

Проектирование управляемого полосно-пропускающего фильтра на основе периодической структуры с подвижной пластиной в X-диапазоне частот

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

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в работе исследуется влияние металлической пластины на спектр пропускания полосно-пропускающего фильтра в X-диапазоне частот. Рассмотрена периодическая структура с дефектом, внутри которого размещена пластина. Численное моделирование выполнено с использованием пакета openEMS. Показано, что изменение положения пластины позволяет управлять резонансными свойствами фильтра.

Ключевые слова: резонансный фильтр, СВЧ диапазон, периодическая структура, openEMS.

1. Введение

Одним из перспективных направлений развития современной радиотехники является создание перестраиваемых фильтров сверхвысоких частот (СВЧ), позволяющих динамически управлять спектральными характеристиками устройств. Такие фильтры широко применяются в радиолокации, спутниковой связи, навигации и других областях, где требуется высокая точность обработки сигналов. Полосно-пропускающие фильтры играют ключевую роль в выделении полезных сигналов из общего спектра. Перспективным подходом к их созданию является использование подвижных элементов, таких как металлические пластины, которые позволяют изменять характеристики фильтра за счёт модификации его геометрической структуры [1 – 4].

В данной работе представлены результаты проектирования управляемого полосно-пропускающего фильтра на основе периодической структуры с дефектом. Основное внимание уделено анализу влияния подвижной металлической пластины на спектр пропускания устройства.

2. Конструкция и методология

Исследуемая периодическая структура представляет собой прямоугольный параллелепипед с отверстиями шириной $g = 9$ мм и длиной 18 мм, расположенными на расстоянии $r = 22$ мм друг от друга (рисунок 1) [5, 6]. Материал структуры – термопластичный пластик с диэлектрической проницаемостью ϵ , не превышающей 3 [7 – 9], что соответствует параметрам материалов, используемых в 3D-печати. В центре структуры добавлен дефект в форме «бабочка», представляющий собой воздушное отверстие сложной геометрии с двумя симметричными выступами (рисунок 1). Внутри дефекта размещена подвижная металлическая пластина толщиной 1 мм, шириной $w = 20$ мм и высотой h ($0 \div 7$ мм), способная изменять угол поворота α ($0 \div 90^\circ$).

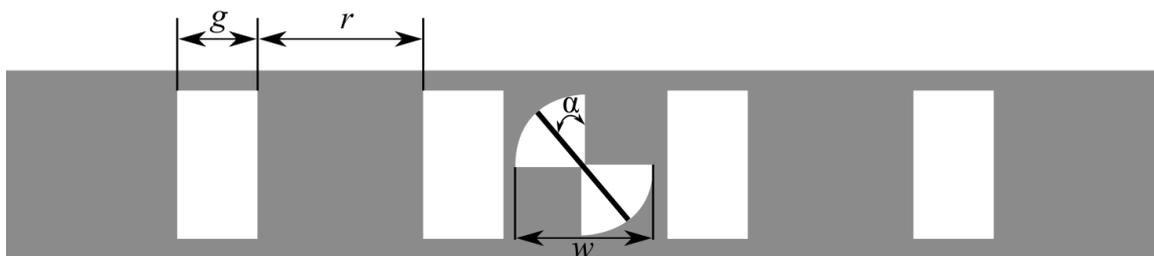


Рисунок 1. Конфигурация периодической структуры с дефектом и пластины

Численное моделирование выполнено в программном пакете openEMS [10] с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD). Метод обеспечивает высокую точность расчётов и позволяет учитывать сложные геометрические особенности структуры, включая дефекты и подвижные элементы.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены спектры коэффициента пропускания периодической структуры с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$ при ширине пластины $w = 20$ мм, с различными значениями высоты h и углах поворота α пластины 0 градусов и 90 градусов. Анализ данных графиков позволяет выявить ключевые закономерности влияния геометрических параметров пластины на резонансные свойства структуры.

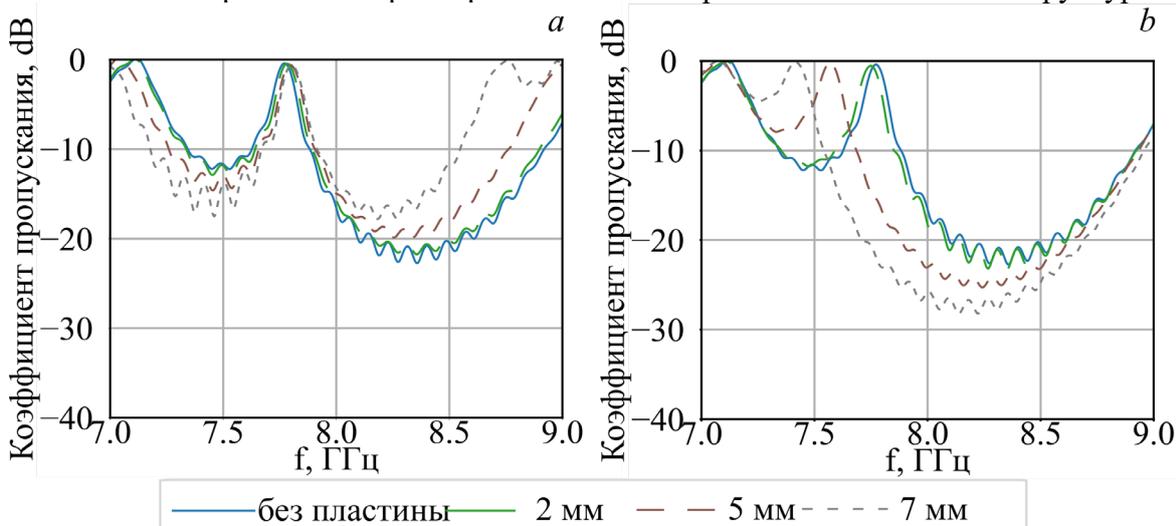


Рисунок 2. Спектры коэффициента пропускания периодической структуры с пластиной $w = 20$ мм и углом поворота $\alpha = 0^\circ$ (a), 90° (b) при различных значениях высоты h

При добавлении дефекта формы «бабочка» в периодическую структуру наблюдается формирование резонансного пика пропускания на частоте 7,8 ГГц. Этот пик обусловлен локализацией электромагнитного поля в области дефекта, что подтверждает возможность управления спектральными характеристиками структуры за счёт введения геометрических возмущений.

При установке пластины высотой h до 7 мм с углом поворота ($\alpha = 0^\circ$) резонансный пик пропускания остаётся практически неизменным, что свидетельствует о слабом влиянии пластины в данном положении на распределение электромагнитного поля в структуре. Однако при изменении угла поворота пластины до ($\alpha = 90^\circ$) наблюдается значительное смещение резонансного пика в низкочастотную область. Это связано с изменением распределения электромагнитного поля в области дефекта, вызванным изменением геометрии

пластины. На рисунке 4 представлены спектры коэффициента пропускания при различных углах поворота пластины.

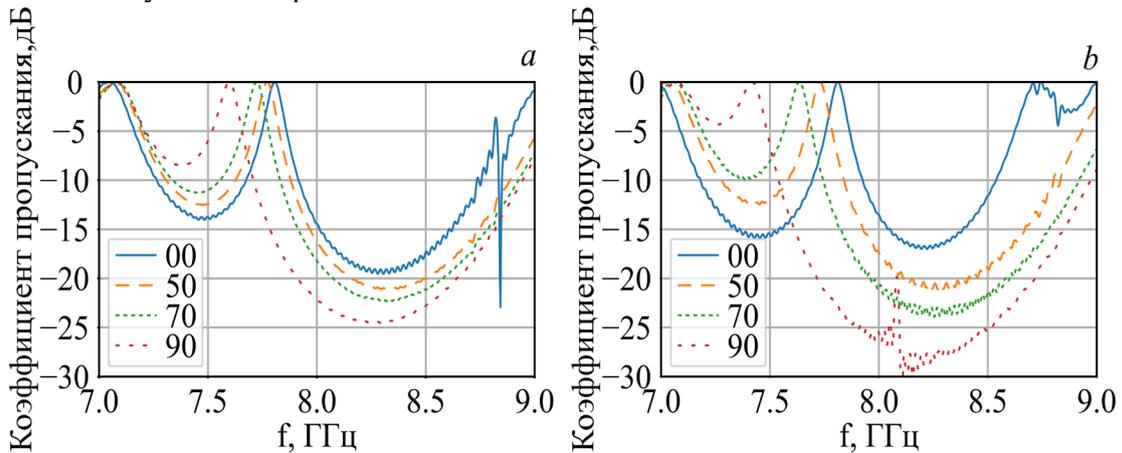


Рисунок 3. Спектры коэффициента пропускания периодической структуры с пластиной $w = 20$ мм, $h = 5$ мм (a) и $h = 7$ мм (b) при различных углах поворота α

Максимальное смещение резонансного пика пропускания составляет 0,45 ГГц при высоте пластины $h = 7$ мм. Такое смещение демонстрирует возможность эффективного управления центральной частотой полосы пропускания фильтра за счёт изменения положения и геометрических параметров пластины. Это особенно важно для создания перестраиваемых фильтров, способных адаптироваться к изменяющимся условиям работы.

На рисунке 4 представлены спектры коэффициента пропускания периодической структуры с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1,9 \div 2,9$, с подвижной металлической пластиной $w = 20$ мм, высотой $h = 5$ мм и углом поворота $\alpha = 0^\circ$. Как видно, при увеличении диэлектрической проницаемости резонансный пик пропускания смещается в область низких частот.

характеристик жидких коллоидов микро- и наночастиц различной природы в СВЧ диапазоне [16 – 19].

4. Заключение

Результаты исследования демонстрируют, что использование подвижной пластины в периодической структуре позволяет эффективно управлять спектром пропускания полосно-пропускающего фильтра. Угол поворота пластины α оказывает существенное влияние на резонансные свойства структуры, что открывает новые возможности для проектирования устройств с динамически изменяемыми параметрами. Полученные данные могут быть использованы для разработки адаптивных СВЧ-фильтров, способных работать в условиях изменяющихся частотных и энергетических характеристик сигналов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния других параметров пластины, таких как форма, толщина и материал, а также на оптимизацию её положения для достижения ещё более точного управления спектром пропускания. Это позволит расширить функциональные возможности фильтров и повысить их эффективность в современных радиотехнических системах.

Список литературы

1. Комаров В. В., Лукьянов М. А. Волноводные СВЧ-фильтры: технические решения, тенденции развития и методы расчёта // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 1. – С. 2.
2. Замешаева Е. Ю. и др. Перестраиваемые СВЧ-фильтры с управляемыми сегнетоэлектрическими конденсаторами // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – № 18. – С. 87-94.
3. Козин А. Э., Фирсенков А. И. Перестраиваемые полосно-пропускающие СВЧ фильтры на магнитоэлектрических волнах для поверхностного монтажа // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017. – Т. 1. – С. 506-508.
4. Тюменцев А. И., Хроленко Т. С. Полосовые перестраиваемые фильтры СВЧ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017. – Т. 1. – С. 363-366.
5. Михайлов А. И. и др. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2022. – Т. 25. – № 3. – С. 29-35. – DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35.
6. Михайлов А. И. и др. Применение технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур // III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019. Физика и технические приложения волновых процессов: материалы конференции. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – Т. 3. – С. 222-224.
7. Андреев А. А. и др. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков в СВЧ диапазоне // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т. 29. – С. 388-392.
8. Хайрушев И. В. и др. Теоретические и экспериментальные исследования фотонных кристаллов, изготовленных технологией 3D-печати, в X-диапазоне // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – С. 546-549.
9. Рябов Е. А. и др. Использование технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика. – 2020. – С. 223-224.
10. Liebig T. et al. OpenEMS—A free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2013. – V. 26. – Is. 6. – P. 680-696.
11. Михайлов А. И. и др. Физические основы твердотельной электроники: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. – 164 с.
12. Михайлов А. И. и др. Физические основы твердотельной электроники и микроэлектроники: Планы семинарских занятий. – Саратов: Промышленность Поволжья, 2008. – 116 с.
13. Сергеев С. А. Компьютер в физической лаборатории: учеб.- метод. пособие – Саратов: Промышленность Поволжья, 2008. – 368 с.

14. Панарин В. А. и др. Методы биофотоники для исследования сложных систем. – Саратов: Изд-во «Амирит», 2017. – 104 с.
15. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. – 2-е изд., с изм. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2020. – 192 с.
16. Портнов С. А. и др. Физика и химия границ раздела фаз: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2015. – 132 с.
17. Иноземцева О. А. и др. Физика и химия коллоидных систем: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2016. – 168 с.
18. Сергеев С. А. и др. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах // В мире научных открытий. – 2014. – № 4(52). – С. 148-160.
19. Сергеев С. А. и др. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: сб. статей. – Саратов: Наука, 2013. – С. 214-228.