

06.3;11.1;13.1;15.2

Резонансы в фотонных кристаллах сверхвысокочастотного диапазона при использовании в качестве интерфейса структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя

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

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
E-mail: skripala_v@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 2 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 3 апреля 2024 г.

Принято к публикации 17 апреля 2024 г.

Описаны теоретически и исследованы экспериментально резонансные характеристики сверхвысокочастотных фотонных кристаллов, связанные с эффектом возникновения фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне, при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя. Установлено, что увеличение толщины слоя дистиллированной воды приводит к затухающим осцилляциям частоты и амплитуды таммовского резонанса.

Ключевые слова: фотонные таммовские состояния, поглотители, сплошной слой воды, СВЧ-диапазон.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58437.19880

При исследовании фотонных кристаллов СВЧ-диапазона, характеризующихся наличием фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне, в качестве интерфейса используются слои поглотителя электромагнитного излучения, выполненные в виде сплошного проводящего слоя (металлического, сильнолегированного полупроводникового) или в виде массива упорядоченных проводящих нанометровых полосок (металлических) [1,2]. Комплексная диэлектрическая проницаемость таких слоев обладает отрицательной действительной частью и значительной величиной мнимой части.

Однако в настоящее время усилился интерес к возможности применения в микроволновой технологии в качестве поглотителя электромагнитной энергии структур, содержащих воду как в виде сплошных слоев, так и в виде отдельных периодически расположенных капель [3], поскольку вода в СВЧ-диапазоне характеризуется значительной величиной как действительной, 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 слоев с высокой электропроводностью [4–8] обладают рядом преимуществ, таких как биосовместимость, доступность, простота настройки, оптическая прозрачность [3,9].

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследуются резонансные характеристики сверхвысокочастотных фотонных кристаллов, связанные с эффектом возникновения фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне, при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя.

В диапазоне частот 7–13 GHz исследованы сверхвысокочастотные 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 mm) и тефлона (четные слои, $\epsilon = 2.0$, толщина 18 mm). Фотонные кристаллы состояли из 11 слоев, слои полностью заполняли поперечное сечение волновода.

К фотонному кристаллу примыкал отрезок волновода, заполненный сплошным слоем дистиллированной воды толщиной d . Слой воды отделялся от последнего слоя фотонного кристалла тонкой тефлоновой пленкой ($\epsilon = 2.0$) толщиной $30 \mu\text{m}$. Дополнительно между пленкой и последним слоем фотонного кристалла создавался воздушный зазор, толщина L которого регулировалась (рис. 1).

Для расчета частотной зависимости коэффициента отражения $S_{11}(f)$ электромагнитной волны использовалась матрица передачи слоистой структуры [10–13] с различными значениями постоянной распространения электромагнитных волн γ_i и γ_{i+1} (где i — номер слоя) при учете распространения в волноводе только волны основного типа H_{10} .

Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(\nu)$ дистиллированной воды определялась на основе модели двухчастотной дебаевской релаксации [14–17]:

$$\epsilon^*(\nu) = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon_1}{1 + i2\pi\nu\tau_1} + \frac{\Delta\epsilon_3}{1 + i2\pi\nu\tau_3},$$

где $\epsilon_\infty = 3.96$ — оптическая диэлектрическая проницаемость, $\Delta\epsilon_1 = 72.15$ и $\Delta\epsilon_3 = 2.14$ — амплитуды релаксации, $\tau_1 = 8.32 \text{ ps}$ и $\tau_3 = 0.39 \text{ ps}$ — времена релаксации [14].

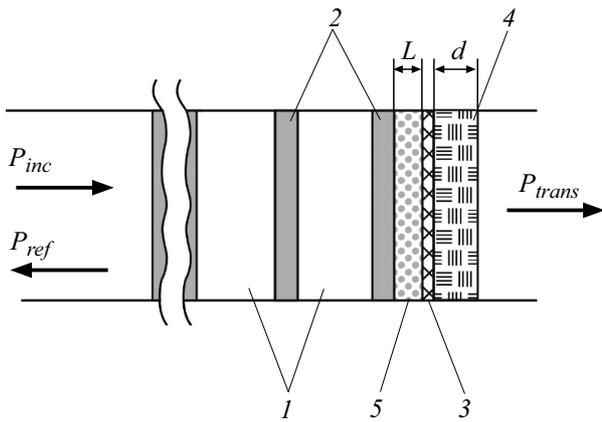


Рис. 1. Конструкция одномерного сверхвысокочастотного фотонного кристалла с поглотителем электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя, в качестве интерфейса. 1 — слой тефлона, 2 — слой Al_2O_3 , 3 — пленка тефлона, 4 — слой дистиллированной воды, 5 — воздушный зазор.

Для выяснения особенностей проявления фотонных таммовских резонансов в структуре одномерного сверхвысокочастотного фотонного кристалла с интерфейсом в виде поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя, был выполнен расчет коэффициента отражения в диапазоне частот 7–13 GHz. Анализировалась структура сверхвысокочастотного фотонного кристалла со слоем дистиллированной воды разной толщины d и при разных значениях толщины L воздушного зазора между пленкой и последним слоем фотонного кристалла.

Как следует из результатов расчета, на амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) фотонных кристаллов как в первой, так и во второй запрещенной зоне на частотах $f_{\text{Tamm}1}$ и $f_{\text{Tamm}2}$ возникают таммовские резонансы, положение которых зависит от толщины слоя дистиллированной воды.

На рис. 2 представлены результаты расчета в виде 3D-карты частот $f_{\text{Tamm}1}$ и амплитуд $S_{11\text{Tamm}1}$ коэффициента отражения таммовского резонанса в первой запрещенной зоне.

При увеличении толщины слоя дистиллированной воды наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовского резонанса в первой запрещенной зоне в диапазоне толщин d от 0 до 2.0 mm (рис. 2, *a*). Дальнейшее увеличение слоя воды приводит к затухающим осцилляциям частоты таммовского резонанса.

Как следует из представленных результатов, с увеличением толщины d слоя воды также наблюдаются осцилляции амплитуды таммовских резонансов, затухающие при большой толщине слоя воды (рис. 2, *b*).

Поведение амплитуды и частоты коэффициента отражения таммовского резонанса во второй запрещенной зоне во многом аналогично. При больших толщинах

слоя воды также наблюдается затухание осциллирующей амплитуды и частоты.

Управление частотой и амплитудой таммовских резонансов достигалось за счет изменения структуры интерфейса: создания воздушного зазора между тефлоновой пленкой и последним слоем фотонного кристалла.

Как следует из результатов расчета АЧХ фотонного кристалла (рис. 2, *a*, *b*), увеличение воздушного зазора L между пленкой и последним слоем фотонного кристалла при фиксированной толщине d слоя воды приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений.

При этом глубина таммовского резонанса может регулироваться толщиной L воздушного зазора. При малых толщинах L зазоров зависимость амплитуды таммовских резонансов от толщины слоя воды в диапазоне от 0.1 до 2.0 mm характеризуется наличием двух резко выраженных глубоких минимумов, которые с ростом толщины L зазора сливаются в один более плавный минимум.

Результаты расчетов также свидетельствуют о том, что в зависимости от толщины d слоя воды (при малых его толщинах) создание воздушного зазора с последующим увеличением его толщины L приводит либо к монотонному уменьшению амплитуды таммовских резонансов, либо к немонотонному изменению их амплитуды, при этом амплитуда таммовских резонансов может увеличиться более чем на 10 dB.

Поведение амплитуды и частоты коэффициента отражения таммовского резонанса во второй запрещенной зоне во многом аналогично. Отметим, что изменение частоты во второй запрещенной зоне при увеличении воздушного зазора L более чем в 2 раза превосходит аналогичное изменение в первой запрещенной зоне.

Экспериментально исследовался 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 GHz. Для изоляции воды использовалась тефлоновая пленка между фотонным кристаллом и слоем воды.

Экспериментально было исследовано влияние толщины d слоя дистиллированной воды на характеристики таммовского резонанса (рис. 3). При увеличении толщины слоя воды наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовского резонанса в первой запрещенной зоне в диапазоне толщин $d = 0–1.74$ mm (рис. 3, *a*) и во второй запрещенной зоне в диапазоне толщин $d = 0–1.2$ mm (рис. 3, *b*). Дальнейшее увеличение толщины d слоя воды приводит к затухающим осцилляциям частоты таммовского резонанса.

Как следует из результатов эксперимента, с увеличением слоя воды также наблюдаются осцилляции амплитуды таммовских резонансов, затухающие при большой толщине слоя воды. При этом в первой запрещенной зоне наблюдается значительное изменение амплитуды таммовского резонанса.

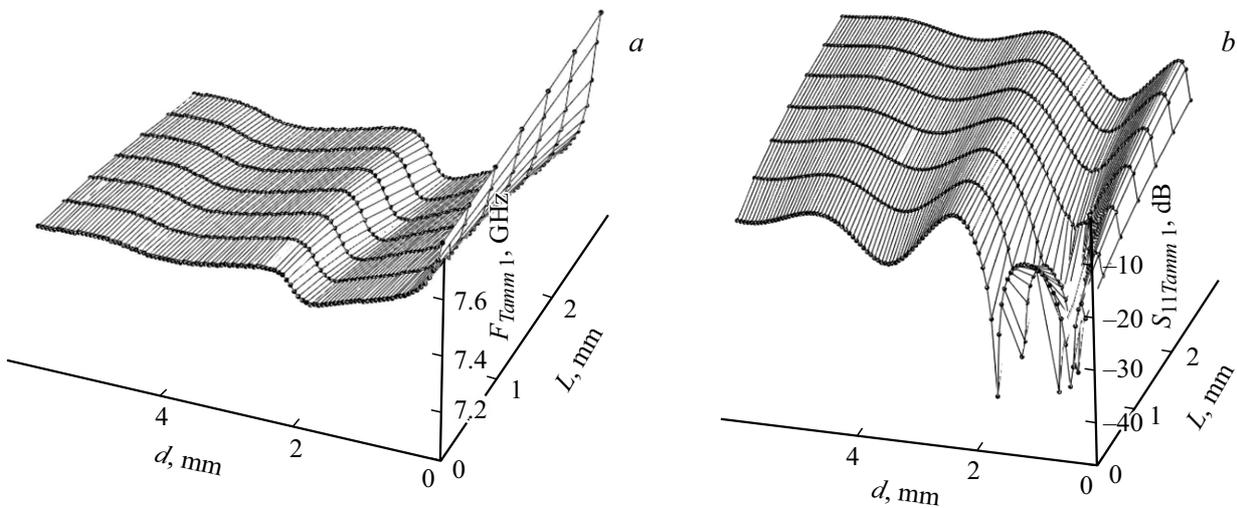


Рис. 2. Результаты расчета 3D-карты частот $f_{Tamman1}$ (a) и амплитуд $S_{11Tamman1}$ (b) коэффициента отражения таммовского резонанса в первой запрещенной зоне фотонного кристалла в зависимости от толщин слоя воды d и воздушного зазора L .

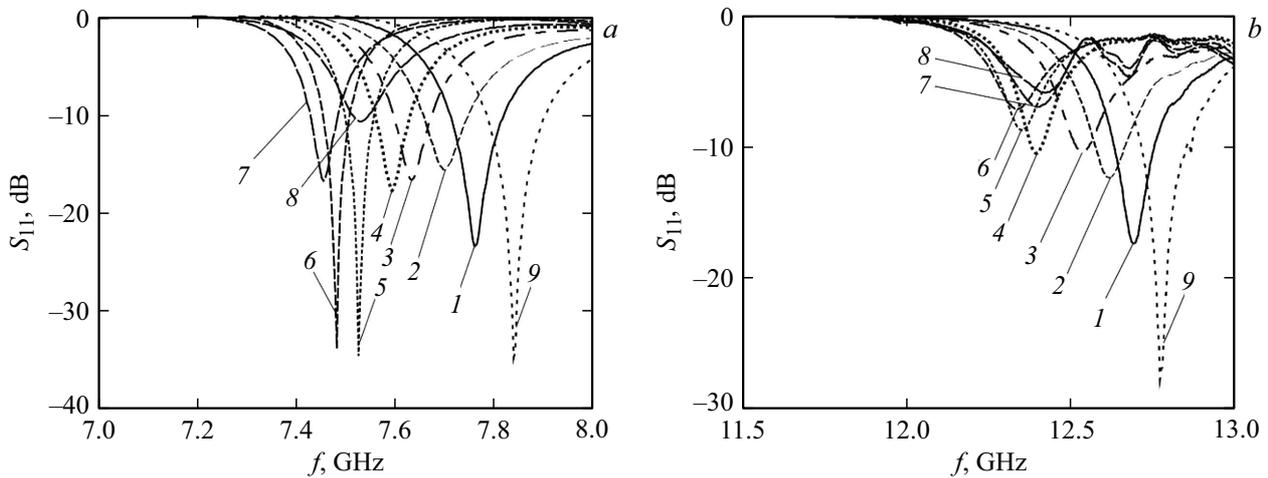


Рис. 3. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (a) и второй (b) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды толщиной $d = 0.06$ (1), 0.15 (2), 0.3 (3), 0.6 (4), 1.0 (5), 1.2 (6), 1.74 (7), 3.05 mm (8) и при отсутствии слоя воды (9). $L = 0$ mm.

Воздушный зазор в эксперименте создавался с помощью расположения между фотонным кристаллом и слоем воды тонких металлических диафрагм разной толщины с отверстием, равным сечению волновода, использованного при создании фотонного кристалла. Создание воздушного зазора при фиксированной толщине слоя воды приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений как в первой, так и во второй запрещенной зоне с увеличением воздушного зазора, что согласуется с результатами расчета.

Были выполнены измерения зависимости амплитуды таммовских резонансов от толщины воздушного зазора при фиксированной толщине слоя воды, которые подтвердили возможность управления амплитудой таммовских резонансов.

Таким образом, исследования резонансных характеристик фотонных кристаллов СВЧ-диапазона при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитной энергии структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя, позволили наблюдать эффекты возникновения фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне и установить, что увеличение толщины слоя дистиллированной воды приводит к затухающим осцилляциям частоты и амплитуды таммовского резонанса, а увеличение толщины воздушного зазора приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений.

Полученные результаты могут применяться, в частности, как при конструировании узкополосных перестраиваемых СВЧ-фильтров на отражение и СВЧ-

аттенуаторов на основе фотонных кристаллов, использующих в качестве поглотителя слой воды, так и для характеристики метаструктур, содержащих включения воды в виде сплошного слоя.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках программы стратегического академического лидерства „Приоритет 2030“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, A.A. Komarov, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **68** (12), 5115 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.3021412
- [2] A.B. Скрипаль, Д.В. Пономарев, А.А. Комаров, В.Е. Шаронов, Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Физика, **22** (2), 123 (2022). DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130
- [3] J. Wen, Q. Zhao, R. Peng, H. Yao, Y. Qing, J. Yin, Q. Ren, Opt. Mater. Express, **12** (4), 1461 (2022). DOI: 10.1364/OME.455723
- [4] H. Fan, S. Kaixuan, Z. Dace, L. Rui, Z. Yulu, D. Jianxiong, M. Ling, B. Shaowei, J. Jianjun, IEEE Trans. Electromagn. Compat., **63** (4), 1290 (2021). DOI: 10.1109/TEMC.2021.3050184
- [5] P.P. Kuzhir, A.G. Paddubskaya, N.I. Volynets, K.G. Batrakov, T. Kaplas, P. Lamberti, R. Kotsilkova, P. Lambin, J. Nanophoton., **11** (3), 032504 (2017). DOI: 10.1117/1.JNP.11.032504
- [6] J. Zheng, H. Zheng, Y. Pang, B. Qu, Z. Xu, Opt. Express, **31** (3), 3731 (2023). DOI: 10.1364/OE.482992
- [7] A.B. Богацкая, Н.В. Кленов, П.М. Никифорова, А.М. Попов, А.Е. Щеголев, Оптика и спектроскопия, **130** (4), 481 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.04.52259.48-21 [A.V. Bogatskaya, N.V. Klenov, P.M. Nikiforova, A.M. Popov, A.E. Schegolev, Opt. Spectrosc., **130** (4), 379 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.04.53722.48-21].
- [8] Д.А. Усанов, В.П. Мещанов, А.В. Скрипаль, Н.Ф. Попова, Д.В. Пономарев, М.К. Мерданов, ЖТФ, **87** (2), 216 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44128.1794 [D.A. Usanov, V.P. Meshchanov, A.V. Skripal, N.F. Popova, D.V. Ponomarev, M.K. Merdanov, Tech. Phys., **62** (2), 243 (2017). DOI: 10.1134/S106378421702027X].
- [9] Y.J. Yoo, S. Ju, S.Y. Park, Y.J. Kim, J. Bong, T. Lim, K.W. Kim, J.Y. Rhee, Y. Lee, Sci. Rep., **5** (1), 14018 (2015). DOI: 10.1038/srep14018
- [10] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, ЖТФ, **76** (5), 112 (2006). [D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.V. Abramov, A.S. Bogolyubov, Tech. Phys., **51** (5), 644 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206050173].
- [11] D.A. Usanov, S.A. Nikitov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, *One-dimensional microwave photonic crystals: new applications* (CRC Press, Boca Raton—London—N.Y., 2019). DOI: 10.1201/9780429276231
- [12] S. Fan, M.F. Yanik, Z. Wang, S. Sandhu, M.L. Povinelli, J. Light. Technol., **24** (12), 4493 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2006.886061
- [13] Ал.А. Никитин, Ан.А. Никитин, А.Б. Устинов, Е. Lähderanta, Б.А. Калиникос, ЖТФ, **86** (6), 115 (2016). [Al.A. Nikitin, An.A. Nikitin, A.B. Ustinov, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos, Tech. Phys., **61** (6), 913 (2016). DOI: 10.1134/S106378421606013X].
- [14] T. Sato, R. Buchner, J. Phys. Chem. A., **108** (23), 5007 (2004). DOI: 10.1021/jp035255o
- [15] T. Meissner, F.J. Wentz, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **42** (9), 1836 (2004). DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888
- [16] И.Н. Садовский, А.В. Кузьмин, Е.А. Шарков, Д.С. Саонов, Е.В. Пашинов, А.А. Ашеко, С.А. Батулин, *Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий* (ИКИ РАН, М., 2013).
- [17] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, А.О. Орлов, Радиотехника и электроника, **67** (3), 259 (2022). DOI: 10.31857/S0033849422030044 [G.S. Bordonskii, A.A. Gurulev, A.O. Orlov, J. Commun. Technol. Electron., **67** (3), 249 (2022). DOI: 10.1134/S1064226922030044].