

Полосно-заграждающий фильтр КВЧ диапазона на основе периодических диэлектрических структур

А.А. Пфайф, Г.Е. Кулешов

Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Аннотация: в данной работе проводилось компьютерное моделирование высокочастотного полосно-заграждающего фильтра КВЧ диапазона на основе фотонного кристалла, состоящего из чередующихся слоёв полиэтилена и воздуха. Исследовалось влияние количества слоёв диэлектрика в композиционной структуре на электромагнитный отклик. Исследовалось влияние добавления в структуру дефекта в виде замены воздушного слоя слоем диэлектрика с различными значениями диэлектрической проницаемости. Получены спектральные характеристики пропускания, отражения и поглощения фотонных структур в КВЧ диапазоне.

Ключевые слова: моделирование, КВЧ, фильтр, фотонный кристалл, электромагнитный отклик

1. Введение

Развитие новых технологий связи и высокоскоростной передачи информации как правило осуществляется за счет перехода на более высокие рабочие частоты, в частности в последнее время все больше задействуется верхняя часть микроволнового диапазона частот. Поэтому появляется потребность в новых композиционных радиоматериалах и устройствах, способных обеспечивать качественную фильтрацию сигнала в целях устранения помех, обеспечения информационной безопасности и электромагнитной совместимости в КВЧ диапазоне [1–3]. Такие структуры, как фотонные кристаллы хорошо зарекомендовали себя в качестве частотно избирательных элементов в оптическом, терагерцовом и СВЧ диапазоне частот [4]. При этом в КВЧ диапазоне фотонные кристаллы еще слабо изучены. Как правило они состоят из периодически расположенных элементов, размеры которых сравнимы с длиной волны проходящего через них электромагнитного излучения [5, 6]. Периодичность может меняться в одном, двух или трех направлениях. Вследствие чего фотонные кристаллы делятся на одномерные, двумерные и трехмерные [7]. В спектре пропускания таких структур имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны. Нарушение периодичности приводит к появлению дефектов в запрещенном диапазоне [8], то есть появляется узкая полоса пропускания. В последнее время все чаще для создания фотонных структур СВЧ и КВЧ диапазона используется технология 3D печати. Таким образом актуальной задачей является исследование частотно-избирательных свойств фотонных кристаллов для их применения в КВЧ диапазоне.

В работе проведено моделирование электромагнитного отклика от полосового фильтра на основе одномерного фотонного кристалла.

2. Выбор компонентов и результаты моделирования

В качестве основы для создания периодической структуры фотонного кристалла КВЧ диапазона были выбраны промышленно выпускаемые полиэтиленовые листы.

На импульсном спектрометре Teravil T-Spec 1000 в диапазоне частот от 110 ГГц до 2 ТГц была измерена диэлектрическая проницаемость листов полиэтилена двух толщин $d=0,34$ мм и $d=0,97$ мм. На рисунке 1 представлены графики полученных

частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости измеренных образцов.

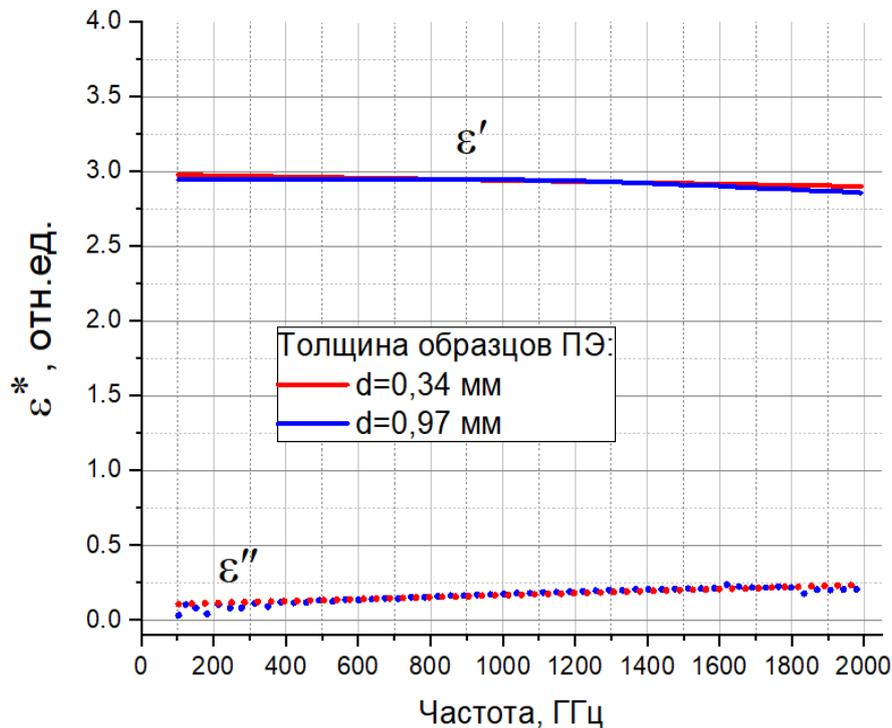


Рисунок 1. Измеренная комплексная диэлектрическая проницаемость полиэтиленовых пластин

Значения диэлектрической проницаемости, полученные для образцов различной толщины, практически совпадают. Это свидетельствует об однородности, изотропности и одинаковой плотности полиэтилена в пластинах различной толщины.

Для дальнейшего моделирования и разработки фотонных кристаллов КВЧ диапазона использовались листы полиэтилена с меньшей толщиной – 0,34 мм.

В качестве чередующихся слоёв были выбраны полиэтиленовые листы и воздух. Воздушные прослойки создаются использованием напечатанных на 3D принтере плоских рамок заданной толщины, которые чередуются со слоями полиэтилена.

Необходимая толщина воздушного слоя была рассчитана по формуле (1):

$$d_{\text{возд}} = \sqrt{\varepsilon} \cdot d_{\text{пэ}}. \quad (1)$$

Толщина слоёв воздуха составила 0,54 мм.

Используя полученные значения диэлектрической проницаемости и толщины слоёв периодической структуры, в программе CST Studio было проведено моделирование её электромагнитного отклика (S -параметров). В частотном диапазоне от 40 до 250 ГГц были заданы величины действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости слоёв полиэтилена, соответствующие значениям на рисунке 1: $\varepsilon' = 2,95 \div 2,80$, $\varepsilon'' = 0,02 \div 0,06$.

Разработанная модель полосно-заграждающего фильтра КВЧ диапазона на основе периодических диэлектрических структур изображена на рисунке 2а. На рисунках 2б, 2в и 2г представлены результаты моделирования соответственно коэффициентов прохождения (T), коэффициентов отражения (R) и поглощения ($A = 100\% - T - R$) для периодических структур с различным числом слоёв.

Для полученной структуры область заграждения находится в диапазоне от 105 до 157 ГГц (ширина 52 ГГц) с центром на частоте 131 ГГц. При этом с увеличением числа

слоёв эффективность заграждения растёт с $T=6\%$ при 4 слоях полиэтилена до $T<1\%$ при 6 слоях. За пределами диапазона частот 105–157 ГГц коэффициент прохождения в среднем составляет от 60 до 80%. Экранирование электромагнитного излучения в полосе заграждения происходит в основном за счет отражения, которое достигает 85% в случае 4-слойной структуры и 90% для 6-тислойной. Коэффициенты поглощения максимальны на границах полосы заграждения и могут достигать величины в 50%. Потери в рассмотренной структуре формируются за счет рассеивания излучения между слоями и поляризационными потерями в слоях полиэтилена.

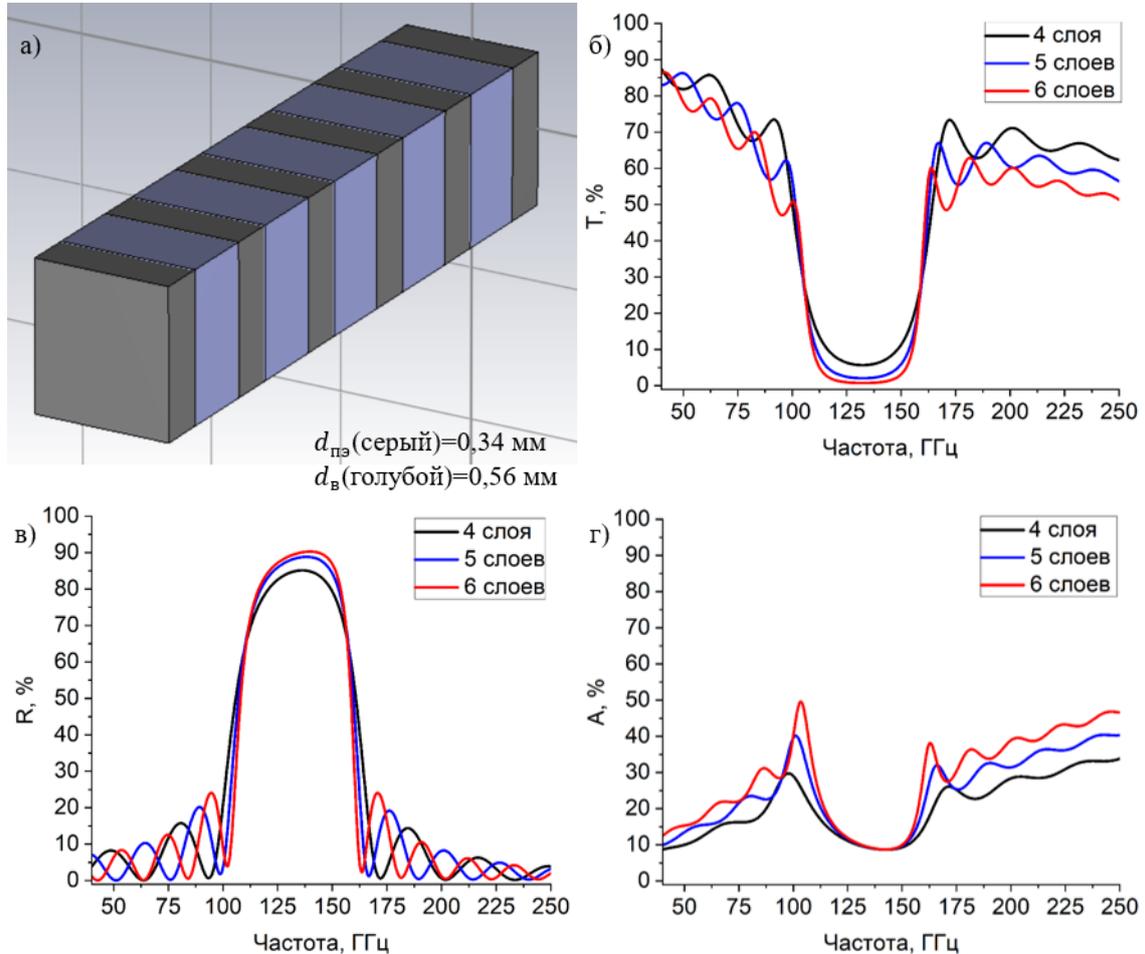


Рисунок 2. Модель фильтра (а) и спектры пропускания (б), отражения (в), поглощения (г) для разного количества слоёв диэлектрика

Далее проводилось моделирование полосно-заграждающих фильтров КВЧ диапазона на основе периодических диэлектрических структур с дефектом. Для моделирования была выбрана шестислойная структура. В фильтр был добавлен дефект путём замены воздушного слоя на слой диэлектрика с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости: $\epsilon'=2$, $\epsilon'=3$ и $\epsilon'=4$. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Область заграждения структуры сместилась в диапазон от 112 до 154 ГГц (ширина 42 ГГц) с центром на частоте 133 ГГц. При $\epsilon'=2$ на частоте 147 ГГц появляется пик пропускания, который достигает значения 49%. С увеличением диэлектрической проницаемости он смещается в область более низких частот, при этом снижается пропускание до 40%. С увеличением значения диэлектрической проницаемости эффективность заграждения уменьшается с $T<2\%$ при $\epsilon'=2$ до $T=4\%$ при $\epsilon'=4$. Отражение при $\epsilon'=2$ достигает 90%, а для $\epsilon'=4$ значение снижается до 85%. На частотах

133, 138 и 147 ГГц отражение снижается до 10, 9 и 7% соответственно. Максимальные коэффициенты поглощения наблюдаются в области появившихся пиков пропускания и имеют величину от 44 до 50%. Увеличение диэлектрической проницаемости слоя приводит к увеличению поглощения.

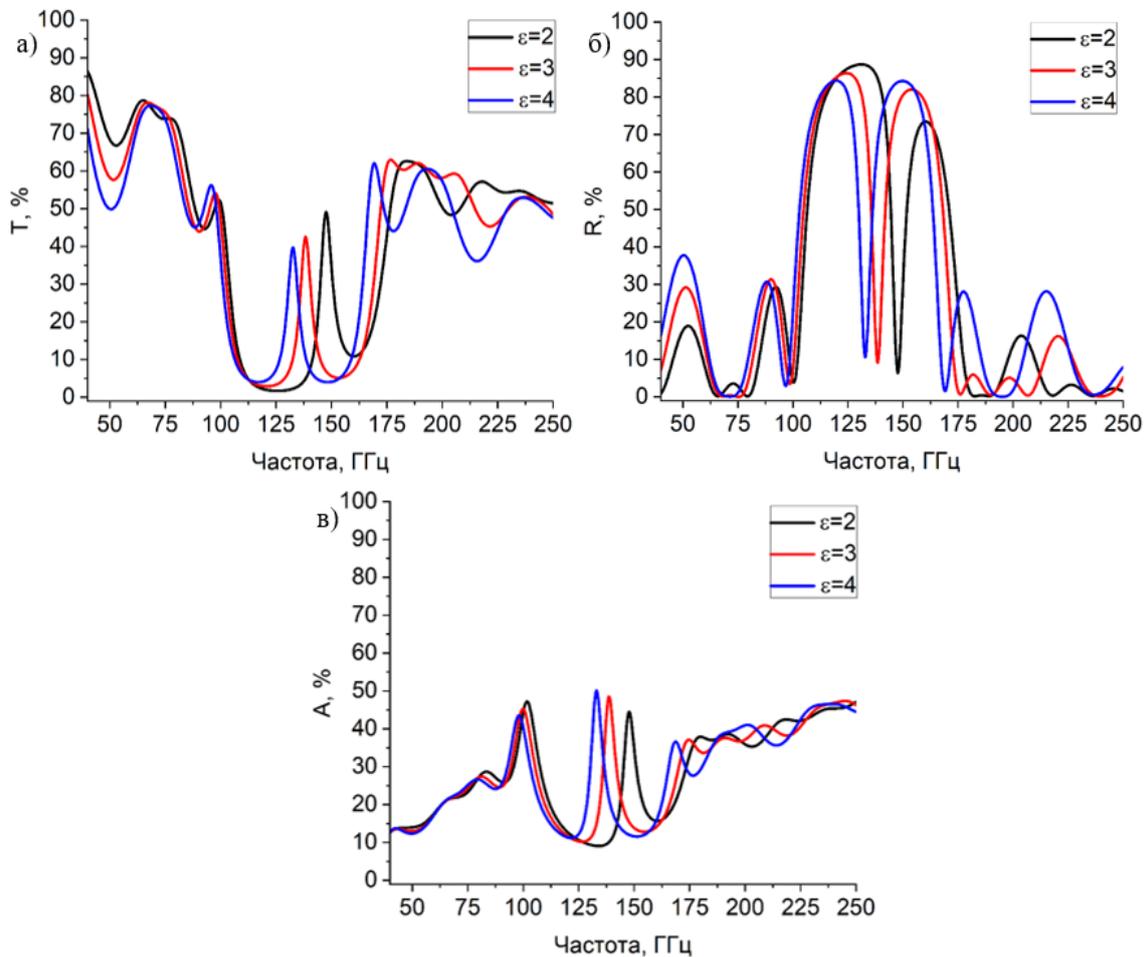


Рисунок 3. Спектры пропускания (б), отражения (в), поглощения (г) для разного количества слоёв диэлектрика с дефектом

3. Заключение

В работе были измерены электромагнитные характеристики листов полиэтилена двух толщин. Промоделирован электромагнитный отклик для различного числа слоёв и замещения воздушного слоя на диэлектрик.

Показано, что для исследуемой структуры область заграждения находится в диапазоне от 105 до 157 ГГц и с ростом числа слоев с 4 до 6 в области заграждения коэффициент прохождения снижается с 6% до 1%.

Внесение дефекта может приводить к появлению дополнительной узкой полосы пропускания. В результате свойства фотонной структуры меняются от режекторного фильтра с широной полосы заграждения в 42 ГГц к полосовому фильтру с широной полосы пропускания 6 ГГц. В зависимости от величины диэлектрической проницаемости дефекта были получены коэффициенты прохождения T от 40 до 50% на частотах 133 ГГц, 138 ГГц и 147 ГГц.

При этом меняя толщину слоев структуры или используя рамку, напечатанную на 3D принтере, из гибкого материала (с ее последующим сжатием) можно в широких частотных пределах управлять максимумами прохождения и экранирования. Таким

образом, разработанную структуру можно использовать в качестве режекторного или полосового фильтра для выделения сигнала в КВЧ диапазоне частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список литературы

1. Wanga Y. et al. 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. – 2023. – Vol. 2. – P. 1–18.
2. Климов А. И. и др. Унифицированный комплекс антенн для радиосистем диапазона КВЧ // Радиотехника и связь. Вестник Воронежского института МВД России. – № 4. – С. 130–138.
3. Britto E. C. et al. Design of Narrowband Terahertz Filtenna for High-Speed Wireless Communication // Brazilian Journal of Physics. – 2024. – Vol. 54, № 107. – P. 1–17.
4. Zhang P. et al. Tunable bidirectional perfect THz absorber realized by graphene-based one-dimensional photonic crystals // Optical and Quantum Electronics. – 2023. – Vol. 55, № 255. –P. 1–12.
5. Усанов Д. А. и др. СВЧ фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 43–51.
6. Lv X. et al. Research Progress in Preparation and Application of Photonic Crystals // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 36, № 39. – P. 1–17.
7. Yue Y. et al. Tunable one-dimensional photonic crystals from soft materials // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2015. – Vol. 23. – P. 45–67.
8. Усанов Д. А. и др. Фотонные структуры в СВЧ-диапазоне и их применение для измерения параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок и жидких диэлектриков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 26–34.