 3. Результаты

В данной работе представлена модель SIW фильтра Ku-диапазона (12-18 ГГц) с полосой пропускания 1 ГГц. Для моделирования SIW фильтра использовалась программа CST Studio Suite [10].

Расчеты размеров производятся, для фильтра, настроенного на несущую частоту сигнала 16 ГГц. Размеры отверстий, а также расстояния между ними также вычислены по известным формулам [9],  $d = 0,3$  мм,  $a = 9$  мм,  $p = 1$  мм,  $\lambda = 18,7$  мм

Из получившихся размеров создали модель в программе. Подложкой служил материал от компании Rogers RO4003, с диэлектрической проницаемостью 3,55 и толщиной диэлектрика 0,203 мм, толщина металлизации равна 0,01 мм, металл — серебро.

Для обеспечения нужной полосы, в фильтр добавлены резонаторы. Для этого на верхнем слое металлизации добавлены 4 «окна». На рисунке 3 представлена топология фильтра, добавленные резонаторы обозначены цифрами (1-3).

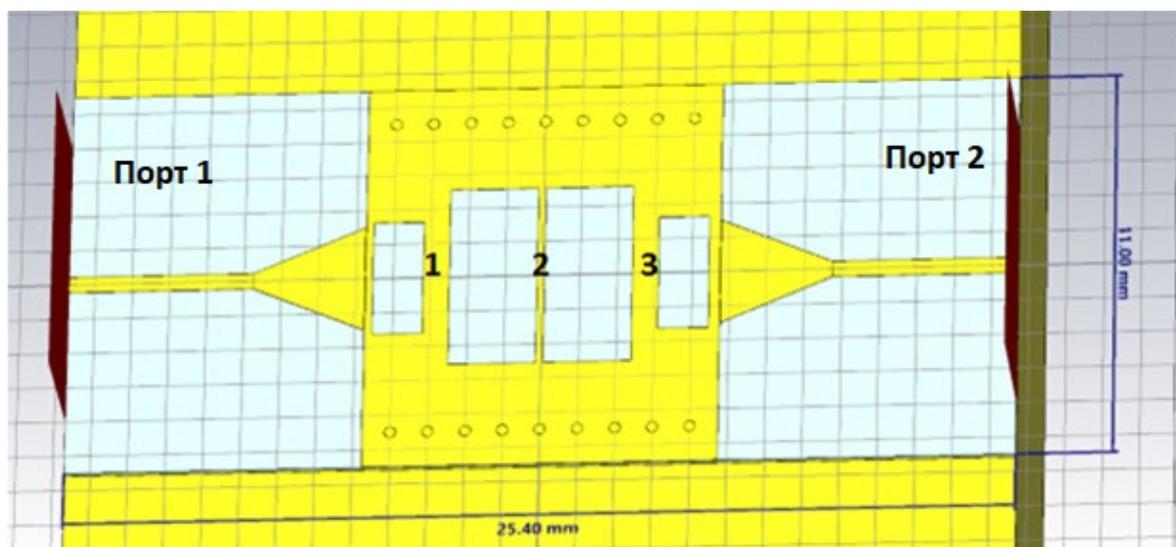


Рисунок 3. 3D модель SIW фильтра в программе CST Studio Suite.

На рисунке 4 изображены S-параметры фильтра, рассчитанные в программе CST Studio Suite ( $S_{11}$  – коэффициент отражения,  $S_{12}$  – коэффициент прохождения). Фильтр работает на центральной частоте 16 ГГц, его коэффициент отражения не превышает 15 дБ, а коэффициент прохождения равен 0,4 дБ. Полоса по уровню 3 дБ составляет 11,5%.

Также в программе была рассчитана добротность фильтра и составила она 586.

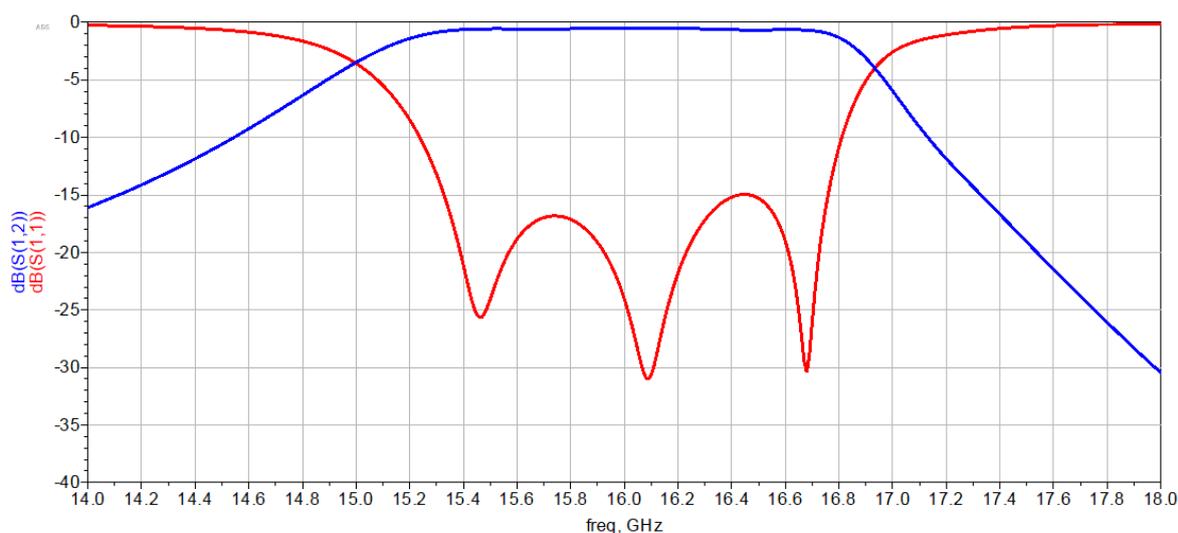


Рисунок 4. S-параметры SIW-фильтра.

Полученные характеристики фильтра сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Характеристики фильтра

Уровень	Полоса пропускания	$f_n$	$f_b$
3 дБ	1,85 ГГц	15,03 ГГц	16,88 ГГц
<b>Частота</b>		<b>Потери</b>	
16 ГГц		-0,4 дБ	
<b>Частота</b>		<b>Заграждение</b>	
17,5 ГГц		-20 дБ	
<b>Частота</b>		<b>КСВ</b>	
15,5 ГГц		1,06	
16,5 ГГц		1,29	
17,5 ГГц		30,2	
<b>Добротность (Q)</b>		586	

#### Список литературы

1. Armin Smajevic, "Substrate Integrated Waveguide (SIW) and Superconducting Filters", 2022
2. Bouchra Rahali and Mohammed Feham, "Design of K-Band substrate integrated waveguide coupler, circulator and power divider," International Journal of Information and Electronics Engineering, 2014.
3. Yongmao Huang, Zhenhai Shao and Lianfu Liu, "A substrate integrated waveguide bandpass filter using novel defected ground structure shape," Progress In Electromagnetics Research, vol. 135, pp. 201-213, 2013.
4. K. Nouri, K. Haddadi, O. Benzaïm, T. Lasri and M. Feham, "Substrate integrated waveguide (SIW) inductive window band-pass filter based on post-wall irises," The European Physical Journal Applied Physics, vol. 53, 2011.
5. K. Nouri, M. Feham, Mehdi Damou and Tayeb Habib Chawki Bouazza, "Design of substrate integrated waveguide micro-wave planar directional coupler," International Journal of Scientific & Engineering Research, 2014.
6. Nouri Keltouma, Feham Mohammed and Adnan Saghir, "Design and characterization of tapered transition and inductive window filter based on Substrate Integrated Waveguide technology (SIW)," International Journal of Computer Science Issues, 2011.

7. D. Zelenchuk, V. Fusco, “Low insertion loss substrate integrated waveguide quasi-elliptic filters for V--band wireless personal area network applications,” IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2010.
8. Ya Guo, “Designs of Substrate Integrated Waveguide (SIW) and transition to Rectangular Waveguide”, 2015.
9. Chandra Sekhar Panda, Rashmiranjan Nayak, Santanu Kumar Behera, “Design and Analysis of a Compact Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter for Ku Band Applications”, 2016
10. А.А. Курушин., “Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE – М”, 2016.