

# Резонансные эффекты в СВЧ фотонных кристаллах при использовании в качестве интерфейса ферромагнитного эластомера

А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, В.Е. Шаронов, А.А. Александров

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** Описаны свойства СВЧ фотонного кристалла, содержащего эластомер с ферритовыми частицами. Проанализировано возникновение таммовских резонансов при использовании ферромагнитного эластомера, параметры которого модифицированы введением воздушных включений. Рассчитаны амплитудно-частотные характеристики фотонного кристалла и проведено сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** интерфейс, фотонный кристалл, таммовский резонанс, ферромагнитный эластомер

## 1. Введение

Дисперсионные свойства СВЧ фотонных кристаллов (ФК) возникают из-за интерференции отраженных от границ структуры электромагнитных волн [1–4].

Известно, что использование в качестве интерфейса поглотителей электромагнитной энергии, вызывает появление резонансов в запрещённой зоне ФК, называемых поверхностными фотонными состояниями в СВЧ ФК. К таким поглотителям относятся слои материалов с высокими потерями, например, полупроводниковые и металлических нанослои [5, 6].

В микроволновой технологии широко применяются в качестве поглотителя ферромагнитные эластомеры (ФЭ), позволяющих создавать поглотители разнообразных форм и различными электромагнитными характеристиками.

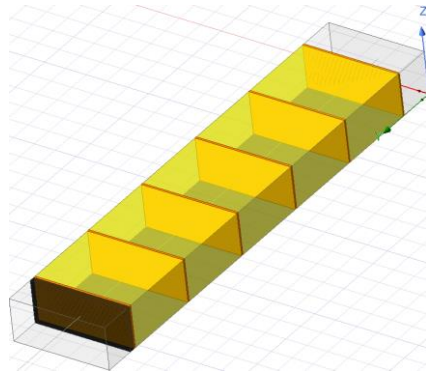
В работе исследуются характеристики одномерного СВЧ ФК при возникновении таммовских состояний в случае использования в качестве интерфейса ферромагнитного эластомера.

## 2. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла

Проведено моделирование СВЧ ФК с диэлектрическим заполнением в X-диапазоне. ФК состоял из слоёв керамики  $Al_2O_3$  и слоёв тефлона. Количество слоёв керамики равно шести, слоёв тефлона пяти.

К фотонному кристаллу примыкал отрезок волновода, заполненный слоем ФЭ (см. рисунок 1). Между слоем ФЭ и последним слоем ФК создавался воздушный зазор толщиной  $L$ .

Топология СВЧ ФК с интерфейсом в виде слоя ФЭ представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Топология волноводного СВЧ фотонного кристалла со слоем ферромагнитного эластомера

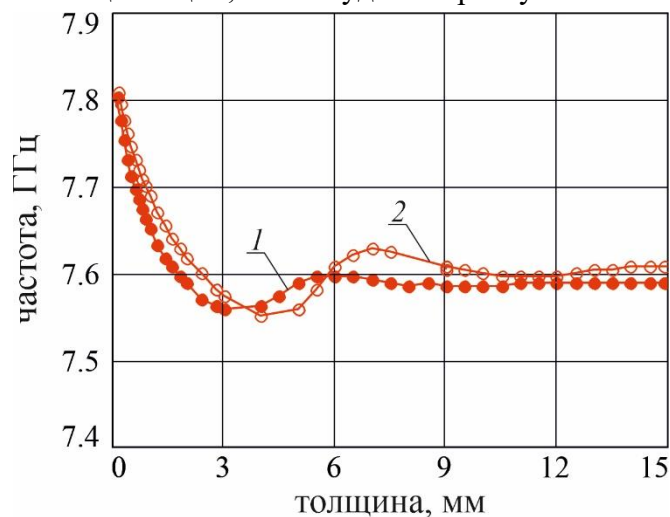
Расчет частотных зависимостей коэффициентов отражения  $S_{11}(f)$  и прохождения  $S_{21}(f)$  выполнялся с использованием метода матрицы передачи.

При расчёте использовались экспериментальные значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической  $\epsilon^*(f)$  и магнитной проницаемостей  $\mu^*(f)$  слоя ФЭ, измеренные в X-диапазоне. Эластомер был изготовлен в виде компаунда на основе силиконового каучука с добавлением ферритового порошка.

Экспериментальные значения действительной и мнимой части комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей слоя ФЭ находились с помощью ПО Agilent 85071E Materials Measurement Software.

В результате расчетов установлено, что применение ФЭ в качестве интерфейса приводит к возникновению в первой и во второй запрещенных зонах на частотах  $f_{\text{Tamm}1}$  и  $f_{\text{Tamm}2}$  таммовских резонансов, положение которых зависит от толщины эластомера.

При увеличении толщины эластомера на зависимостях  $f_{\text{Tamm}1}(d)$  (рисунок 2) и  $f_{\text{Tamm}2}(d)$  наблюдаются осцилляции, амплитуда которых уменьшается.



**Рисунок 2.** Зависимости  $f_{\text{Tamm}1}$  от толщины слоя ФЭ. 1 – сплошной образец, 2 – образец с воздушными включениями

Была исследована возможность управления характеристиками таммовских резонансов с использованием в качестве интерфейса слоя ФЭ с регулируемыми радиопоглощающими свойствами. Это достигалось введением воздушных включений в образцы ФЭ. Исследовались образцы ФЭ с разным диаметром  $d$  сквозных отверстий. Количество отверстий оставалось постоянным (15 шт.). Отверстия были распределены равномерно по сечению в три слоя по пять отверстий в каждом слое.

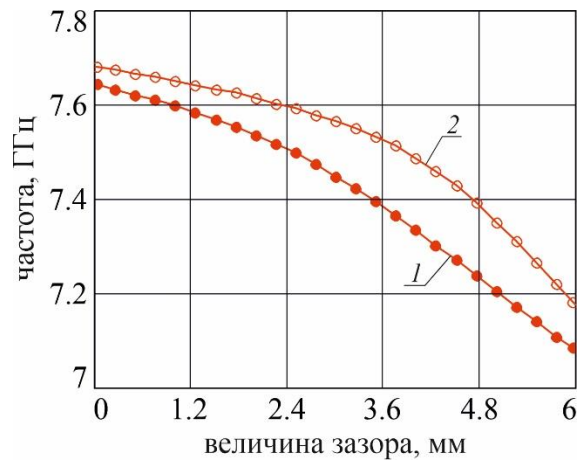
В этом случае параметры ФЭ задавались в виде эффективных значений комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей, которые были получены в результате экспериментальных измерений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической  $\varepsilon^*(f)$  и магнитной проницаемостей  $\mu^*(f)$  слоя эластомера в X-диапазоне.

Результаты расчёта частоты таммовских резонансов при использовании в качестве интерфейса слоя ФЭ, содержащего воздушные включения диаметром 2.0 мм, от толщины слоя ФЭ представлены на рисунке 2. Наличие сквозных отверстий приводит к увеличению периода осцилляций частоты в первой  $f_{\text{Tamm1}}(d)$  (рисунок 2) и во второй запрещённых зонах  $f_{\text{Tamm2}}(d)$ .

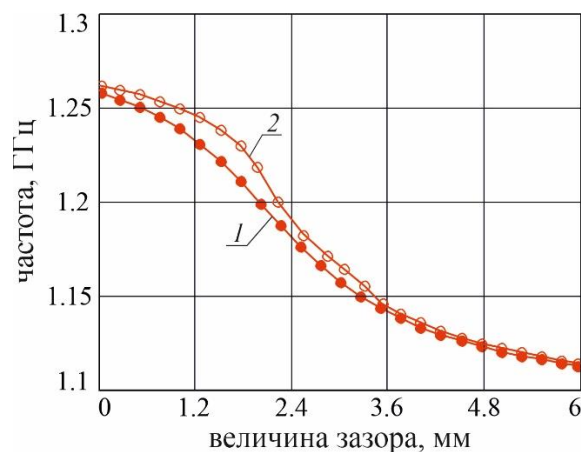
Положение резонансов в запрещённых зонах определяется как геометрическими размерами слоя ФЭ, так и его расположением относительно фотонного кристалла.

Изменение частоты таммовских резонансов с увеличением воздушного зазора  $L$  между слоем ФЭ и последним слоем ФК представлены на рисунках 3 и 4.

Как следует из представленных результатов, с увеличением величины воздушного зазора наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов.



**Рисунок 3** Зависимость частоты  $f_{\text{Tamm1}}$  таммовских резонансов от величины зазора в первой запрещённой зоне. 1 – сплошной образец, 2 – образец с воздушными включениями



**Рисунок 4** Зависимость частоты  $f_{\text{Tamm2}}$  таммовских резонансов от величины зазора во второй запрещённой зоне. 1 – сплошной образец, 2 – образец с воздушными включениями

### 3. Результаты экспериментальных измерений

Экспериментальные значения АЧХ ФК получены на векторном анализаторе цепей

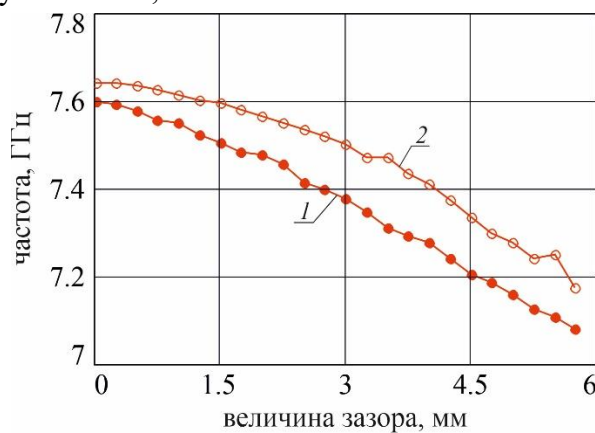
Network Analyzer N5242A в X-диапазоне.

Измерялись частоты и амплитуды таммовских резонансов при варьировании толщины  $d$  слоя ФЭ.

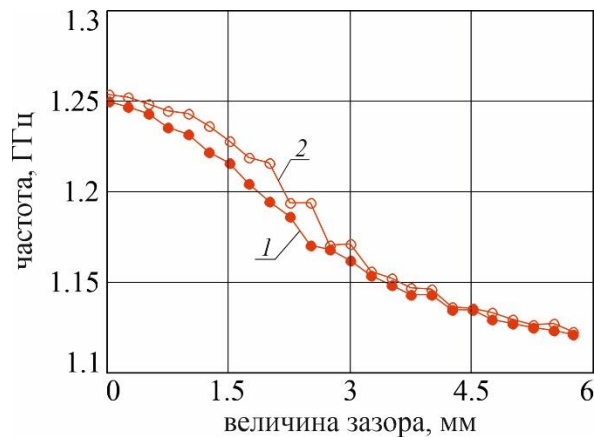
Управление частотой и амплитудой таммовских резонансов осуществлялось при включении воздушного отрезка волновода между ФК и слоем ФЭ с фиксированной толщиной ФЭ.

Для исследования влияния изменения диэлектрических и магнитных характеристик (радиопоглощающих свойств) интерфейсного слоя на АЧХ СВЧ ФК были использованы рассмотренные выше образцы ФЭ со сквозными отверстиями.

Экспериментальные зависимости частоты таммовских резонансов в первой и во второй запрещённой зоне при использовании в качестве интерфейса сплошного слоя ФЭ (кривые 1) и слоя ФЭ, содержащего воздушные включения диаметром 2.0 мм (кривые 2), от величины воздушного зазора между слоем ФЭ и последним слоем ФК представлены на рисунках 5 и 6, соответственно.



**Рисунок 5.** Экспериментальные зависимости  $f_{\text{Tamm1}}$  от величины зазора. 1 – сплошной образец, 2 – образец с воздушными включениями



**Рисунок 6.** Экспериментальные зависимости  $f_{\text{Tamm2}}$  от величины зазора. 1 – сплошной образец, 2 – образец с воздушными включениями

#### 4. Заключение

Описание свойств СВЧ ФК, содержащего эластомер с ферритовыми частицами, позволило установить возникновение таммовских резонансов. Расчёт АЧХ ФК и его сравнение с экспериментальными данными позволяет сделать вывод, что в качестве интерфейса ФК можно использовать ФЭ. При этом радиопоглощающие свойства на частотах таммовских резонансов ФК изменяются при создании сквозных отверстий. Установлены частотные зависимости  $\varepsilon^*(f)$  и  $\mu^*(f)$  слоя ФЭ при создании сквозных

отверстий. Полученная информация о характеристиках таммовских резонансов может быть применена для определения свойств радиопоглощающих материалов на основе эластомеров с ферритовыми частицами.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Российского научного фонда (проект № 25-22-00199)**.

#### Список литературы

1. Rybin M. V., Limonov M. F. Resonance effects in photonic crystals and metamaterials // *Phys. Usp.* – 2019 – Т. 62. – № 8. – С. 823-838.
2. Tolmachev V. A. Optical properties of one-dimensional photonic crystals obtained by micromatching silicon (A review) // *Opt. Spectrosc.* – 2017. – Т. 122. – № 4. – С. 646-660.
3. Sibilica C., Benson T. M., Marciniak M., Szoplik T., eds. *Photonic Crystals: Physics and Technology.* – Milan, Springer. 2008.
4. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V. *One-dimensional Microwave Photonic Crystals: New Applications.* – Boca Raton, CRC Press. 2019.
5. Skripal A. V., Ponomarev D. V., Komarov A. A. Tamm resonances in the structure 1-D microwave photonic crystal/conducting nanometer layer // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2020. – Т. 68. – № 12. – С. 5115-5122.
6. Skripal A. V., Ponomarev D. V., Komarov A. A., Sharonov V. E. Tamm resonances control in one-dimensional microwave photonic crystal for measuring parameters of heavily doped semiconductor layers // *Izvestiya of Saratov University. Physics.* – 2022. – Т. 22. – №. 2. – С. 123-130.