

06

Применение целлюлозной бумаги с управляемыми электромагнитными характеристиками в качестве интерфейса фотонного кристалла сверхвысокочастотного диапазона

© 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 17 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 18 июля 2025 г.

Принято к публикации 12 августа 2025 г.

Целлюлозная бумага с управляемыми электромагнитными характеристиками использована в качестве интерфейса фотонного кристалла сверхвысокочастотного диапазона. Изменение структуры интерфейса, связанное с введением воздушного зазора, при определенных значениях толщины слоя целлюлозной бумаги и массовой доли дистиллированной воды приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений, при этом в первой запрещенной зоне изменения амплитуд резонансов монотонны, а во второй — немонотонны.

Ключевые слова: СВЧ-поглотители, фотонные таммовские резонансы, целлюлоза, вода.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.22.61577.20348

В последние годы усилился интерес к возможности применения в микроволновой технологии для экранирования и поглощения электромагнитной энергии полимерных пористых композитов [1,2] с проводящими нановключениями, такими как графен [3,4], углеродные нанотрубки [5,6], серебряные нанопроволоки [7]. В качестве эффективного возобновляемого экологически безопасного материала для экранирования электромагнитных полей также предложено использовать структуры на основе целлюлозы и ее производных [8] с включениями из углеродных нанотрубок и серебряных нанопроволок [9–12]. Однако достижение равномерной дисперсии нановключений в таких материалах остается одной из ключевых технологических проблем.

Еще одним направлением развития экологически безопасных микроволновых поглотителей электромагнитной энергии является использование структур, содержащих полярные жидкости (например, воду) как в виде сплошных слоев, так и в виде отдельных периодически расположенных капель [13,14].

Структура, выполненная в виде отдельных капель, электрический размер которых даже с учетом высоких значений диэлектрической проницаемости значительно меньше длины волны электромагнитного излучения, представляет собой композитную поверхность, характеризующуюся эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью. Электромагнитными параметрами этой поверхности можно управлять, изменяя размер капель и плотность их упаковки на диэлектрической подложке [14]. Однако размер капель не может быть произвольным, а во многом определяется свойствами подложки, например степенью смачиваемости подложки используемой жидкостью.

Альтернативным вариантом экологически безопасно-го поглотителя с управляемыми в широком диапазоне электромагнитными характеристиками является поглотитель на основе целлюлозной бумаги, выполняющей роль матрицы, содержащей полярную жидкость, например дистиллированную воду.

В настоящей работе представлены результаты применения целлюлозной бумаги с различной массовой долей полярной жидкости — дистиллированной воды — в качестве интерфейса для описания эффекта возникновения таммовских резонансов в запрещенной зоне фотонного кристалла сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона [15,16].

В диапазоне частот 7–13 GHz рассмотрена модель СВЧ-фотонного кристалла, выполненного на основе прямоугольного волновода с диэлектрическим заполнением из слоев керамики Al_2O_3 и тефлона [16].

К фотонному кристаллу примыкал отрезок волновода, заполненный поглотителем электромагнитной энергии в виде слоя целлюлозной бумаги с различной массовой долей X полярной жидкости (дистиллированной воды), толщиной d . Слой целлюлозной бумаги ограничивался с двух сторон тонкой тефлоновой пленкой ($\epsilon = 2.0$) толщиной $30\text{ }\mu\text{m}$. Дополнительно между пленкой и последним слоем фотонного кристалла создавался воздушный зазор, толщина L которого варьировалась.

Для корректности расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и коэффициента прохождения $S_{12}(f)$ фотонного кристалла, выполняемого с помощью метода матрицы передачи [17–19], использовались экспериментальные значения действительной (рис. 1, *a*) и мнимой (рис. 1, *b*) частей комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(f)$ слоя целлюлозной бумаги в диапазоне частот 7–13 GHz при раз-

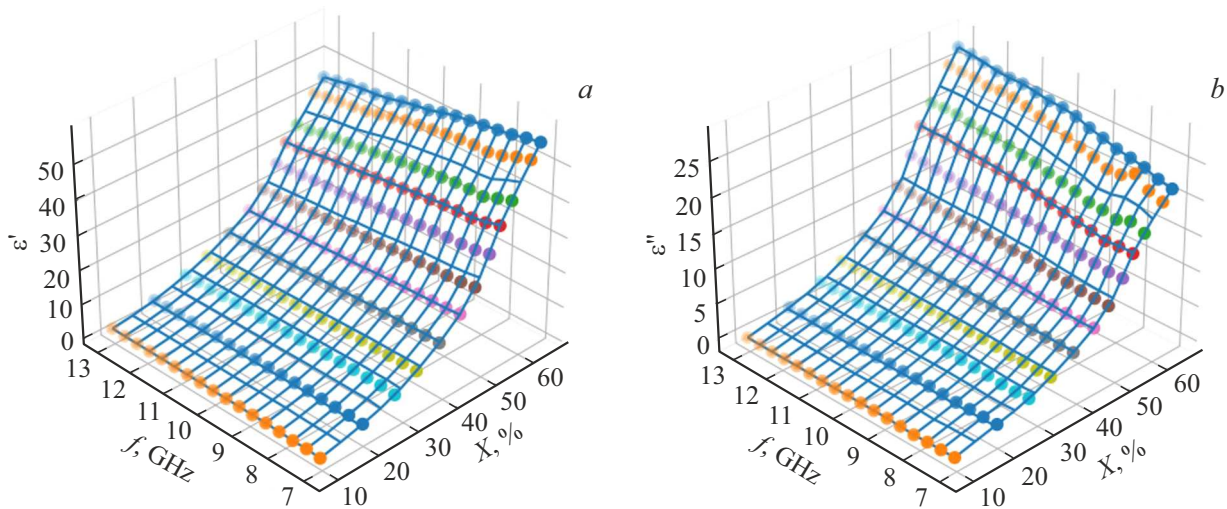


Рис. 1. Экспериментальные значения действительной $\varepsilon'(f)$ (a) и мнимой $\varepsilon''(f)$ (b) частей комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*(f)$ слоя целлюлозной бумаги при различных массовых долях X дистиллированной воды.

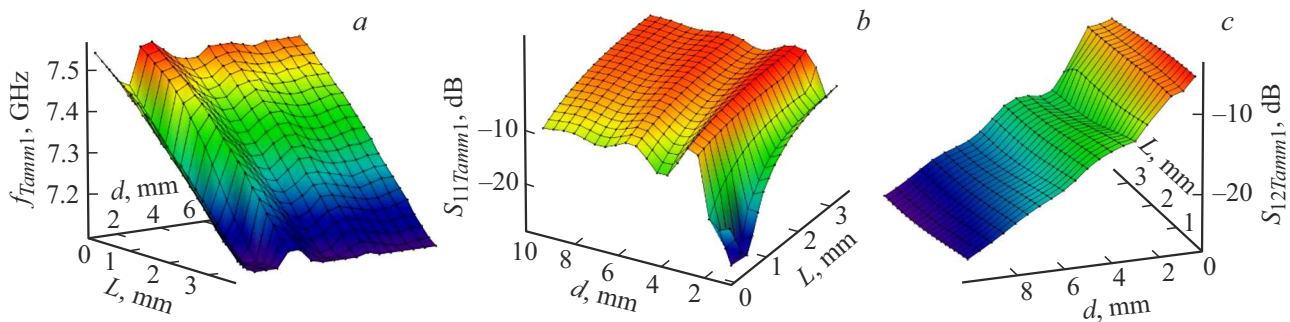


Рис. 2. Результаты расчета 3D-карты частот f_{Tamm1} (a) и амплитуд коэффициентов отражения $S_{11Tamm1}$ (b) и прохождения $S_{12Tamm1}$ (c) таммовского резонанса в первой запрещенной зоне в зависимости от толщины целлюлозной бумаги d и воздушного зазора L при фиксированном массовом содержании воды в материале $X = 55\%$.

личных массовых долях X полярной жидкости (дистиллированной воды). Для измерения частотной зависимости $\varepsilon^*(f)$ использовался векторный анализатор цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A, а также программное обеспечение Agilent 85071E Materials Measurement Software [20].

Применение целлюлозной бумаги с различной массовой долей полярной жидкости (дистиллированной воды в качестве интерфейса) приводит к возникновению таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах на частотах f_{Tamm1} и f_{Tamm2} .

Положение резонансов в запрещенных зонах определяется как геометрическими размерами и электромагнитными характеристиками целлюлозной бумаги, зависящими от массовой доли полярной жидкости, так и ее расположением относительно фотонного кристалла.

На рис. 2 представлены результаты расчета в виде 3D-карты частот f_{Tamm1} и амплитуд коэффициентов отражения $S_{11Tamm1}$ и прохождения $S_{12Tamm1}$ таммовского резонанса в первой запрещенной зоне.

При увеличении толщины целлюлозной бумаги, содержащей полярную жидкость при ее массовой доле 55%, наблюдаются затухающие осцилляции частот f_{Tamm1} и f_{Tamm2} таммовских резонансов в первой (рис. 2, a) и второй запрещенных зонах. Однако частота осцилляций в первой запрещенной зоне существенно меньше, чем во второй.

Увеличение толщины целлюлозной бумаги также приводит к затухающим осцилляциям коэффициента отражения, величина которого при больших толщинах целлюлозной бумаги становится постоянной величиной, зависящей как от массовой доли воды, так и от зазора между последним слоем фотонного кристалла и слоем целлюлозной бумаги (рис. 2, b). В отличие от зависимости коэффициента отражения зависимость коэффициента прохождения от толщины слоя целлюлозной бумаги является монотонно убывающей функцией, характеризующейся немонотонно изменяющейся скоростью изменения при малых толщинах (рис. 2, c). Во второй зоне коэффициент прохождения также моно-

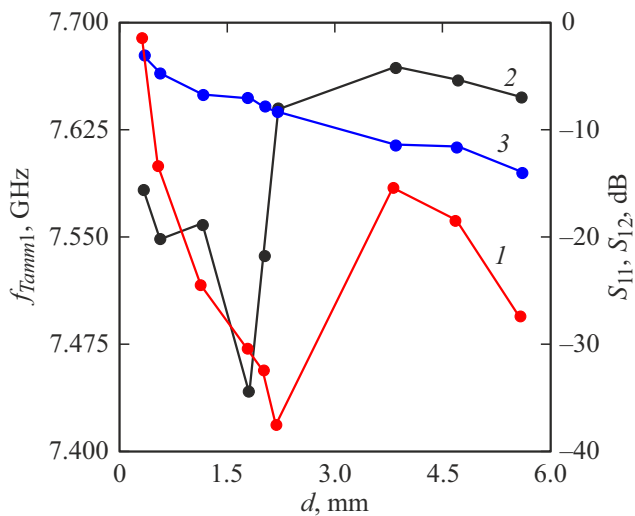


Рис. 3. Зависимости частоты f_{Tamm1} (кривая 1), амплитуды коэффициентов отражения S_{11} (кривая 2) и прохождения S_{12} (кривая 3) таммовского резонанса в первой запрещенной зоне от толщины слоя целлюлозной бумаги.

тонно убывает, при этом скорость убывания выше, чем в первой зоне.

Увеличение воздушного зазора L между слоем целлюлозной бумаги и последним слоем фотонного кристалла приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений как в первой, так и во второй запрещенной зоне. Сдвиг частоты во второй запрещенной зоне от ее высокочастотного края к низкочастотному достигает 1.3 GHz, что составляет более 70 % ширины второй запрещенной зоны. В то время как сдвиг частоты в первой запрещенной зоне составляет 0.43 GHz (30 % ширины первой запрещенной зоны).

В то же время амплитуды таммовских резонансов с увеличением воздушного зазора в диапазоне 0–5 мм ведут себя по-разному: амплитуда коэффициента отражения в первой зоне монотонно увеличивается, а амплитуда коэффициента прохождения уменьшается, тогда как во второй запрещенной зоне амплитуды коэффициентов отражения и прохождения изменяются немонотонно. При этом их изменение противоположно.

Такое различие в поведении амплитуд таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах связано с различной зависимостью частоты таммовского резонанса от величины зазора: в первой запрещенной зоне таммовский резонанс приближается к середине запрещенной зоны, не переходя через нее, а во второй запрещенной зоне резонанс переходит через середину запрещенной зоны. При смещении таммовского резонанса к середине запрещенной зоны как в первой, так и во второй запрещенной зоне амплитуда коэффициента отражения становится максимальной, а амплитуда коэффициента прохождения минимальной. Величина зазора, при которой таммовский резонанс возникает в

середине запрещенной зоны, зависит от толщины слоя целлюлозной бумаги и массовой доли дистиллированной воды в нем, определяющей величину комплексной диэлектрической проницаемости (рис. 1).

С помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A в диапазоне частот 7–13 GHz были измерены амплитудно-частотные характеристики фотонного кристалла.

Экспериментально было исследовано влияние толщины d слоя целлюлозной бумаги при массовой доле дистиллированной воды 55 % на характеристики таммовского резонанса (рис. 3). С ростом толщины целлюлозной бумаги при ее малой толщине происходит уменьшение частоты таммовских резонансов в первой (кривая 1 на рис. 3) и второй запрещенных зонах. В первой зоне при толщине $d > 2.2$ мм амплитуды осцилляций частоты и коэффициента отражения (кривая 2 на рис. 3) уменьшаются, а амплитуда коэффициента прохождения (кривая 3 на рис. 3) монотонно убывает со скоростью, зависящей от толщины слоя. Аналогичные изменения фиксируются и во второй запрещенной зоне, но при толщинах $d > 1.15$ мм.

Изменение структуры интерфейса с помощью введения воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем целлюлозной бумаги с фиксированной массовой долей дистиллированной воды приводит к изменению частот таммовских резонансов. В первой запрещенной зоне сдвиг таммовского резонанса составляет менее половины ширины запрещенной зоны, а во второй зоне — более половины ширины запрещенной зоны (кривые 1 на рис. 4, а и б). Вследствие этого, как и следует из результатов расчета, изменения амплитуд резонансов в первой зоне монотонны (кривые 2 и 3 на рис. 4, а), а во второй немонотонны (кривые 2 и 3 на рис. 4, б).

Следует отметить, что при малых значениях массовой доли полярной жидкости, приводящих к малым значениям комплексной диэлектрической проницаемости, немонотонность изменения амплитуд резонансов во второй зоне исчезает.

Таким образом, использование целлюлозной бумаги с различной массовой долей дистиллированной воды как элемента „зеленой“ электроники, характеризующегося свойствами поглотителя СВЧ-энергии с управляемыми параметрами, в качестве интерфейса позволяет реализовать эффект возникновения фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне. При этом управление характеристиками таммовских резонансов определяется геометрическими размерами и электрофизическими свойствами целлюлозной бумаги и структурой интерфейса.

Полученные результаты могут применяться, в частности, как при конструировании перестраиваемых СВЧ-фильтров и СВЧ-аттенуаторов на основе фотонных кристаллов, использующих в качестве поглотителя структуры на основе целлюлозной бумаги, так и при характеристике искусственно создаваемых материалов

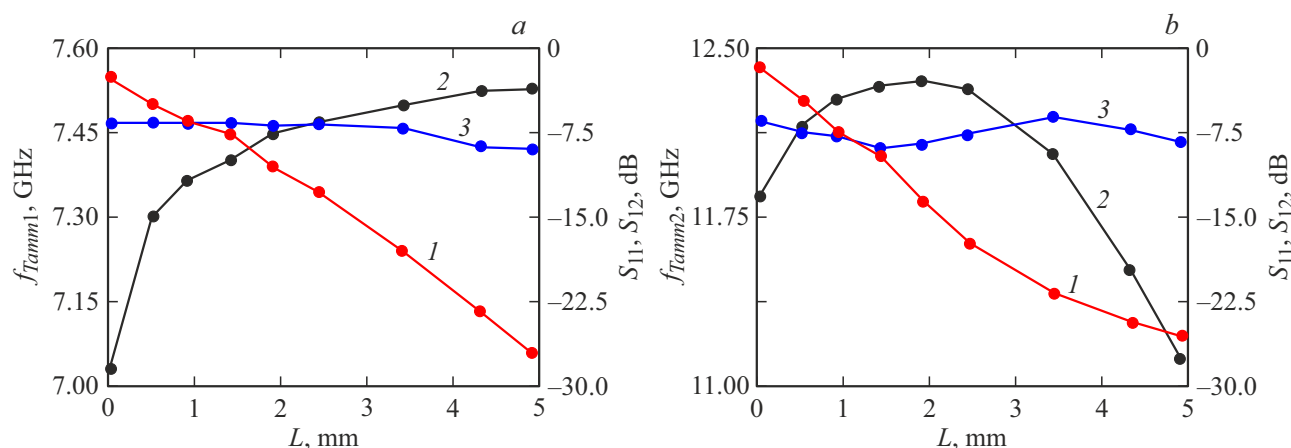


Рис. 4. Зависимости частот f_{Tamm1} и f_{Tamm2} (кривые 1), амплитуды коэффициента отражения S_{11} (кривые 2) и прохождения S_{12} (кривые 3) таммовского резонанса в первой (а) и во второй (б) запрещенных зонах от величины зазора.

на основе целлюлозы и ее производных с включениями в виде полярной жидкости или проводящих нановключений.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-22-00199.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.T. Orasugh, S.S. Ray, ACS Omega, **8** (9), 8134 (2023). DOI: 10.1021/acsomega.2c05815
- [2] Y. Chen, Y. Yang, Y. Xiong, L. Zhang, W. Xu, G. Duan, C. Mei, S. Jiang, Z. Rui, K. Zhang, Nano Today, **38**, 101204 (2021). DOI: 10.1016/j.nantod.2021.101204
- [3] S. Li, W. Li, J. Nie, D. Liu, G. Sui, Carbon, **143**, 154 (2019). DOI: 10.1016/j.carbon.2018.11.015
- [4] Y.J. Wan, P.L. Zhu, S.H. Yu, R. Sun, C.P. Wong, W.H. Liao, Carbon, **122**, 74 (2017). DOI: 10.1016/j.carbon.2017.06.042
- [5] T.W. Lee, S.E. Lee, Y.G. Jeong, Compos. Sci. Technol., **131**, 77 (2016). DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.06.003
- [6] Z. Zeng, H. Jin, M. Chen, W. Li, L. Zhou, Z. Zhang, Adv. Funct. Mater., **26** (2), 303 (2016). DOI: 10.1002/adfm.201503579
- [7] Z. Zeng, M. Chen, Y. Pei, S.I.S. Shahabadi, B. Che, P. Wang, X. Lu, ACS Appl. Mater. Interfaces, **9** (37), 32211 (2017). DOI: 10.1021/acsaami.7b07643
- [8] S.A. Jose, N. Cowan, M. Davidson, G. Godina, I. Smith, J. Xin, P.L. Menezes, Nanomaterials, **15** (5), 356 (2025). DOI: 10.3390/nano15050356
- [9] S. Song, H. Li, P. Liu, X. Peng, Carbohydr. Polym., **287**, 119347 (2022). DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119347
- [10] Y. Chen, L. Pang, Y. Li, H. Luo, G. Duan, C. Mei, W. Xu, W. Zhou, K. Liu, S. Jiang, Composites A, **135**, 105960 (2020). DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105960
- [11] T.W. Lee, S.E. Lee, Y.G. Jeong, ACS Appl. Mater. Interfaces, **8** (20), 13123 (2016). DOI: 10.1021/acsaami.6b02218
- [12] L.P. Wu, Y.Z. Li, B.J. Wang, Z.P. Mao, H. Xu, Y. Zhong, L.-P. Zhang, X.-F. Sui, Mater. Des., **159**, 47 (2018). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.08.037
- [13] 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
- [14] 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
- [15] A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, A.A. Komarov, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **68** (12), 5115 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.3021412
- [16] А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, М.А. Волшаник, Письма в ЖТФ, **50** (15), 30 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58437.19880 [A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, M.A. Volshani, Tech. Phys. Lett., **50** (8), 26 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.08.58911.19880].
- [17] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, ЖТФ, **76** (5), 112 (2006). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8846> [D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.V. Abramov, A.S. Bogolyubov, Tech. Phys., **51** (5), 644 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206050173].
- [18] 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
- [19] Ал.А. Никитин, Ан.А. Никитин, А.Б. Устинов, E. Lähderanta, Б.А. Калиникос, ЖТФ, **86** (6), 115 (2016). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43383> [Al.A. Nikitin, An.A. Nikitin, A.B. Ustinov, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos, Tech. Phys., **61** (6), 913 (2016). DOI: 10.1134/S106378421606013X].
- [20] https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics_Of_MeasuringDielectrics_5989-2589EN.pdf