

Исследование влияния диэлектрической подложки на спектр пропускания полосно-пропускающего волноводного фильтра с шунтирующими индуктивными диафрагмами

В.И. Гукова, С.В. Середич, Б.В. Сергеева, Е.А.Рябов, С.А. Сергеев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в работе исследуется влияние диэлектрической проницаемости подложки на спектр пропускания полосно-пропускающего волноводного фильтра сантиметрового диапазона длин волн. Численное моделирование выполнено при помощи программного пакета openEMS.

Ключевые слова: полосно-пропускающих фильтр, индуктивные диафрагмы, openEMS, СВЧ диапазон

1. Введение

При разработке волноводных полосно-пропускающих фильтров актуальным является поиск компактных и технологичных конструкций [1 – 12]. Одним из перспективных решений выступает интеграция индуктивных диафрагм на диэлектрической подложке [13 – 15] или таких структур как фотонные кристаллы [16 – 19] и метаматериалы [20 – 23], размещаемые в волноводном тракте. Частотные характеристики таких структур определяются геометрией диафрагм, расстоянием между ними, а также параметрами диэлектрического слоя.

В данной работе представлено исследование влияния диэлектрической подложки и вариации расстояния между диафрагмами на спектр пропускания полосового волноводного фильтра с шунтирующими индуктивными диафрагмами.

2. Описание конструкции

Исследуемая модель представляет собой волновод сечением $a = 23$ мм, $b = 10$ мм и встраиваемые в его плоскость индуктивные несимметричные диафрагмы толщиной $s = 1$ мм. Размеры диафрагм и первоначальное расстояние между ними представлены на рисунке 1. Толщина диэлектрической подложки равна 1,5 мм.

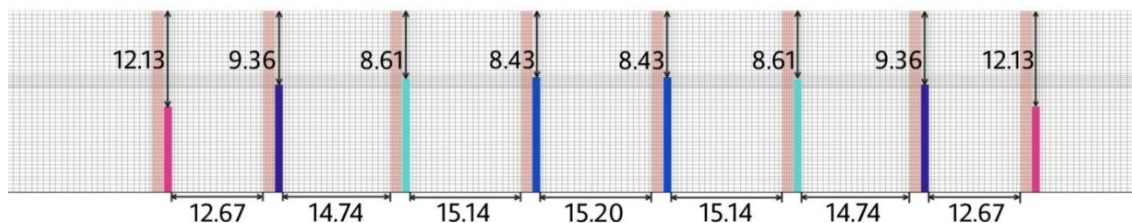


Рисунок 1. Геометрическая структура исследуемого фильтра.

На рисунке 2 представлен общий вид конструкции. Структура является периодической.

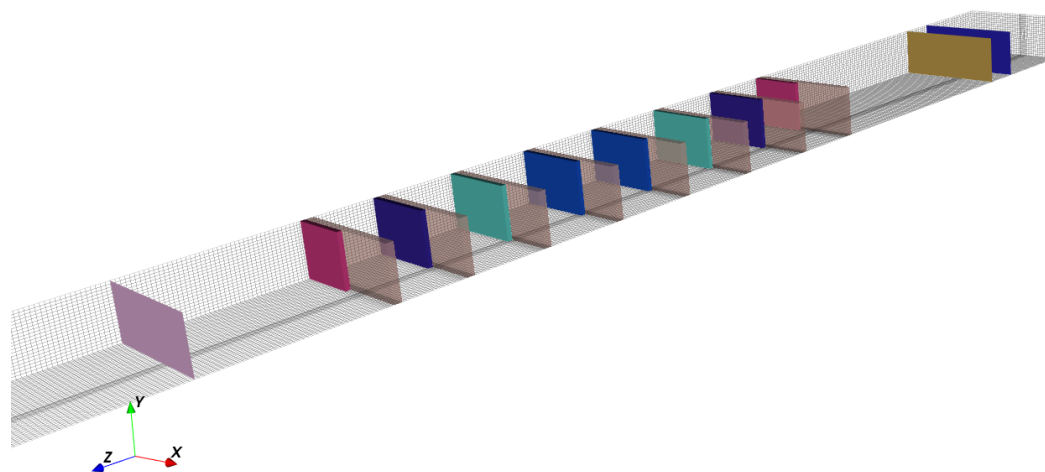


Рисунок 2. Общий вид конструкции.

Численное моделирование выполнялось в программном пакете openEMS, реализующем метод конечных разностей во временной области (FDTD) [24 – 26]. На основе полученных результатов были построены спектры коэффициента пропускания для различных конфигураций диафрагм.

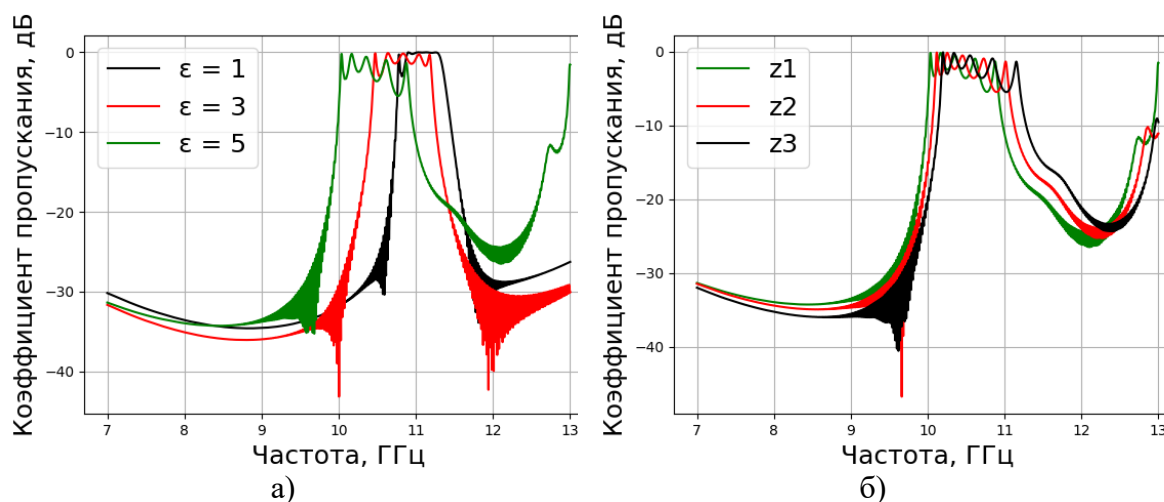


Рисунок 3. Спектр коэффициента пропускания исследуемой структуры в зависимости от: а) диэлектрической проницаемости подложки; б) расстояния между диафрагмами.

На рисунке 3, а представлен спектр коэффициента пропускания исследуемой структуры в зависимости от диэлектрической проницаемости подложки.

По графику прослеживается появление минимумов полосы пропускания при увеличении диэлектрической проницаемости вещества. Это происходит вследствие усиления электромагнитной связи между диафрагмами через подложку, что приводит к перераспределению поля в структуре и возникновению дополнительных резонансных провалов в полосе пропускания. Также на графике видно, что с ростом диэлектрической проницаемости подложки полоса пропускания расширяется, что указывает на изменение условий связи между диафрагмами.

На рис. 3, б представлен спектр коэффициента пропускания исследуемой структуры в зависимости от расстояния между диафрагмами, где z_1 – начальное расстояние, z_2 – расстояние между каждыми двумя соседними диафрагмами уменьшено на 0,4 мм по сравнению с z_1 , z_3 – расстояние между каждыми двумя

соседними диафрагмами уменьшено на 0,8 мм по сравнению с z1. Изменяя положения пластин друг относительно друга можно наблюдать смещение полосы пропускания. Уменьшение расстояния приводит к сдвигу полосы пропускания в область более высоких частот, что объясняется увеличением электромагнитной связи между диафрагмами и изменением эквивалентной длины резонатора, образованного ими.

Заключение

В работе исследовано влияние диэлектрической подложки и геометрических параметров на частотные характеристики волноводного фильтра с шунтирующими индуктивными диафрагмами. Показано, что изменение диэлектрической проницаемости подложки позволяет регулировать ширину полосы пропускания, однако сопровождается появлением дополнительных минимумов. Регулировка расстояния между диафрагмами дает возможность смещать рабочую область фильтра по частоте. Полученные данные могут быть полезны при разработке устройств с требуемыми спектральными параметрами.

Дальнейшие исследования будут направлены на подавление паразитных минимумов в полосе пропускания, возникающих при использовании диэлектрической подложки. Решение этой задачи позволит реализовать компактный волноводный фильтр с улучшенными частотными характеристиками.

Список литературы

1. Setti N. et al. Asymmetric Shunt Inductance Iris Rectangular Waveguide Filters for Satellite Communication Systems // E3S Web of Conferences. – 2022. – Vol. 351. – P. 01079 (5).
2. Деревянкин С. И. и др. Реализация полосовых фильтров на основе SIW-технологии // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. – № 1. – С. 44-49.
3. Копылова Н. А., Копылов А. Ф. Экспериментальное исследование фильтров СВЧ на одиночных волноводно-щелевых мембранах с различным расположением несимметричных угловых щелей // Технические и физико-математические науки: сб. статей конф. – 2017. – № 2-3(3). – С. 27-36.
4. Ищенко Е. А. и др. Активный волноводный полосовой фильтр на основе метаматериала // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 57-60.
5. Земляков В. В. и др. Особенности электродинамического синтеза полосно-пропускающих фильтров на волноводах сложного сечения // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 53-54.
6. Сазонов М. С., Галдецкий А. В. Полосно-пропускающий фильтр на встречнощтыревой системе в H-образном волноводе // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2015. – Т. 1. – С. 58-59.
7. Заргано Г. Ф. и др. Полосно-пропускающие фильтры на плоско-поперечных сдвигах H-волноводов, выполненные по SIW-технологии // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 87-93.
8. Ефремова С. С. и др. Электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающего фильтра на прямоугольном волноводе со сложными тонкими резонансными диафрагмами // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 183-184.
9. Светличный А. С. и др. Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе с плоскопродольными тонкими диафрагмами // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2022. – Т. 5. – № 3. – С. 370-376.
10. Крутиев С. В. и др. Волноводные полосно-пропускающие фильтры на сложных резонансных диафрагмах с C-образной апертурой в прямоугольном волноводе // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2017) – Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2017. – С. 750-756.
11. Коротченко Д. С., Волошин А. С. Полосно-пропускающий фильтр на нерегулярных щелевых резонаторах в запердельном волноводе // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций "РТ-2017" – Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2017. – С. 132.

12. Тюменцев А. И., Хроленко Т. С. Полосовые перестраиваемые фильтры СВЧ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017 – Т. 1 – С. 363-366.
13. Гукова В. И., Андреев А. А., Рябов Е. А. и др. Влияние геометрических и электрофизических параметров на спектр пропускания полосно-пропускающего волноводного фильтра в х-диапазоне частот // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей. – Саратов: Саратовский источник, 2026.
14. Гукова В. И., Андреев А. А., и др. Исследование влияния индуктивных волноводных диафрагм на распространение электромагнитных волн в х-диапазоне частот // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. материалов Всерос. молодежной конф. – Саратов: СГТУ, 2026.
15. Середич С. В., Андреев А. А., Рябов Е. А. и др. Влияние металлической пластины на спектр пропускания полосно-пропускающего фильтра в X-диапазоне частот // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей двенадцатой Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов: Саратовский источник, 2025. – С. 337-341.
16. Хайрушев И. В., Рябов Е. А., Сергеев С. А. Теоретические и экспериментальные исследования фотонных кристаллов, изготовленных технологией 3D-печати, в X-диапазоне // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – № 1. – С. 546-549.
17. Михайлов А. И., Рябов Е. А., Сергеев С. А. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2022. – Т. 25. – № 3. – С. 29-35.
18. Рябов Е. А., Андреев А. А., Сергеев С. А., Михайлов А. И. Управление амплитудно-частотной характеристикой узкополосного фильтра для X-диапазона частот на основе фотонного кристалла с подвижным цилиндрическим дефектом // Russian Technological Journal. – 2025. – Т. 13. – № 3. – С. 84-91.
19. Андреев А. А., Рябов Е. А., Хайрушев И. В. и др. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков в СВЧ диапазоне // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т. 1. – С. 388-392.
20. Андреев А. А., Рябов Е. А., Сергеева Б. В. и др. Метод определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2025. – Т. 1. – С. 411-415.
21. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств водных растворов этилового спирта на сверхвысоких частотах // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2015. – С. 332-334.
22. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Теоретическое исследование спектров отражения волноводных секций, заполненных жидким диэлектриком // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. X Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов: Техно-Декор, 2015. – С. 146-147.
23. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств водных растворов этилового спирта в СВЧ диапазоне // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. X Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов: Техно-Декор, 2015 – С. 144-145.
24. Шурыгин А. А., Козлова М. С. Исследование электромагнитного излучения в прямоугольном волноводе с использованием симулятора openems // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2019. – № 4(27). – С. 86-92.
25. Шарапова А. А., Кулябов Д. С. Моделирование распространения электромагнитных волн методом конечных разностей с помощью openEMS // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. – 2016. – № 1. – С. 32-40.
26. Рябов Е. А. и др. Возможности метода FDTD для исследования материалов в прямоугольном волноводе // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей девятой Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов: Саратовский источник, 2022. – С. 344-349.