

Резонансные эффекты в СВЧ фотонных кристаллах с изменяемой структурой интерфейса

А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, М.А. Волшаник

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

Аннотация: Исследованы резонансные эффекты в брэгговских структурах СВЧ-диапазона при использовании в качестве интерфейса фотонного кристалла водосодержащих структур в виде целлюлозы с фиксированным содержанием массовой доли дистиллированной воды. Результатами расчёта, выполненного с использованием метода матрицы передачи, и эксперимента показано, что амплитуда и частота таммовских резонансов регулируется толщиной слоя целлюлозы, массовой долей дистиллированной воды и структурой интерфейса.

Ключевые слова: фотонный кристалл, таммовский резонанс, интерфейс, целлюлоза, СВЧ-диапазон

1. Введение

В последние годы усилился интерес к возможности применения в микроволновой технологии для экранирования и поглощения электромагнитной энергии возобновляемых, экологически безопасных материалов на основе целлюлозы и её производных с включениями из углеродных нанотрубок и серебряных нанопроволок [1–4].

Ещё одним альтернативным направлением развития микроволновых поглотителей электромагнитной энергии является использование структур, содержащих полярные жидкости, например воду [5, 6], поскольку вода в СВЧ-диапазоне характеризуется как значительной величиной действительной части комплексной диэлектрической проницаемости, так и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости. При этом отмечается, что поглотители электромагнитного излучения микроволнового диапазона на основе водосодержащих структур по сравнению с более традиционными материалами на основе слоёв с высокой электропроводностью [7–10], обладают рядом преимуществ, таких как биосовместимость, доступность, простота настройки, оптическая прозрачность.

В настоящей работе с целью реализации фотонных таммовских состояний исследуется возможность применения в качестве интерфейса фотонного кристалла водосодержащих структур (материалы «зелёной» электроники).

2. Компьютерное моделирование

В диапазоне частот 7–13 ГГц исследованы СВЧ фотонные кристаллы на основе прямоугольного волновода с диэлектрическим заполнением: в виде периодически чередующихся слоев керамики Al_2O_3 (нечетные слои, $\epsilon=9.6$, толщина 0.5 мм) и тефлона (четные слои, $\epsilon=2.0$, толщина 18 мм).

К фотонному кристаллу примыкал слой водосодержащей структуры в виде целлюлозной бумаги с различной массовой долей дистиллированной воды, толщиной d . Слой целлюлозной бумаги ограничивался с двух сторон тонкой тефлоновой плёнкой. Между водосодержащей структурой и последним слоем фотонного кристалла создавался воздушный зазор, толщиной L .

Расчёт частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и коэффициента

прохождения $S_{12}(f)$ фотонного кристалла выполнялся с помощью метода матрицы передачи [11–14], использовались экспериментальные значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(f)$ слоя целлюлозной бумаги в диапазоне частот 7–13 ГГц при различных массовых долях дистиллированной воды.

На рисунке 1 представлена зависимость частоты таммовского резонанса в запрещённой зоне от толщины целлюлозы при массовой доле воды 55%.

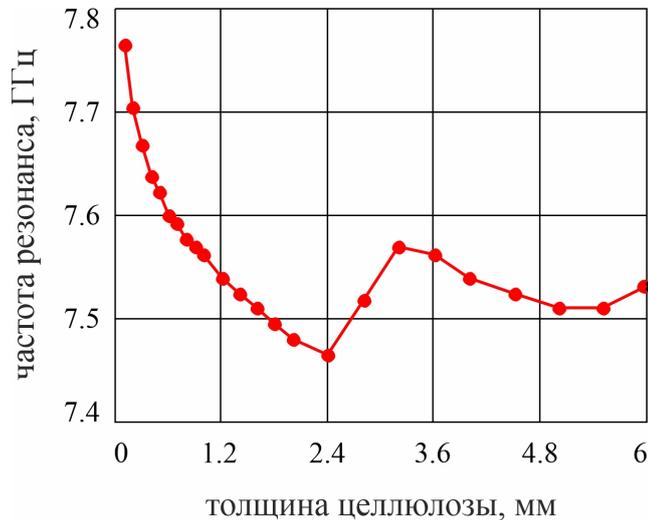


Рисунок 1. Зависимость частоты таммовского резонанса в запрещённой зоне от толщины целлюлозы. Массовая доля воды 55%.

На рисунке 2 представлена зависимость частоты таммовского резонанса в запрещённой зоне при изменении структуры интерфейса.

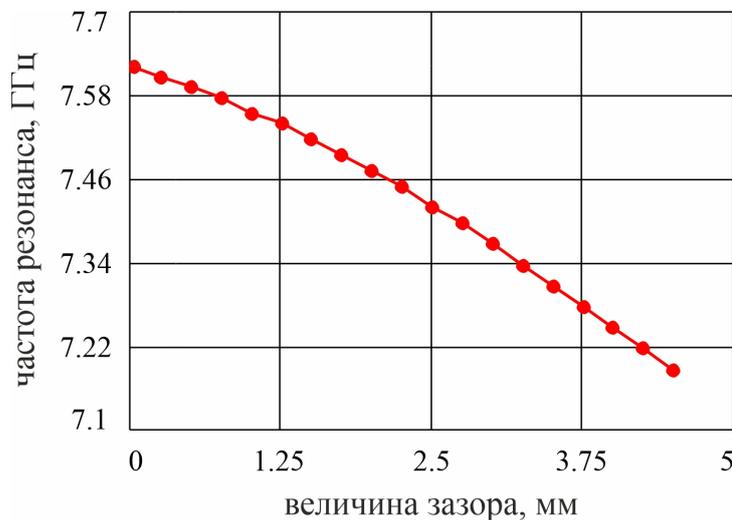


Рисунок 2. Зависимость частоты таммовского резонанса в запрещённой зоне от величины зазора между фотонным кристаллом и слоем целлюлозы. Массовая доля воды 55%.

3. Результаты эксперимента

Экспериментально исследовался одномерный фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью. Измерения были выполнены с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A в диапазоне частот 7–13 ГГц.

На рисунке 3 представлены экспериментальные частотные зависимости

коэффициента отражения S_{11} в запрещённой зоне 11-ти слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона слоя целлюлозы толщиной $d= 0.5$ мм при различных значениях зазора L .

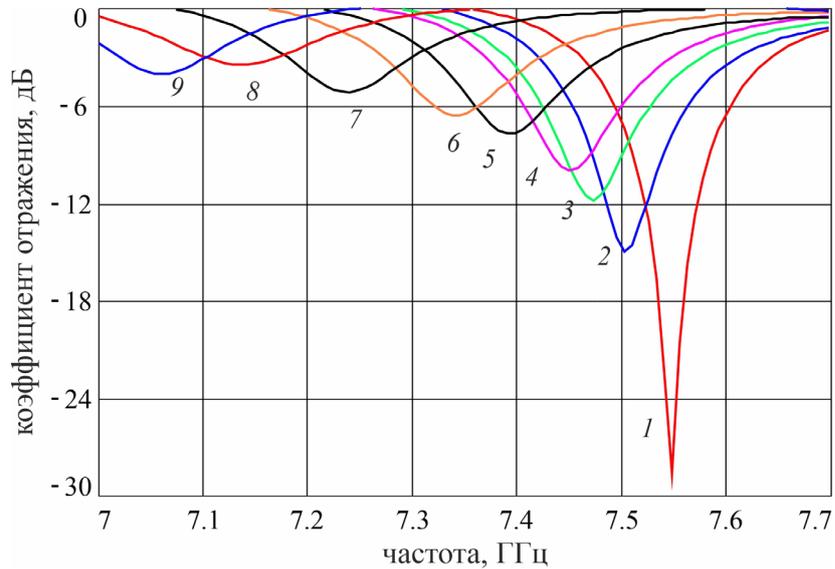


Рисунок 3. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} при использовании в качестве интерфейса слоя целлюлозы толщиной $d= 0.5$ мм при различных значениях зазора L , мм: 1 – 0, 2 – 0.5, 3 – 0.9, 4 – 1.4, 5 – 1.9, 6 – 2.43, 7 – 3.4, 8 – 4.3, 9 – 4.9.

На рисунке 4 представлены экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения S_{12} в запрещённой зоне 11-ти слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона слоя целлюлозы толщиной $d= 0.5$ мм при различных значениях зазора L .

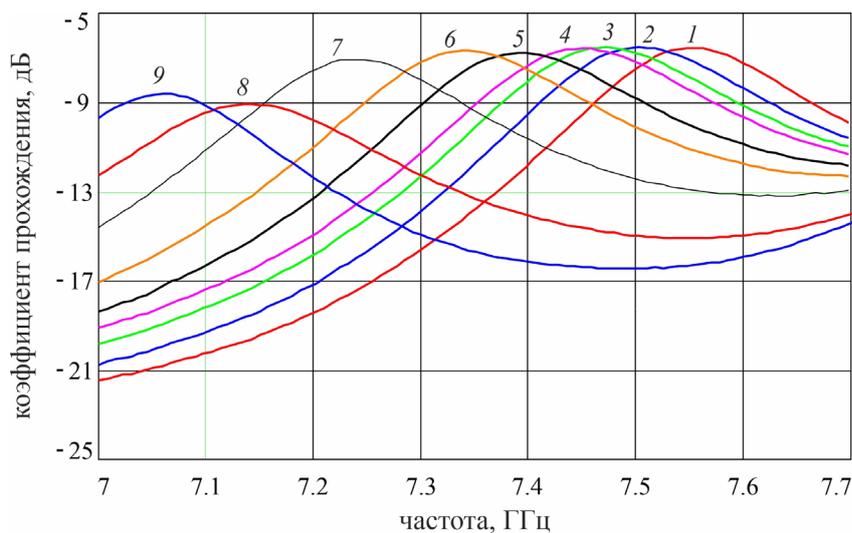


Рисунок 4. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения S_{12} при использовании в качестве интерфейса слоя целлюлозы толщиной $d= 0.5$ мм при различных значениях зазора L , мм: 1 – 0, 2 – 0.5, 3 – 0.9, 4 – 1.4, 5 – 1.9, 6 – 2.43, 7 – 3.4, 8 – 4.3, 9 – 4.9.

Из анализа результатов эксперимента, представленных на рисунке 3 и рисунке 4 следует, что регулировка величины воздушного зазора позволяет управлять амплитудой таммовских резонансов. При этом для каждой фиксированной толщины

слоя целлюлозы с определённой массовой долей дистиллированной воды для достижения максимальной амплитуды таммовского резонанса следует выбрать определённую величину воздушного зазора.

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты компьютерного моделирования фотонных таммовских резонансов в одномерной брэгговской структуре СВЧ-диапазона при использовании в качестве интерфейса водосодержащей структуры в виде целлюлозы с фиксированной массовой долей дистиллированной воды.

4. Заключение

Рассмотрены особенности возникновения фотонных таммовских резонансов в запрещённых зонах одномерной брэгговской структуры СВЧ-диапазона при использовании в качестве интерфейса фотонного кристалла водосодержащих структур.

Показано, что амплитуда и частота таммовских резонансов регулируется толщиной слоя целлюлозы, массовой долей дистиллированной воды и толщиной воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем целлюлозы.

Экспериментальные данные подтверждают результаты расчетов и демонстрируют эффект возникновения фотонных таммовских состояний в запрещённой зоне при использовании в качестве интерфейса водосодержащей структуры в виде слоя целлюлозы с фиксированной массовой долей дистиллированной воды.

Таким образом, в качестве элемента «зелёной электроники», характеризующегося свойствами поглотителя СВЧ с управляемыми параметрами, можно использовать целлюлозную бумагу, содержащую разное количество воды. Использование ФК позволяет характеризовать структуры на основе целлюлозы и её производных с различными видами включений: от непроводящих диэлектриков в виде воды, до проводящих включений в виде нанотрубок.

Работа выполнена при финансовой поддержке **гранта Российского научного фонда № 25-22-00199.**

Список литературы

1. Song S. et al. Applications of cellulose-based composites and their derivatives for microwave absorption and electromagnetic shielding // *Carbohydrate polymers*. – 2022. – Т. 287. – С. 119347
2. Chen Y. et al. Ultra-thin and highly flexible cellulose nanofiber/silver nanowire conductive paper for effective electromagnetic interference shielding // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2020. – Т. 135. – С. 105960.
3. Lee T. W., Lee S. E., Jeong Y. G. Highly effective electromagnetic interference shielding materials based on silver nanowire/cellulose papers // *ACS applied materials & interfaces*. – 2016. – Т. 8. – №. 20. – С. 13123-13132.
4. Wu L. P. et al. Electroless Ag-plated sponges by tunable deposition onto cellulose-derived templates for ultra-high electromagnetic interference shielding // *Mater. Des.* – 2018 – Т. 159 – С. 47–56.
5. Wen J., et al. Progress in water-based metamaterial absorbers: a review // *Optical Materials Express*. – 2022. - Т. 12. - №. 4. - С. 1461-1479.
6. Yoo Y. J., et al. Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets // *Scientific Reports*. – 2015. - Т. 5. - №. 1. - С. 14018(1–8).
7. He F., et al. Broadband microwave absorption properties of a frequency-selective surface embedded in a patterned honeycomb absorber // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2021. – Т. 63. – №. 4. – С. 1290-1294.
8. Kuzhir P. P. et al., Main principles of passive devices based on graphene and carbon films in microwave—THz frequency range // *J. Nanophoton*. – 2017. – Т. 11. - №. 3 – С. 032504(1-19).
9. Zheng, J. et al. Transparent broadband absorber based on a multilayer ITO conductive film // *Optics Express*. – 2023. - Т. 31. - №. 3. - С. 3731-3742.

10. Богацкая А. В. и др. Особенности распространения и поглощения электромагнитных сигналов в периодических структурах из проводящих и диэлектрических слоев // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. - №. 4. - С.481–487.
11. Skripal A. V., Ponomarev D. V., Komarov A. A. Tamm resonances in the structure 1-D microwave photonic crystal / conducting nanometer layer //IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2020. – Т. 68. - №. 12. - С. 5115–5122.
12. Usanov D. A. et al. Determination of the metal nanometer layer thickness and semiconductor conductivity in metal-semiconductor structures from electromagnetic reflection and transmission spectra // Technical Physics. - 2006. - Т. 51. - №. 5. - С. 644-649.
13. Fan S. et al. Advances in theory of photonic crystals // Journal of lightwave technology. - 2006. - Т. 24. - №. 12. - С. 4493–4501.
14. Nikitin A. A. et al. Microwave photonic crystal on the slot transmission line with a ferroelectric film // Technical Physics. - 2016. - Т. 61. - №. 6. - С. 913–918.