

Многослойный полосно-пропускающий SIW-фильтр

© В.С. Сабурова, С.В. Крутиев

Южный федеральный университет,
344090 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: skrutiev@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 2 декабря 2024 г.

Принято к публикации 2 декабря 2024 г.

Представлен инновационный подход к уменьшению продольных размеров фильтра, изготовленного с использованием SIW (Substrate Integrated Waveguide) технологии. Для уменьшения размеров фильтра предложен метод сгибания фильтра четвертого порядка с индуктивными диафрагмами. Частотная характеристика фильтра имеет форму, близкую к прямоугольной, что значительно улучшает его избирательность. Разработанный фильтр имеет следующие параметры: полоса пропускания 250 MHz, коэффициент отражения не выше -20 dB, коэффициент прохождения — в диапазоне от -0.2 до -0.5 dB. Фильтр изготовлен на стандартной подложке FR-4 с диэлектрической проницаемостью 2.2 и на бумажной подложке с диэлектрической проницаемостью 6. Сравнение частотных характеристик компьютерной модели и созданных прототипов продемонстрировало хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: SIW-фильтр, полосно-пропускающий фильтр, СВЧ фильтр, многослойная структура.

DOI: 10.61011/JTF.2025.05.60294.378-24

Введение

Одной из ключевых задач современной радиолокации и связи является разработка компактных и эффективных компонентов, способных стабильно работать на высоких частотах. Микрополосные и копланарные линии передачи, которые долгое время были основой для реализации многих радиосистем, постепенно уступают место новым технологиям, таким, как SIW (Substrate Integrated Waveguide) [1]. Эта инновационная технология позволяет создавать устройства, сочетающие в себе лучшие качества традиционных волноводных систем, уменьшая их габаритные характеристики.

Основное преимущество SIW-технологии состоит в том, что она обеспечивает минимальные потери энергии при передаче сигнала, одновременно позволяя значительно уменьшить размеры и массу конечного изделия, обеспечивает высокий уровень передаваемой мощности, минимизирует потери сигнала и позволяет создавать компактные устройства [2]. Такая оптимизация особенно важна для приложений, где критичны массогабаритные характеристики, например, в летательной и спутниковой технике или мобильных системах связи.

Одним из основных достоинств данной технологии является возможность интеграции волновода непосредственно в подложку, что значительно сокращает размеры и вес устройства по сравнению с традиционными волноводными системами. Это особенно важно для применения в портативных устройствах и системах, где каждый грамм массы имеет значение.

Концепция SIW представляет собой многослойную структуру, состоящую из диэлектрика, с двух сторон

ограниченного металлическими слоями и рядами металлизированных отверстий. Штыри проходят через все слои структуры, играя роль стенок волновода. Электромагнитные волны распространяются вдоль полости между этими элементами в соответствии с принципами распространения волн в закрытых каналах. Такая конфигурация обеспечивает высокую направленность излучения и минимальное затухание сигнала, что делает ее идеальной для применений в радиочастотных и микроволновых устройствах.

Однако стоит учитывать, что переход на SIW-структуру требует тщательного анализа материалов подложки и геометрии конструкции. Некорректный выбор диэлектрика или расстояния между штырями может привести к увеличению потерь. Внедрение SIW-элементов в существующие системы требует оптимизации схемы согласования, чтобы избежать нежелательных отражений и потерь мощности. Тем не менее при грамотном использовании данная технология может радикально изменить технические параметры оборудования, уменьшив его габариты и вес, одновременно снижая производственные издержки.

В рамках данного исследования был разработан двухслойный полосно-пропускающий фильтр, основанный на SIW-технологии. Был применен метод сложения фильтра, что позволило получить архитектуру с уменьшенными геометрическими параметрами без ухудшения амплитудно-частотной характеристики. Применение многослойной конструкции дало возможность существенно уменьшить длину фильтра по сравнению с однослойными аналогами, в то время как высота увеличилась лишь незначительно.

1. Расчет фильтра

В настоящей работе представлены результаты моделирования полосно-пропускающих фильтров, созданных на основе технологии SIW в программном обеспечении CST Studio. Исходной конструкцией послужил фильтр четвертого порядка на классических индуктивных диафрагмах, изображенный на рис. 1 [3]. Основные параметры фильтра: $d_1 = 7.8 \text{ mm}$, $d_2 = 8.8 \text{ mm}$, $d_3 = 9.2 \text{ mm}$, $g_1 = 9.5 \text{ mm}$, $g_2 = 7.2 \text{ mm}$, $r = 0.51 \text{ mm}$, $p = 1.6 \text{ mm}$, $b_1 = 10 \text{ mm}$, $b = 40 \text{ mm}$, $a = 16.9 \text{ mm}$. Переходные отверстия между слоями расположены в зоне резонаторов, что облегчает выбор оптимальных размеров фильтра. В отличие от модели, описанной в [4], здесь используются два небольших переходных отверстия. Их присутствие вызывает смещение резонансной частоты в сторону низких частот, что требует уменьшения размеров резонансных секций для компенсации этого эффекта. Также введение двух переходных отверстий способствует увеличению степени связи между резонансными элементами, что улучшает селективность фильтра и снижает уровень паразитных резонансов.

Концепция проектирования SIW основана на тех же принципах, что и проектирование классических прямоугольных волноводов: волноводы, интегрированные в подложку, могут быть представлены как традиционные металлические прямоугольные волноводы с диэлектрическим наполнителем. В отличие от прямоугольных волноводов в SIW электромагнитные волны ограничены металлическими слоями и параллельными рядами металлизированных отверстий и распространяются внутри структуры. На рис. 2 показаны ключевые параметры, необходимые для правильного проектирования SIW-фильтров; d — диаметр переходных отверстий, p — расстояние между центрами отверстий, a — ширина структуры, h — толщина диэлектрика.

При правильном расчете параметров SIW-структуры потери энергии в переходных отверстиях оказываются минимальными.

SIW-структура работает аналогично традиционному прямоугольному волноводу, заполненному диэлектриком, с эффективной шириной a_{eff} . Вследствие этого частота среза SIW (f_c) совпадает с частотой среза стандартного прямоугольного волновода. Значения частоты

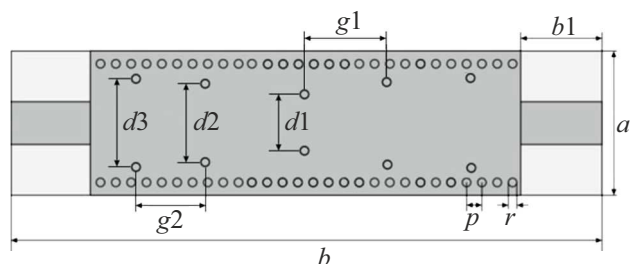


Рис. 1. SIW-фильтр четвертого порядка на индуктивных диафрагмах.

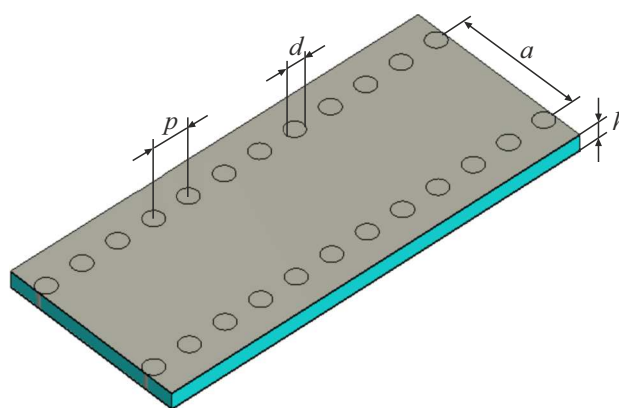


Рис. 2. SIW-структура.

среза устанавливаются согласно общепринятым рекомендациям для различных частотных диапазонов [5–7]. Формула для расчета эффективной ширины волновода выглядит следующим образом:

$$a_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon}}, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала. Чтобы гарантировать физическую реализуемость фильтра и предотвратить рост потерь на излучение, диаметр каждого отверстия должен быть меньше расстояния между соседними отверстиями, т. е. должно соблюдаться условие

$$d < p. \quad (2)$$

Нарушение этого правила может привести к значительным потерям излучения и ухудшению общих характеристик фильтра. Выбор диаметра металлизированных отверстий способен уменьшать степень утечек электромагнитной энергии за пределы структуры.

Учитывая ограничения при производстве, такие, как временные затраты и сложность изготовления, выполнимость SIW-структуры напрямую зависит от количества переходных отверстий. Чрезмерное увеличение числа переходов усложняет производство и может привести к снижению точности изготовления, что отрицательно сказывается на рабочих характеристиках фильтра. Поэтому важно соблюдать определенные ограничения на количество переходов относительно длины волны.

Согласно данным, приведенным в литературе [8], количество переходных отверстий в SIW-структуре должно быть таким, чтобы суммарная площадь этих отверстий не превышала 20 % от площади поперечного сечения волновода. Данное ограничение связано с необходимостью поддержания высокого уровня экранирования и минимизации потерь на излучение. Избыточное количество отверстий может привести к нарушению целостности структуры и снижению эффективности экранирующих свойств волновода, что, в свою очередь, негативно

скажется на передаче электромагнитной энергии и стабильности работы системы в целом. Также за счет своей структуры в волноводе, интегрированном в подложку, может возникнуть явление заграждения полосы пропускания в рабочем диапазоне частот. На основе вышесказанного следует использовать приведенное ниже двойное условие, чтобы избежать описанных эффектов:

$$0.05 < \frac{P}{c} < 0.25. \quad (3)$$

В этом случае ширину структуры „а“ можно определить, как

$$a = a_{\text{eff}} + \frac{d^2}{0.95p}. \quad (4)$$

Для проведения необходимых расчетов требуется определить длину волны λ . Для частоты ~ 10 GHz, на которой должен работать проектируемый фильтр, длина волны составит приблизительно 30 mm.

На рис. 3, а показана схема взаимодействия резонаторов. Она помогает визуально оценить и настроить связь между резонаторами, обеспечивая хорошее начальное приближение для функции оптимизации. На схеме круг символизирует прямоугольный резонатор, вход S и выход L соответствуют моде TE₁₀ на входе и выходе, а M_{S1} отображает связи резонансной системы с источником и нагрузкой. Связь между резонансной системой и соседними резонаторами обозначена как M_{12} и M_{23} . Каждый резонатор связан с предыдущим и последующим через соответствующие переходные элементы, которые обеспечивают передачу электромагнитной энергии между резонансными секциями. Такая конфигурация позволяет управлять полосой пропускания фильтра. На рис. 3, б приведена амплитудно-частотная

характеристика при различной степени связи между резонаторами.

Амплитудно-частотные характеристики фильтра демонстрируют зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты входного сигнала при различных уровнях связи между резонаторами. Эти графики показывают, как изменяется форма полосы пропускания в зависимости от величины коэффициента связи между резонансными элементами. При слабой связи между резонаторами полоса пропускания узкая, с крутыми склонами, что обеспечивает высокую избирательность фильтра, однако это может сопровождаться увеличением вносимых потерь и снижением пропускной способности. Сильная связь, напротив, расширяет полосу пропускания, делая фильтр более универсальным для обработки широкополосных сигналов, но одновременно снижая его селективность. Выбор оптимального уровня связи зависит от требований конкретной задачи и желаемых характеристик фильтра.

Уменьшение геометрических размеров играет ключевую роль в проектировании полостных резонаторов и SIW-фильтров. Размер полости SIW определяется резонансной частотой основной моды, однако для уменьшения габаритов полости предложены различные решения. Складывающиеся SIW-структуры позволяют сократить размеры вдвое, сгибая конструкцию вокруг металлической перегородки и создавая тем самым двухслойную топологию.

Ранее уже упоминалось, что правильный выбор диаметра сквозных отверстий и периодического расстояния между переходными отверстиями играет важную роль в снижении потерь на излучение в SIW-структуре. Эти параметры оказывают непосредственное влияние на качество экранирования и распространение электромагнитных волн внутри волновода. Также следует учесть, что ширина структуры определяет частоту среза для основного (низшего порядка) режима работы SIW. Корректное задание a позволяет точно настроить рабочий диапазон частот фильтра и избежать нежелательных эффектов, связанных с возбуждением высших мод.

Также крайне важно спроектировать переходное соединение при интеграции SIW с другими типами линий передач, такими, как микрополосковые и копланарные линии. Эффективная передача сигнала между этими отличающимися структурами часто сопряжена с трудностями, так как каждая из них характеризуется своими уникальными режимами распространения электромагнитных волн и электрическими параметрами.

Основная цель разработки качественного переходного элемента состоит в том, чтобы активировать соответствующий режим передачи в резонаторе SIW, минимизируя при этом потери мощности и обеспечивая стабильную работу в максимально широком частотном диапазоне [9–11].

В итоге был спроектирован специализированный переход, который обеспечивает оптимальное размещение входных и выходных разъемов (порт 1 и порт 2),

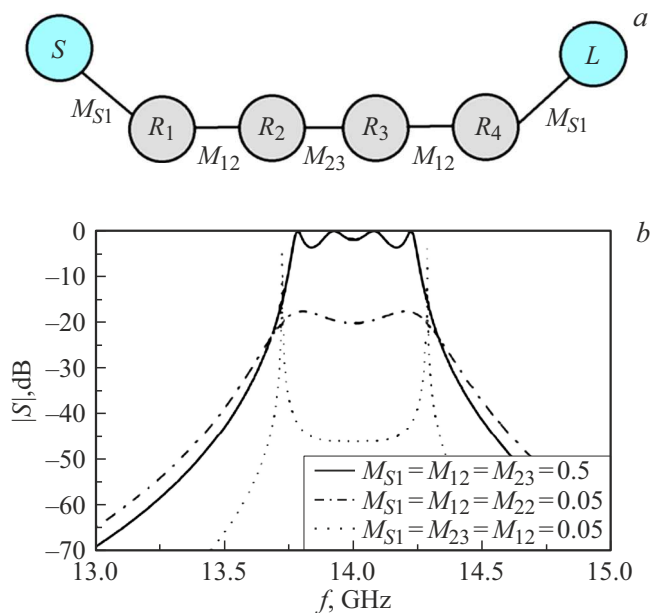


Рис. 3. SIW-фильтр четвертого порядка (а). Схема связи резонаторов СВЧ фильтра (б). Амплитудно-частотная характеристика при разных уровнях связи между резонаторами.

как показано на рис. 4. Такой переход способствует преобразованию микрополосковой линии в SIW, а для снижения потерь в переходе применяется 45-градусный срез в Г-образном соединении.

Для улучшения перехода были учтены частотный диапазон, архитектура, используемые материалы, чтобы разработать корректный переходной элемент, не искажающий сигнал при переходе от источника к нагрузке.

На основе технологии SIW был разработан полосовой фильтр в программном обеспечении CST Studio Suite.

Для реализации метода, при котором минимизируется центральная связь с режимом более высокого порядка, в фильтре используются две диафрагмы и два резонатора, как показано на рис. 5. Эта конфигурация позволяет эффективно подавлять высшие порядковые моды, что ведет к улучшению селективности фильтра и уменьшению побочных резонансов. Это подразумевает наличие лишь двух центральных полостей. Полости расположены одна поверх другой, в итоге формируя двухслойную структуру.

На основании представленных данных устройство выполнено на подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.2$ и толщиной слоя $h = 0.508$ mm. Металлический материал, используемый для заземления, — медь толщиной $35\ \mu\text{m}$. Параметры переходных окон, которые связывают верхний и нижний слой структуры, составляют $l_s = 2.4$ mm и $ws = 0.9$ mm. Длина и ширина резонаторов равны 13.58, 14.51 и 15.3 mm соответственно. Размеры диафрагм: $w_1 = 6.53$ mm, $w_2 = 4.98$ mm.

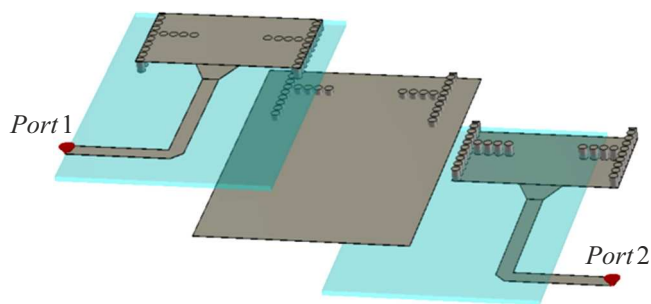


Рис. 4. Переход между микрополосковой линией и SIW-структурой.

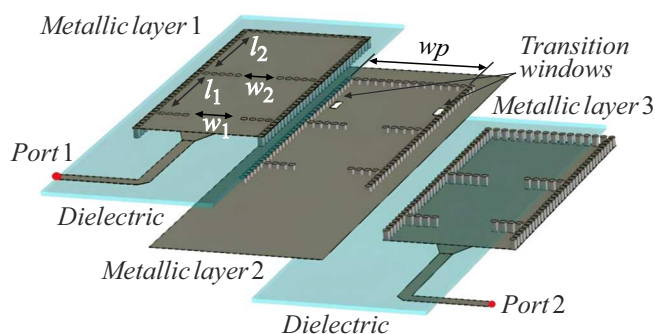


Рис. 5. Топология двухслойного SIW-фильтра.

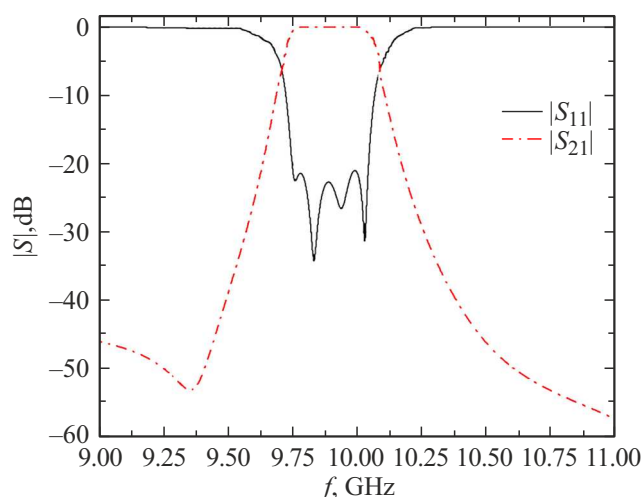


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика полосно-пропускающего фильтра.

Расчеты выполнялись для фильтра, настроенного на центральную частоту 10 GHz. Параметры, зависящие от длины волны, были определены по известным формулам: $d = 0.8$ mm, $a = 13.8$ mm, $p = 1$ mm.

Для разработанной модели полосового фильтра было выполнено электродинамическое моделирование с применением программного комплекса CST Studio Suite. Полученные результаты представлены в форме частотных зависимостей матрицы рассеяния на рис. 6, где отображены S-параметры фильтра: $|S_{11}|$ — коэффициент отражения и $|S_{12}|$ — коэффициент передачи. Анализ S-параметров позволяет оценить основные характеристики фильтра, такие, как полоса пропускания, уровень ослабления в полосе заграждения и избирательность. Коэффициент отражения $|S_{11}|$ показывает долю мощности, которая возвращается обратно к источнику сигнала из-за несогласованности импедансов на входе фильтра. Низкие значения указывают на хорошую согласованность, что способствует эффективному прохождению сигнала через фильтр. Коэффициент передачи $|S_{12}|$ характеризует отношение мощности, прошедшей через фильтр, к мощности, поступившей на его вход. Высокие значения в полосе пропускания демонстрируют малую потерю мощности при прохождении сигнала через фильтр. В то же время низкие значения вне полосы пропускания подтверждают эффективное подавление нежелательных частот.

Результаты моделирования указывают на то, что модель SIW-волновода снижает потери на передачу до 0.5 dB в требуемом диапазоне частот вблизи 10 GHz.

График S-параметров наглядно иллюстрирует, что фильтр обладает полосой пропускания 250 MHz, при этом коэффициент отражения не превышает -20 dB, а коэффициент прохождения находится в интервале от -0.2 до -0.5 dB.

Потери в SIW-структурах выше, чем в традиционных прямоугольных волноводах, из-за наличия диэлектрической подложки. Основной вклад в общие потери вносят омические потери, обусловленные наличием диэлектрического материала подложки и переходных отверстий. Тем не менее грамотное проектирование SIW-компонентов позволяет минимизировать эти эффекты и обеспечить высокую эффективность работы фильтра в заданном частотном диапазоне.

2. Изготовление

Фильтр был изготовлен с использованием технологии напыления металла на диэлектрическую подложку типа FR-4. Такой процесс изготовления позволяет получить однородное покрытие, которое обеспечивает надежную адгезию и хорошие электрические свойства. На рис. 7 представлен внешний вид изготовленного прототипа фильтра. Дополнительно была проведена металлизация сквозных отверстий методом полной заливки металлом. Такая технология способствует созданию непрерывного металлического экрана, что уменьшает вероятность возникновения утечек электромагнитной энергии и повышает общую эффективность фильтра. Для обеспечения точной центровки и совмещения слоев использовались методы винтового зажима и склеивания между слоями.

На рис. 8 показано сравнение амплитудно-частотных характеристик прототипа фильтра, созданного на диэлектрической подложке FR-4 (эксперимент 1), и его компьютерной модели. Основными источниками потерь в пропускаемой полосе данного устройства являются внутренние потери в диэлектрике и погрешности, возникшие при производстве и сборке, особенно в процессе склеивания слоев.

На следующем этапе исследований для оценки практической применимости фильтра было решено изготовить многослойный SIW-фильтр на бумажной подложке с диэлектрической проницаемостью 6. Толщина диэлектрического слоя составила 0.22 mm, а металлизация выполнена медью толщиной 8 μm . Для первоначаль-

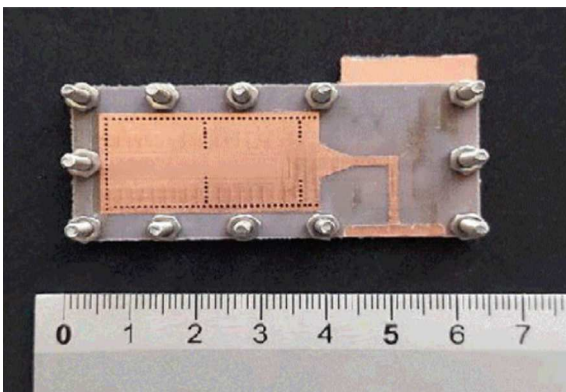


Рис. 7. Фотография изготовленного фильтра на подложке FR-4.

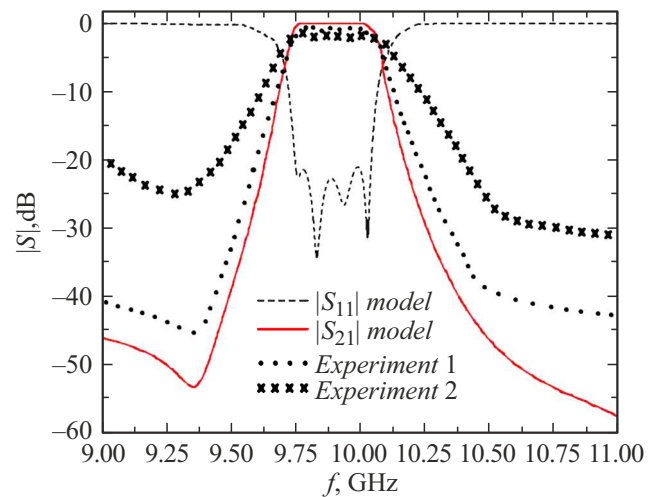


Рис. 8. Сравнение амплитудно-частотной характеристики изготовленных прототипов с компьютерной моделью.

ного синтеза полосно-пропускающего SIW-фильтра на бумажной подложке использовались размеры фильтра на подложке FR-4, что обеспечило хорошее стартовое приближение. Для достижения сравнимых амплитудно-частотных характеристик потребовались несколько итераций. На рис. 8 представлена амплитудно-частотная характеристика SIW-фильтра на бумажной подложке (эксперимент 2) в сравнении с предыдущими результатами. Из графика видно, что потери в полосе пропускания достигают примерно -3.5 dB, что объясняется потерями, вызванными бумажной подложкой на частотах около 10 GHz, а также возможными неточностями в процессе изготовления фильтра.

Анализ полученных результатов свидетельствует о хорошем согласовании теоретических расчетов с экспериментальными данными. S-параметры фильтра подтверждают корректность синтеза фильтра. Это подчеркивает универсальность и гибкость предлагаемой конструкции, которая может успешно адаптироваться под разные материалы.

Заключение

Изучение теоретических и экспериментальных данных подтвердило возможность разработки новых структур. Эти конструкции помогут снизить габариты и массу устройств, сохраняя при этом характеристики фильтров, что открывает широкие перспективы для их использования. Электродинамический анализ отдельных структур продемонстрировал быструю разработку прототипов фильтров; для окончательного варианта полосно-пропускающего фильтра потребуется всего несколько итераций.

Проведенное исследование включало электродинамический анализ и синтез многослойного полосно-пропускающего фильтра четвертого порядка, а также

фильтра на бумажной подложке. Также было изучено отличие амплитудно-частотных характеристик устройства в зависимости от используемых диэлектрических подложек.

В рамках исследования были успешно решены две важные задачи: двукратное сокращение длины фильтра и удвоение его высоты. Результаты сравнительного анализа амплитудно-частотных характеристик подтвердили хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных, что открывает перспективы для дальнейших исследований в данной области.

В результате SIW-технология успешно интегрирует достоинства как волноводных, так и микрополосковых элементов. Применение SIW-технологии открыло широкие возможности для адаптации многочисленных алгоритмов и методов, изначально разработанных для традиционных цельнометаллических прямоугольных волноводов, к новым устройствам.

Кроме того, в работе продемонстрирована возможность изготовления устройства на гибких диэлектрических платах, что является еще одним способом уменьшения массогабаритных характеристик, значимых для современных систем. Таким образом, SIW-технология продолжает доказывать свою актуальность и практическую значимость в создании инновационных решений для радиоэлектронной промышленности.

Финансирование работы

Проект был осуществлен благодаря поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00127) „Разработка гибких частотно-селективных устройств с применением SIW-технологии для спутников и беспилотных летательных аппаратов“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] X. Chen, W. Hong, J. Chen, K. Wu. IEEE Microw., **15** (6), 121 (2014).
- [2] C. Tomassoni, L. Silvestri, M. Bozzi, L. Perregrini. Intern. J. Microw. Wireless Tech., **8** (4–5), 741 (2016).
- [3] S. Krutiev, D. Lonkina, A. Makhno, V. Sdobnova. *Synthesis of Band-Pass Filters Made Using SIW Technology*. (Intern. Conf. Actual Problems of Electron Devices Engineer., APEDE 2022), p. 118–122.
- [4] V.P. Sdobnova, S.V. Krutiev, D.V. Lonkina. *Compact Three-layer Band-pass Filter Based on SIW-technology* (Seminar on Networks, Circuits and Systems (NCS), IEEE, 2023), p. 139–141. DOI: 10.1109/ncs60404.2023.10397518
- [5] S. Krutiev, D. Lonkina, P. Makhno, V. Sdobnova. *Narrow-Band Waveguide Filter on Complex Resonant Diaphragms* (Intern. Conf. Actual Problems of Electron Devices Engineer., APEDE 2022, 2022), p. 108–111.
- [6] A.R. Azad, A. Mohan. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., **28** (8), 660 (2018).
- [7] Q. Wu, F. Zhu, Y. Yang, X. Shi. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., **29** (11), 703 (2019).
- [8] Ch.S. Panda, R. Nayak, S.K. Behera. *Design and Analysis of a Compact Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter for Ku Band Applications*. (Online Intern. Conf. Green Engineer. Technol. (IC-GET), 2016), p. 1–5.
- [9] H. Kumar, R. Jadhav, S. Ranade. J. Electron. Commun. Eng., **3** (5), 36 (2012).
- [10] Ke Wu, D. Deslandes, Y. Cassivi. *The substrate integrated circuits — a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics* (6th Intern. Conf. Telecommun. Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003)
- [11] D. Deslandes, Ke Wu. *Integrated transition of coplanar to rectangular waveguides* (IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium Digest (Cat. No. 01CH37157), 2001)