

# Компактный полосно-пропускающий фильтр, выполненный по SIW-технологии на бумажной подложке

Сдобнова Варвара Павловна  
Физический факультет  
Южный Федеральный Университет  
Ростов-наДону, Россия  
sdobnova@sfedu.ru

Крутиев Сергей Владимирович  
Физический факультет  
Южный Федеральный Университет  
Ростов-наДону, Россия  
skrutiev@sfedu.ru

**Аннотация** — В работе представлена возможность уменьшения массогабаритных размеров путем сгибания фильтра. В ходе работы был проведен электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающего фильтра третьего порядка. Данные фильтры выполнены, используя SIW-технологии, которая приобрела большую популярность благодаря возможности уменьшения массогабаритных размеров устройства по сравнению с классическим прямоугольным волноводом. Проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик компьютерной модели и изготовленного фильтра. Продольный размер удалось уменьшить в 7 раз по сравнению с фильтром прототипом.

**Ключевые слова**— *полосно-пропускающий фильтр; SIW-технология; фильтр; диэлектрик; диэлектрическая проницаемость.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

С появлением спутниковых систем и беспилотных летательных аппаратов стал резко возрастать спрос на полосно-пропускающие и полосно-пропускающие фильтры волноводного исполнения [1]. Основным недостатком волноводных фильтров является их большой объем и большой вес из-за размеров образующих их волноводных полостей, которые напрямую зависят от рабочей длины волны. Следовательно, развитие спутниковых систем и летательных аппаратов стимулировало поиск возможностей миниатюризации волноводных систем.

Современные технологии проектирования интегральных микросхем дают возможность интегрировать в структуру трехмерные элементы, в том числе и прямоугольные волноводы. Технология интегрирования волновода в подложку получила широкое распространение благодаря уменьшению массогабаритных размеров и относительно низкой стоимости производства по сравнению с твердотельными прямоугольными волноводами. Такая технология была названа SIW-технологией. Дословно SIW (Substrate Integrated Waveguide) переводится как интегрированный в подложку волновод.

SIW-технология представляет собой волноводную структуру, которая создана двумя рядами

металлических штырей, соединяющих две металлические пластины, ограничивающие диэлектрическую подложку.

Данная технология приобрела большую популярность благодаря тому, что SIW-структура объединяет в себе преимущества классических прямоугольных волноводов (большая передаваемая мощность, малые потери, полностью экранированная структура, высокая добротность резонаторов) и особенности планарных структур, приобретая малые размеры и вес, а также относительно низкую стоимость производства [2].

SIW-фильтры широко применяются в системах передачи информации, в средствах радиоэлектронной борьбы, а так же в спутниковых системах [3, 4].

Распространение электромагнитных волн внутри SIW идентично распространению в прямоугольных волноводах, а основная мода аналогична моде  $TE_{10}$  прямоугольного волновода [5].

Потери в SIW-структурах больше, чем в классических прямоугольных волноводах за счет наличия диэлектрической подложки, поэтому для полосно-пропускающих фильтров, изготовленных по технологии SIW, основным вкладом во вносимые потери являются омические потери в диэлектрической подложке и переходных отверстиях.

Применение SIW-технологии позволяет уменьшить массогабаритные характеристики как уже известных устройств, так и новых. Уменьшение массогабаритных характеристик устройств позволит летательным аппаратам таким как беспилотникам, спутникам и самолетам брать на борт больше полезной нагрузки.

В данной работе представлен трехслойный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр, который получен путем сложения однослойного устройства, выполненного по SIW-технологии. Увеличение слоев путем сгибания устройства позволяет уменьшить продольный размер устройства и незначительно увеличить его высоту, т. к. толщина подложки составляет 1.5 мм при диэлектрической проницаемости  $\epsilon=2.54$ . За прототип был взят полосно-пропускающий фильтр, выполненный по SIW-технологии, процесс синтеза которого описан [6, 7]. Полосно-пропускающий фильтр третьего порядка был согнут таким образом, чтобы сохранить симметрию устройства. Одной из главных задач было сохранение амплитудно-частотной характеристики при уменьшении продольного размера

---

Работа выполнена в Южном федеральном университете при поддержке Российского научного фонда, номер гранта № 22-79-00127 «Разработка гибких частотно-селективных устройств с применением SIW-технологии для спутников и беспилотных летательных аппаратов»

устройства. Был проведен электродинамический анализ и синтез трехслойного полосно-пропускающего фильтра, выполненного по SIW-технологии. Результатом синтеза стала компьютерная модель, которая показала хорошее совпадение с амплитудно-частотной характеристикой фильтра прототипа. В результате была изготовлена модель трехслойного полосно-пропускающего фильтра, а также проведено сравнение АЧХ двух изготовленных моделей фильтров.

Все устройства в данном исследовании выполнены на диэлектрической подложке из бумаги с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=2.85$ . Компьютерное моделирование проводилось в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ

В работах [7, 8] были представлены результаты электродинамического анализа и синтеза однослойного фильтра прототипа. На рис. 1 представлен чертеж полосно-пропускающего фильтра прототипа, выполненного по SIW-технологии.

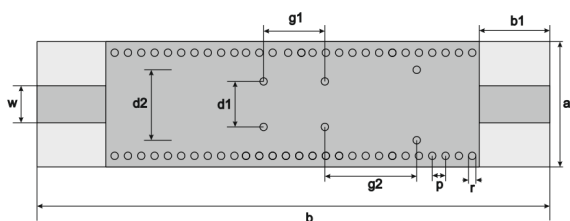


Рис. 1. Чертеж фильтра прототипа.

Размеры данного фильтра прототипа соответственно:  $d1=7.8$  мм,  $d2=8.8$  мм,  $g1=9.5$  мм,  $g2=7.2$  мм,  $r=0.51$  мм,  $p=1.82$  мм,  $a=13.91$  мм,  $w=5.27$  мм,  $w0=2.1$  мм,  $L=60$  мм,  $b1=10$  мм,  $b=40$  мм,  $a=16,9$  мм.

Также в работе [7, 8] показана возможность свернуть однослойный полосно-пропускающий фильтр первого порядка. Электродинамический анализ и синтез позволил смоделировать трехслойный полосно-пропускающий фильтр третьего порядка рис. 2.

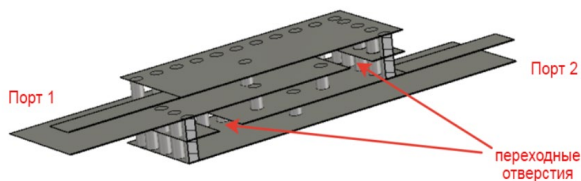


Рис. 2. Сечение трехслойного фильтра третьего порядка, выполненного по SIW-технологии без диэлектрических слоев.

На рис. 3 показана амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра ( $S_{11}$  –

пунктирная линия,  $S_{21}$  – сплошная линия).

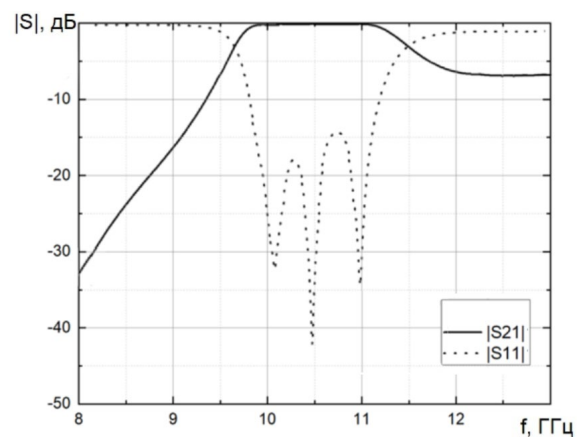


Рис. 3. АЧХ трехслойного полосно-пропускающего фильтра третьего порядка.

На рис. 4 показано сравнение амплитудно-частотных характеристик компьютерной модели однослойного фильтра и модели подобного фильтра, выполненного на бумажной подложке. (Крупными пунктиром результаты фильтра на бумажной подложке) Из графика можно сделать вывод, что характеристики практически совпадают. Потери в фильтре на бумажной подложке незначительно больше, это связано с толщиной слоя и отражений на переходных отверстиях.

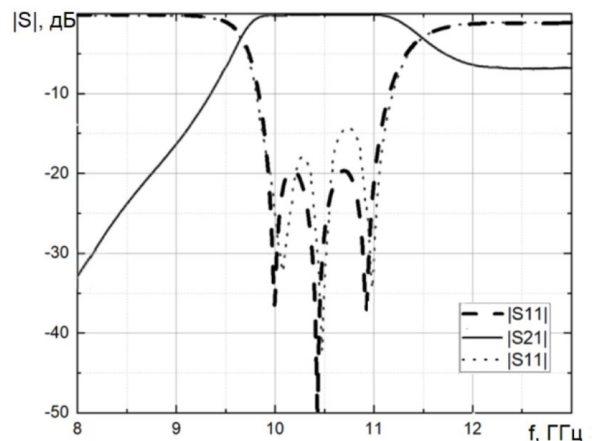


Рис. 4. Сравнение АЧХ компьютерной модели фильтра и модели фильтра на бумажной подложке.

По результатам моделирования был изготовлен полосно-пропускающий фильтр третьего порядка на бумажной подложке (рис. 5). Амплитудно-частотные характеристики изготовленного фильтра приведены на рис. 6. (крупными точками обозначены результаты эксперимента). Как видно из графика, результаты компьютерного моделирования и эксперимента показали хорошее совпадение. Различия в результатах обусловлены точностью производства, однородностью диэлектрической подложки.

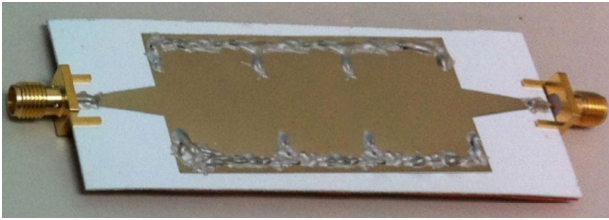


Рис. 5. Изготовленный фильтр третьего порядка на бумаге.

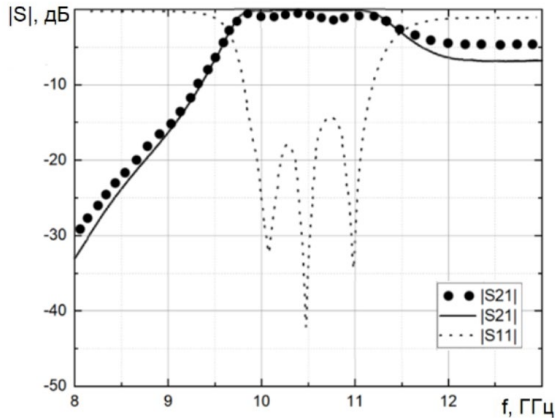


Рис. 6. Сравнение АЧХ виртуальной модели и физической реализации фильтра третьего порядка

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающих фильтров третьего порядка, выполненных по SIW-технологии на бумаге. Было проведено сравнение амплитудно-

частотных характеристик для устройства выполненного на FR4 и бумажной подложке.

Удалось уменьшить высоту устройства в 7 раз. При этом результат сравнения амплитудно-частотных характеристик показал хорошее совпадение, что дает возможность дальнейшего развития темы исследования.

#### ИСТОЧНИКИ

- [1] Innovations in Microwave Filters and I33 Multiplexing Networks for Communications Satellite Systems Chandra Kudsia, Member, IEEE, Richard Cameron, and Wai-Cheung Tang, Member, IEEE
- [2] Гадзиева, А.А., Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В., Крутиев, С.В., SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития, Физические основы приборостроения, 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 4–13.
- [3] Заргано, Г.Ф., Ляпин, В.П., Михалевский, В.С. и др. Волноводы сложных сечений. - М.: Радио и связь, 1986. – 124 с.
- [4] Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В. Электродинамический анализ и синтез селективных устройств на волноводах сложного сечения для современных антенно-фидерных систем, Антенны, 2011. - Вып. 7 (170). – С. 64–73.
- [5] F. Xu and K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 53, no. 1, pp. 66–73, Jan. 2005.
- [6] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, A., Sdobnova, V. Synthesis of Band-Pass Filters Made Using SIW Technology, 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 118–122
- [7] Sdobnova, V., Krutiev, S., Lonkina, D. Compact Three-layer Band-pass Filter Based on SIW-technology, Proceedings of the 2023 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St.Petersburg, January 24-26, 2024. Pp. 141 — 143
- [8] Varvara P. Sdobnova; Sergey V. Krutiev; Alla S. Makhno; Daria V. Lonkina Compact Band-Pass Filter Made Using SIW Technology Published in: 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202143, Conference Location: Divnomorskoe, Russian Federation