

*Демшевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С.  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

## **Разработка и электродинамический анализ СВЧ-плат на основе волновода, интегрированного в подложку**

*Проведена разработка и теоретическое исследование 4-х канального делителя мощности, выполненного на основе интегрированного в подложку волновода. Определены параметры тройника и поворота, входящих в состав делителя/сумматора мощности, в полосе рабочих частот. На их базе был построен 4-х канальный делитель мощности X-диапазона в полосе 8-11 ГГц с разбросом менее чем 0.4° по фазе и 0.5 дБ по амплитуде. Представлены теоретические результаты, которые сравниваются с ранее разработанными делителями мощности на основе других СВЧ-линий передач. Разработанный делитель мощности с низким профилем подходит для интеграции в цепи распределения СВЧ мощности.*

**Ключевые слова:** Интегрированный в подложку волновод, коэффициент передачи, СВЧ-линии передачи, делитель мощности.

В многоканальных передающих системах широкое применение находят делители/сумматоры мощности. Требования, предъявляемые к делителям/сумматорам мощности, обычно определяются их областью применения. В составе фазированных антенных решеток делители/сумматоры мощности должны обеспечивать в выходных плечах требуемое амплитудно-фазовое распределение для формирования диаграммы направленности решетки. Существенную роль играют массогабаритные характеристики устройств, стоимость и технологичность изготовления.

В связи с тем, что в электронной промышленности существует тенденция к уменьшению массогабаритных показателей и расширению функциональных возможностей устройств, исследуются новые методы и подходы, позволяющие добиться расширения рабочей полосы частот, управляемости/реконфигурируемости параметров, характеристик и уменьшения габаритных размеров по сравнению с традиционными аналогами.

Так развитие современной микросистемной техники привело к появлению новых трехмерных структур в составе многослойных интегральных микросхем – SIW (Substrate Integrated Waveguide – интегрированный в подложку волновод), которые представляет собой волноводоподобные элементы, созданные двумя рядами металлических цилиндров в диэлектрической подложке и соединяющих два параллельных слоя металлизации (Рис.1). В результате, классический прямоугольный волновод может быть изготовлен в планарной форме с применением существующих технологий производства, например, керамики с низкой температурой обжига (LTCC) при этом сохраняя свои основные свойства (большая передаваемая мощность, малые потери, полностью экранированная структура, дисперсионные характеристики). Интегрированные волноводы могут конкурировать с печатными линиями СВЧ так как имеют малые размеры и вес, а также низкую стоимость производства.

В ходе выполнения представленной работы был проведен расчет и исследование параметров интегрированного волновода и получены требуемые характеристики(Рис.2).

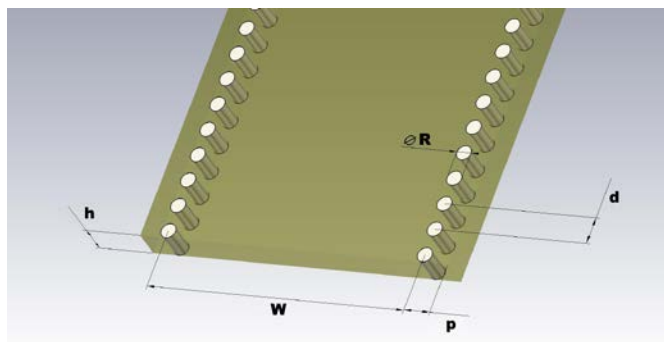


Рис.1. Линия передачи, сделанная по технологии SIW

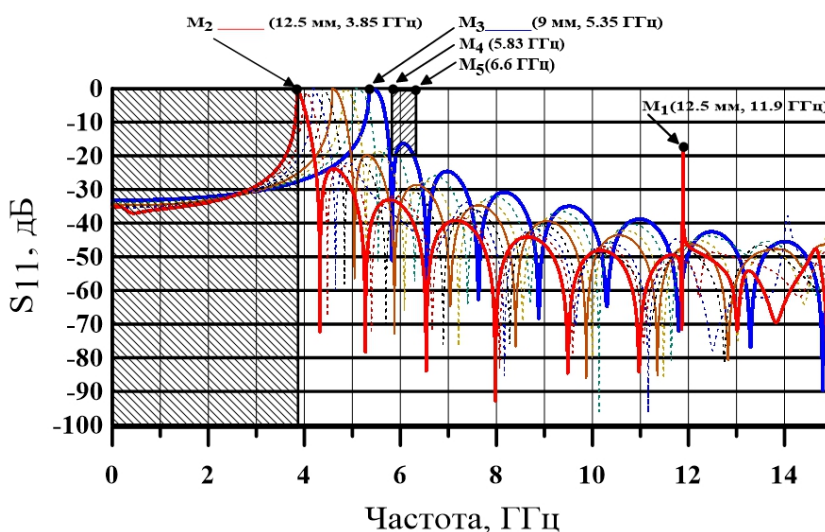


Рис.2.  $S_{11}$  интегрированного волновода в зависимости от  $W$

Размеры интегрированного волновода были получены численным методом с применением алгоритма оптимизации доверительными областями. Далее для построения распределительной системы были применены общие соображения для прямоугольного волновода. Схема тройника (Рис.3 а) и поворота с клином (Рис. 3 б).

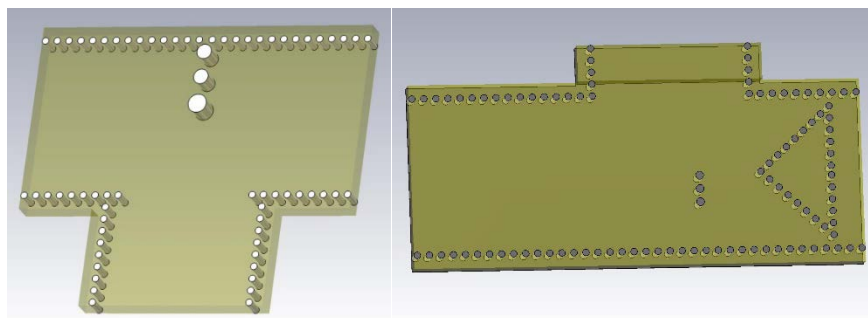
Основными элементами 4-х канального делителя/сумматора мощности на основе интегрированного волновода являются Т-образный тройник и поворот «Клин». Тройник сделан по принципу, реализуемому в прямоугольных волноводах, в качестве перегородки используются металлизированные отверстия переменного радиуса  $R$ .

Конструкция поворота выполнена на основе клина треугольной формы с согласующими металлизированными отверстиями перед клином. Так как повороты нарушают регулярность тракта и являются источником паразитных отражений, то отработка конструкции поворота проводилась по условию минимального значения коэффициента стоячей волны.

Разработанный 4-канальный делитель мощности на основе интегрированного волновода показан на Рис.4 (в). Достоинства данной реализации технологичность, габариты и широкополосность.

Проведем сравнение характеристик полученного четырехканального делителя/сумматора мощности с другими делителями/сумматорами реализованными на основе иных типов СВЧ-линий передачи (Рис.4 а,б). Для расчетов в качестве подложки во всех случаях использовался материал RO4003. Исследования проводились в диапазоне

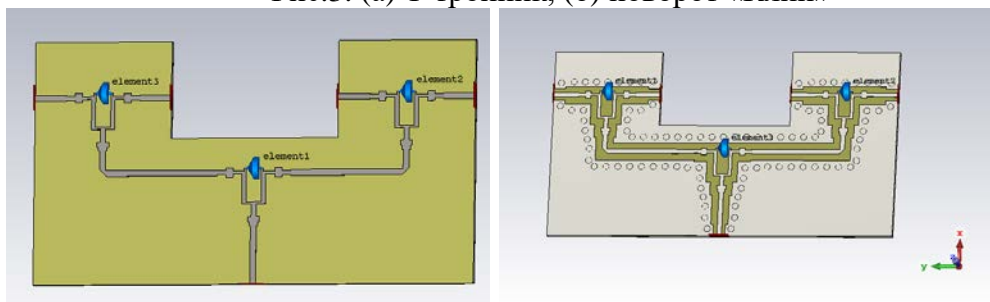
частот  $f=6-14$  ГГц. В ходе исследования в диапазоне частот анализировались такие параметры как коэффициент передачи, фаза на выходах и КСВ.



а

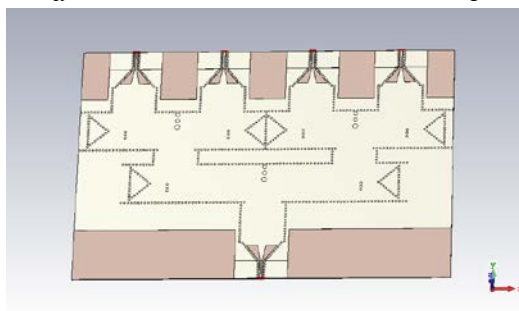
б

Рис.3. (а) Т-тройник, (б) поворот «Клин»



а

б



в

Рис.4. Делители/сумматоры мощности

Как видно из полученных графиков, наибольшую рабочую полосу обеспечивает несимметричная микрополосковая линия, однако, наибольшую равномерность характеристики можно увидеть для заземленной копланарной линии. Делитель/сумматор выполненный на основе интегрированного волоновода показывает некоторые средние характеристики в сравнении с представленными линиями. На его характеристике четко видна отсечка в нижней части диапазона, обусловленная  $\lambda/4$ , как и для обычного прямоугольного волновода и отсечка в верхней части диапазона, обусловленная наличием участка перехода к заземленной копланарной линии, поэтому делитель на основе SIW потенциально может работать в более широкой полосе частот (Рис.2), если модифицировать переход к другой линии передач.

Отличие фазы сигнала между выходами во всех рассмотренных случаях в их рабочем диапазоне менее чем  $0.4^\circ$ . Однако, несимметричная микрополосковая линия является открытой структурой и нахождение вблизи полосков металлических элементов (части корпуса, СВЧ-соединители, винты и т.д.) может существенно влиять на всю ее амплитудно-фазовую характеристику. Этот вывод отчасти касается и делителя/сумматора на основе заземленной копланарной линии, так как он является полуоткрытой структурой и также

может быть подвержен воздействию паразитных эффектов извне. Наиболее защищенным с этой точки зрения является делитель на основе интегрированного волновода, так как фактически является полностью закрытой структурой.

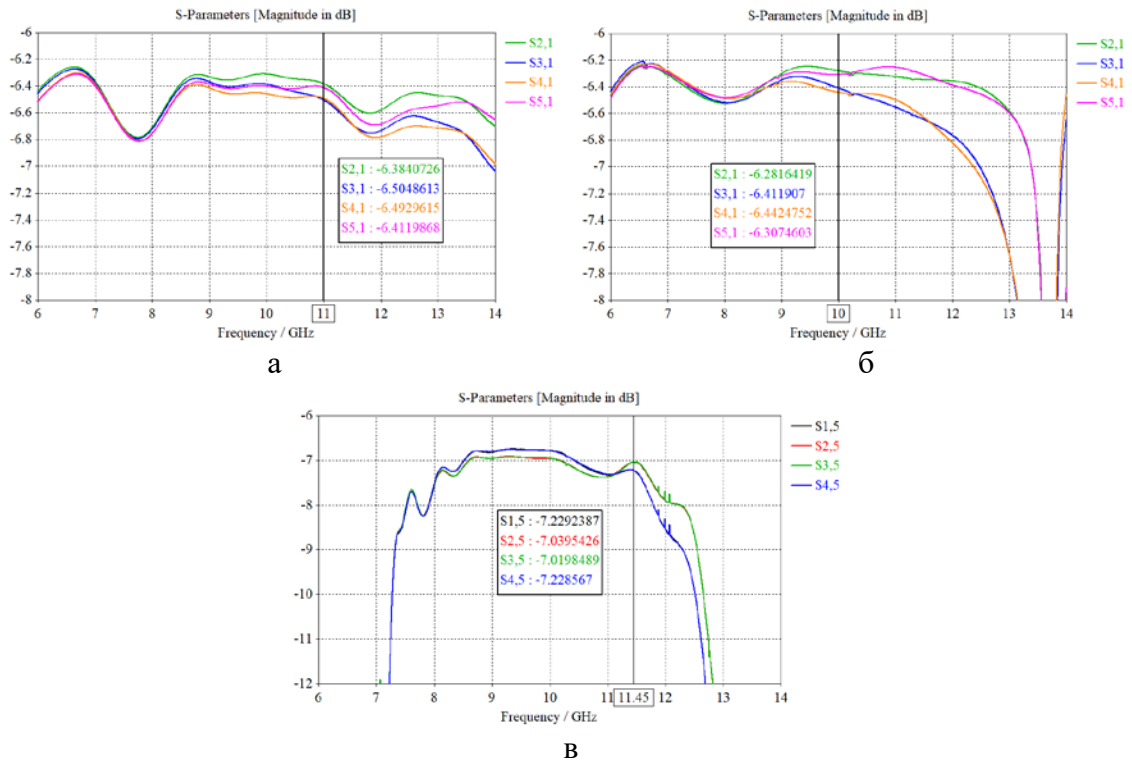


Рис.5. Коэффициенты передачи делителя мощности

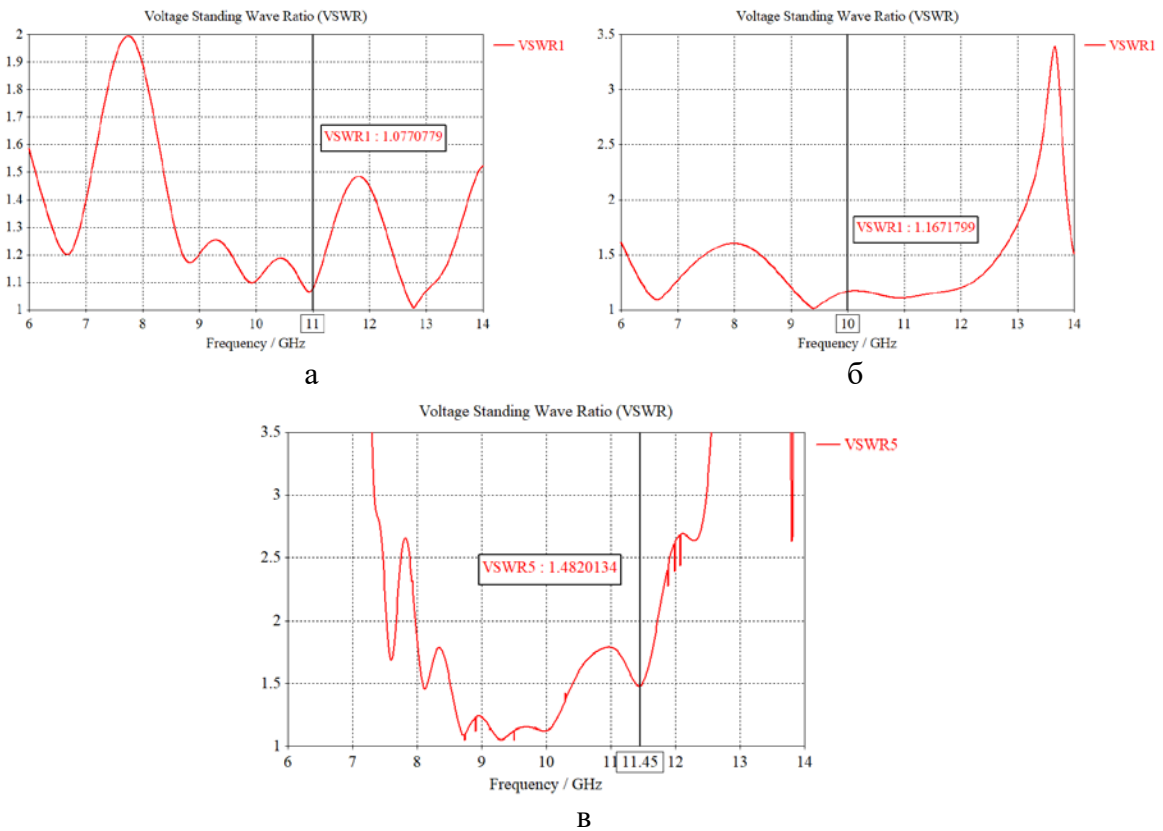


Рис.6. КСВН на входах делителей/сумматоров в полосе частот

С точки зрения согласования в полосе частот, наилучшим образом проявляет себя делитель на основе несимметричной микрополосковой линии и немногим хуже делитель на основе заземленной копланарной линии. Делитель на основе интегрированного волновода имеет узкую полосу за счет сложного поворота, который позволил уменьшить габаритные параметры всего делителя/сумматора. Процесс его согласования в полосе частот довольно трудоемкая задача и требует применения иных подходов при проектировании.

Интегрированные в подложку волноводы являются перспективным направлением исследований для решения инженерных задач по уменьшению габаритов, уменьшению стоимости в следствие повышения технологичности. Они позволяют создавать многослойные структуры для решения задач подводимой мощности к элементу.

Полученная схема 4-канального делителя мощности является одним из возможных решений. Данный 4-канальный делитель показывает хорошие результаты, расхождения по амплитуде составляет 0.5 дБ по фазе  $0.04^\circ$ , полученная структура подходит для реализации синфазного и равноамплитудного распределения. Делитель мощности на основе интегрированного волновода, фактически является полностью закрытой структурой и не подвержен внешним паразитным влияниям, а также сам не является их источником. Однако стоит учесть, что в сравнении с другими типами линий передач делитель на основе интегрированного волновода имеет узкую полосу и процесс его согласования в полосе частот довольно трудоемкая задача.

#### Библиографический список

1. R. Kazemi, R.A. Sadeghzadeh, and A.E. Fathy Design of a wide band eight-way compact SIW power combiner FED by a low loss GCPW-to-SIW transition – Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 26, 2012
2. Hao, Z., W. Hong, Li, H. Zhang, and K.Wu, “Multiway broadband substrate integrated waveguide (SIW) power divider,” – IEEE Ant. And Propag. Soc. Int. Symp., Vol. 1A, 639-642, 2005
3. Демшевский В.В., Левашов М.С., Цитович А.А. - Теоретическое исследование работы микрополосковой структуры в закрытом объеме, Россия, Санкт-Петербург, 2017 VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»
4. V.V. Demshevsky, A.A. Tsitovich, M.S. Levashov – Theoretical and Experimental Study of The Microstrip Structure in Closed Space, Russia, Divnomorskoe, 2017 RSEMW