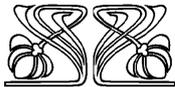
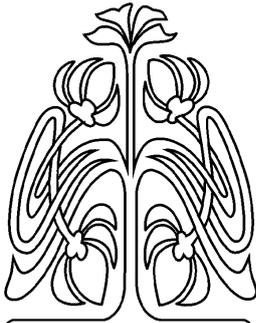




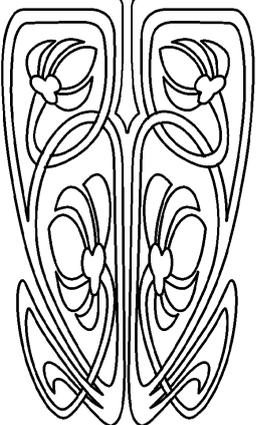
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 4–18
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 4–18
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-4-18>, EDN: COLBYW

Научная статья
УДК 621.372.2



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Резонансные эффекты в СВЧ фотонных кристаллах с поглотителем на основе целлюлозной бумаги

Ал. В. Скрипаль , Д. В. Пономарев, М. А. Волшаник, С. Ю. Добдин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики твердого тела Института физики, skripala_v@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7448-4560>, AuthorID: 36844

Пономарев Денис Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Института физики, ponomarev87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7822-937X>, AuthorID: 561183

Волшаник Мария Алексеевна, аспирант кафедры физики твердого тела Института физики, trimar97@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1726-8586>, AuthorID: 1256016

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Института физики, sergant1986@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>, AuthorID: 684129

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследовано возникновение фотонных таммовских резонансов в запрещенных зонах одномерного сверхвысокочастотного фотонного кристалла при использовании поглотителя электромагнитной энергии, созданного на основе водосодержащих структур (материалы «зелёной» электроники) в виде матрицы из целлюлозной бумаги с различной массовой долей наполнителя – дистиллированной воды для реализации интерфейса с управляемыми параметрами. На основании результатов компьютерного моделирования с использованием метода матрицы передачи и эксперимента доказана возможность управления фотонными резонансами Тамма с помощью изменения толщины слоя целлюлозы, массовой доли дистиллированной воды и толщины воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем целлюлозы. При увеличении толщины целлюлозной бумаги, содержащей дистиллированную воду при её массовой доле более 51%, наблюдаются затухающие осцилляции частот таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах. Увеличение толщины целлюлозной бумаги также приводит к затухающим осцилляциям коэффициентов отражения в первой и второй запрещённых зонах, величины которых при больших толщинах целлюлозной бумаги становятся постоянными величинами, зависящими как от массовой доли воды, так и от зазора между последним слоем фотонного кристалла и слоем целлюлозной бумаги. Изменение параметров интерфейса с помощью регулировки величины воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем целлюлозы позволяет управлять амплитудой таммовских резонансов. При этом для каждой фиксированной толщины слоя целлюлозы с конкретной величиной массовой доли дистиллированной воды для достижения максимальной амплитуды таммовского резонанса следует выбрать вполне определённую величину воздушного зазора.

Ключевые слова: фотонный кристалл, таммовский резонанс, интерфейс, целлюлоза, дистиллированная вода, сверхвысокочастотный диапазон

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00199, <https://rscf.ru/project/25-22-00199/>).



Для цитирования: Скрипаль Ал. В., Пономарев Д. В., Волшаник М. А., Добдин С. Ю. Резонансные эффекты в СВЧ фотонных кристаллах с поглотителем на основе целлюлозной бумаги // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 4–18. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-4-18>, EDN: COLBYW

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Resonance effects in microwave photonic crystals with a cellulose paper-based absorber

Al. V. Skripal[✉], D. V. Ponomarev, M. A. Volshaniк, S. Yu. Dobdin

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Alexander V. Skripal, skripala_v@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7448-4560>, AuthorID: 36844

Denis V. Ponomarev, ponomarev87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7822-937X>, AuthorID: 561183

Maria A. Volshaniк, trimar97@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1726-8586>, AuthorID: 1256016

Sergey Y. Dobdin, sergant1986@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>, AuthorID: 684129

Abstract. Background and Objectives: One promising direction for developing environmentally friendly electromagnetic wave absorbers involves using structures that incorporate polar liquids, such as water. This is because water in the microwave range exhibits both a significant real part and a significant imaginary part of the complex permittivity. Such structures can be either continuous water layers or composite surfaces comprising individually arranged periodic droplets. Compared to more traditional materials, electromagnetic radiation absorbers based on composite water-containing structures offer several advantages, such as biocompatibility, availability, ease of fabrication, and optical transparency. One example of such a composite is cellulose paper acting as a matrix, filled with distilled water. Composite structures based on cellulose and its derivatives with inclusions of carbon nanotubes and silver nanowires are already known to be used as absorbers. Using an absorber made of such a composite material as an interface layer in a photonic crystal enables the observation of various resonance effects arising from the specific properties of the interface. Altering the electromagnetic characteristics of this interface layer leads to changes in the frequency and amplitude of the photonic Tamm resonance. Therefore, it is of interest to study the emergence of Tamm resonances within the band gap of a microwave photonic crystal that utilizes an electromagnetic energy absorber based on water-containing cellulose paper as the interface layer. Furthermore, this study aims to demonstrate interface control by varying the mass fractions of distilled water. **Materials and Methods:** The experimental structure was fabricated as a photonic crystal comprising alternating layers of two different dielectric materials inside a rectangular waveguide. A layer of cellulose paper containing distilled water was sandwiched between two Teflon films and placed immediately adjacent to the last layer of the photonic crystal. A vector network analyzer was used to measure the frequency characteristics in the 7–13 GHz frequency range. Numerical calculations for the layered structures were performed using the transfer matrix method. **Results:** As the thickness of the cellulose paper containing distilled water (with a mass fraction of more than 51%) increases, damped oscillations of the Tamm resonance frequencies have been observed within the first and second band gaps. Increasing the cellulose paper thickness has also led to damped oscillations of the reflectivity coefficients in these band gaps. For greater cellulose paper thicknesses, these values have been stabilized, becoming constant. The final values depend on both the mass fraction of water and the size of the air gap between the last layer of the photonic crystal and the cellulose paper layer. **Conclusion:** Adjusting the interface parameters by regulating the air gap between the photonic crystal and the cellulose layer allows for control over the Tamm resonance amplitude. For each fixed cellulose layer thickness with a specific mass fraction of distilled water, a particular air gap value must be selected to achieve the maximum Tamm resonance amplitude.

Keywords: photonic crystal, Tamm resonance, interface, cellulose, distilled water, microwave range

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 25-22-00199, <https://rscf.ru/project/25-22-00199/>).

For citation: Skripal Al. V., Ponomarev D. V., Volshaniк M. A., Dobdin S. Yu. Resonance effects in microwave photonic crystals with a cellulose paper-based absorber. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 4–18 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-4-18>, EDN: COLBYW

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Резонансные свойства СВЧ фотонных кристаллов обусловлены интерференционными эффектами, возникающими при взаимодействии с ними электромагнитного излучения [1–4]. Ряд резонансных эффектов может быть обусловлен особенностями интерфейса структуры фотонного кристалла.

Известно, что использование в качестве интерфейса структур, содержащих поглотители электромагнитной энергии, может приводить

к возникновению резонансов в запрещённой зоне фотонного кристалла, называемых поверхностными фотонными состояниями в СВЧ фотонных кристаллах. В качестве поглотителей электромагнитной энергии могут быть использованы слои материалов, обладающих высокими потерями, например высокопроводящие полупроводниковые и металлических нанослои [5, 6].

Одним из направлений развития экологически безопасных поглотителей электромагнитной энергии является использование структур, со-



держащих полярные жидкости, например воду, поскольку вода в СВЧ-диапазоне характеризуется значительной величиной как действительной части комплексной диэлектрической проницаемости, так и её мнимой части [7, 8]. В качестве таких структур могут быть использованы сплошные слои воды и слои в виде отдельных периодически расположенных капель [9, 10]. Структура в виде отдельных капель представляет собой композитную поверхность, характеризующуюся эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью. Поглотители электромагнитного излучения на основе водосодержащих структур по сравнению с более традиционными материалами на основе слоёв с высокой электропроводностью [11–14], обладают рядом преимуществ, таких как биосовместимость, доступность, простота настройки, оптическая прозрачность. При этом водосодержащие поглотители могут использоваться в сетях Wi-Fi, сотовых телефонах и бытовой технике для ослабления вредных для организма человека воздействий электромагнитных волн [10].

При реализации фотонного таммовского состояния наблюдается локализация электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла на границе его интерфейса. Изменение электромагнитных характеристик интерфейса приводит к изменению частоты и амплитуды фотонного таммовского резонанса [15, 16].

В качестве интерфейса с управляемыми характеристиками можно использовать поглотитель в виде композитного материала. Таким композитом может выступать целлюлозная бумага, выполняющая роль матрицы, наполнителем которой служит дистиллированная вода. К настоящему времени известно применение в качестве поглотителей композитных структур на основе целлюлозы и её производных [17] с включениями из углеродных нанотрубок и серебряных нанопроволок [18–21].

В настоящей работе представлены результаты исследований эффекта возникновения таммовских резонансов в запрещённой зоне фотонного кристалла СВЧ-диапазона при использовании поглотителя электромагнитной энергии, созданного на основе водосодержащих структур (материалы «зелёной» электроники) в виде матрицы из целлюлозной бумаги с различной массовой долей наполнителя – дистиллированной воды для реализации интерфейса с управляемыми параметрами.

1. Моделирование СВЧ фотонного кристалла с интерфейсом в виде поглотителя на основе целлюлозной бумаги

Нами исследовались 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). Фотонные кристаллы состояли из 11 слоев, слои полностью заполняли поперечное сечение волновода. Количество слоёв выбиралось из условия достаточности для получения ярко выраженной зонной структуры амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла в X-диапазоне.

К фотонному кристаллу примыкал отрезок волновода, заполненный сплошным слоем водосодержащей структуры толщиной d в виде целлюлозной бумаги с различной массовой долей дистиллированной воды. С целью обеспечения постоянства массовой доли дистиллированной воды в течение всего эксперимента слой целлюлозной бумаги ограничивался с двух сторон тонкой тефлоновой плёнкой ($\epsilon = 2.0$) толщиной 30 мкм. Между водосодержащей структурой и последним слоем фотонного кристалла создавался воздушный зазор, толщина L , которого варьировалась (рис. 1).

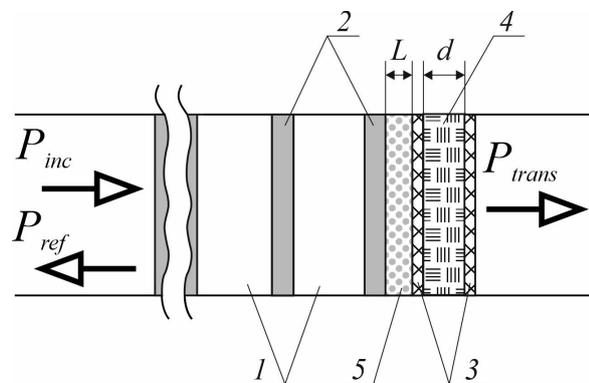


Рис. 1. Конструкция одномерного СВЧ фотонного кристалла с поглотителем электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе водосодержащих структур в качестве интерфейса: 1 – слой тефлона, 2 – слой Al_2O_3 , 3 – плёнки тефлона, 4 – слой композита в виде целлюлозной бумаги с различной массовой долей дистиллированной воды, 5 – воздушный зазор. P_{inc} , P_{trans} , P_{ref} – входной, прошедший и отражённый сигналы

Fig. 1. Design of a one-dimensional microwave photonic crystal with microwave absorber based on water-containing structures as an interface: 1 – teflon layer, 2 – Al_2O_3 layer, 3 – teflon films, 4 – composite layer in the form of cellulose paper with different mass fractions of distilled water, 5 – air gap. P_{inc} , P_{trans} , P_{ref} – incident, transmitted, and reflected signals

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и прохождения $S_{21}(f)$



электромагнитной волны использовалась матрица передачи слоистой структуры с различными значениями постоянной распространения электро-

магнитных волн (γ_i и γ_{i+1}) при учете распространения в волноводе только волны основного типа H_{10} [4, 22–24]:

$$T(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} - \gamma_j) z_{j,j+1}) & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} + \gamma_j) z_{j,j+1}) \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} + \gamma_j) z_{j,j+1}) & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} - \gamma_j) z_{j,j+1}) \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{21} электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, определяли через элементы матрицы передачи T_N с помощью соотношений:

$$S_{11} = -\frac{T_N[2, 1]}{T_N[2, 2]}, S_{21} = \frac{T_N[1, 1]T_N[2, 2] - T_N[1, 2]T_N[2, 1]}{T_N[2, 2]},$$

где $T_N = \begin{pmatrix} T_N[1, 1] & T_N[1, 2] \\ T_N[2, 1] & T_N[2, 2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,(j+1)} = T(z_{N,N+1}) \cdot T(z_{N-1,N}) \dots T(z_{1,2}) \cdot T(z_{0,1})$ – матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев.

Постоянные распространения электромагнитной волны: в пустом волноводе γ_0 , в диэлектрических слоях γ_d , и в слое целлюлозной бумаги $\gamma_{цб}$ с полным заполнением волновода по поперечному сечению и с различной массовой долей дистиллированной воды – были рассчитаны с использованием выражений:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 \mu_0}, \\ \gamma_{цб} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_{цб}^* \epsilon_0 \mu_0},$$

где $\epsilon_{цб}^*$ – комплексная диэлектрическая проницаемость слоя целлюлозной бумаги, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; ϵ_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

При расчёте частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и прохождения $S_{21}(f)$ фотонного кристалла использовались экспериментальные значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(f)$ слоя целлюлозной бумаги, измеренные в диапазоне частот 7–13 GHz при различных массовых долях X дистиллированной воды (рис. 2). Измерения частотной зависимости $\epsilon^*(f)$ выполнялись с использованием векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A (США, Agilent Technologies) и программного обеспечения Agilent 85071E Materials Measurement Software [25].

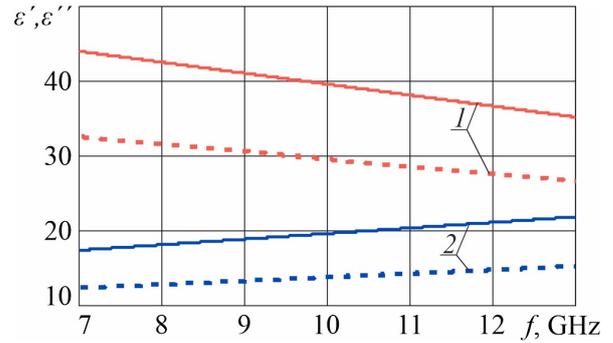


Рис. 2. Экспериментальные частотные зависимости действительной $\epsilon'(f)$ (линии 1) и мнимой $\epsilon''(f)$ (линии 2) частей комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(f)$ слоя целлюлозной бумаги при массовой доле дистиллированной воды 51% (штриховые линии) и 55% (сплошные линии) (цвет онлайн)

Fig. 2. Experimental frequency dependences of the real $\epsilon'(f)$ (curves 1) and imaginary $\epsilon''(f)$ (curves 2) parts of the complex permittivity $\epsilon^*(f)$ of a cellulose paper layer with a mass fraction of distilled water equal to 51% (dashed lines) and 55% (solid lines) (color online)

Как следует из результатов расчетов, применение целлюлозной бумаги с различной массовой долей полярной жидкости – дистиллированной воды – в качестве интерфейса приводит к возникновению в первой и во второй запрещенных зонах на частотах f_{Tamm1} и f_{Tamm2} таммовских резонансов, положение которых зависит от толщины целлюлозы при фиксированной массовой доле воды (рис. 3).

При увеличении толщины целлюлозной бумаги, содержащей дистиллированную воду при её массовой доле 51% и 55%, наблюдаются затухающие осцилляции частот f_{Tamm1} и f_{Tamm2} таммовских резонансов в первой (рис. 4, а) и второй запрещённых зонах (рис. 4, б). Так, например, при массовой доле 55% осцилляции в первой запрещённой зоне исчезают при толщинах больших ~ 10.0 мм, а их период составляет ~ 3.0 мм. Во второй зоне осцилляции исчезают при толщинах больших ~ 5.5 мм с периодом ~ 1.8 мм.

Увеличение толщины целлюлозной бумаги также приводит к затухающим осцилляциям коэффициентов отражения в первой и второй

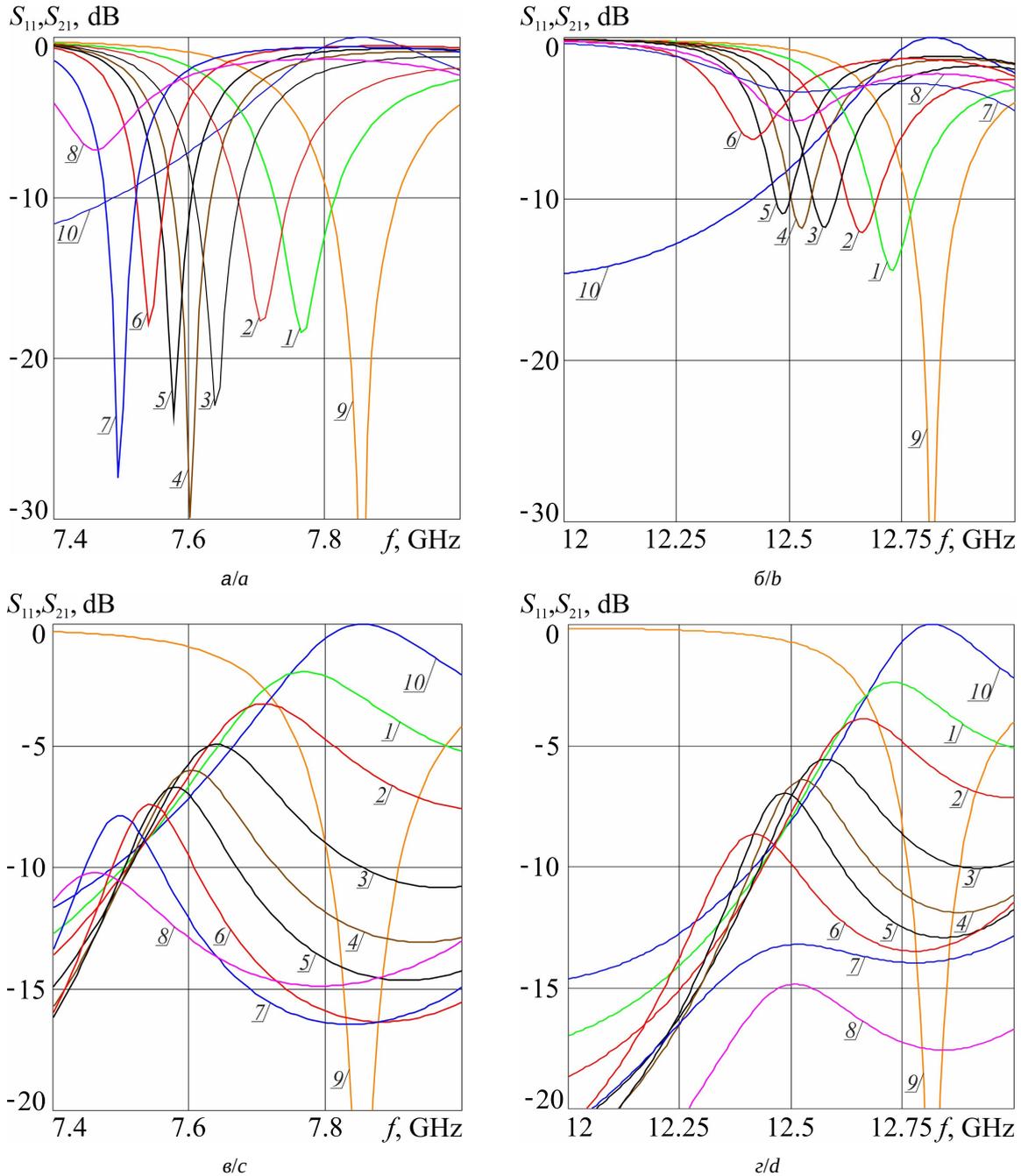


Рис. 3. Частотные зависимости: коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещённых зонах, коэффициента прохождения S_{21} в первой (в) и второй (г) запрещённых зонах 11-слойного фотонного кристалла с интерфейсом в виде целлюлозной бумаги при фиксированной массовой доле дистиллированной воды 55% при различной толщине поглощающего электромагнитное излучение слоя d , мм: 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.4, 4 – 0.6, 5 – 0.8, 6 – 1.2, 7 – 1.8, 8 – 2.4. Кривые 9 (для S_{11}) и 10 (для S_{21}) отвечают случаю отсутствия поглотителя. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 3. Frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) band gaps and transmission coefficient S_{21} in the first (c) and second (d) band gaps of an 11-layer photonic crystal with the interface layer in the form of absorber made of cellulose paper at a fixed mass fraction of distilled water 55% for different thicknesses d , mm: 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.4, 4 – 0.6, 5 – 0.8, 6 – 1.2, 7 – 1.8, 8 – 2.4, Curves 9 (S_{11}) and 10 (S_{21}) correspond to the absence of the absorber. $L = 0.0$ mm (color online)

(рис. 5) запрещённых зонах, величины которых при больших толщинах целлюлозной бумаги становятся постоянными величинами, зависящими

как от массовой доли воды, так и от зазора между последним слоем фотонного кристалла и слоем целлюлозной бумаги.

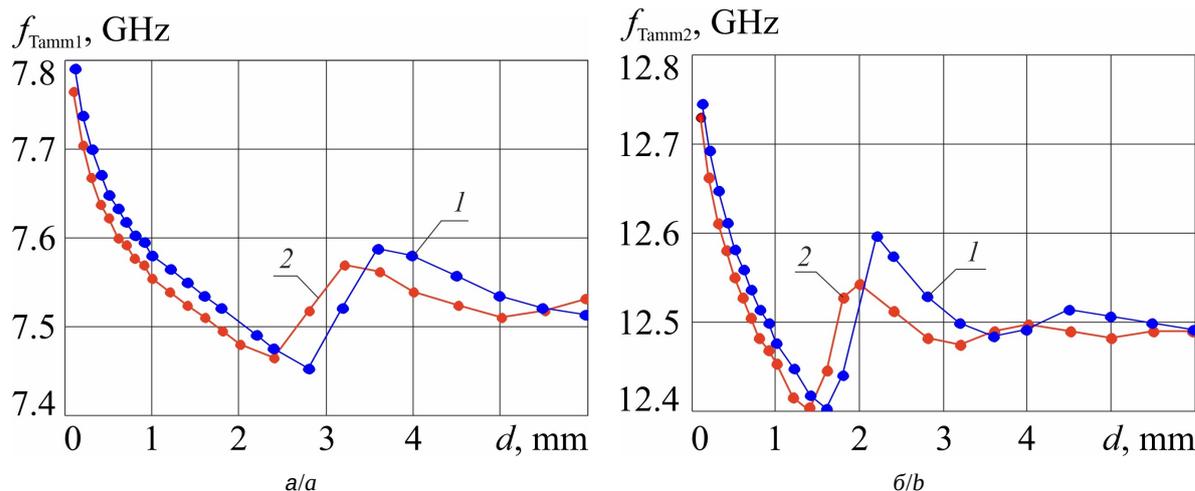


Рис. 4. Зависимости частоты таммовского резонанса f_{Tamm1} в первой (а) и f_{Tamm2} во второй (б) запрещённых зонах от толщины d слоя целлюлозы. Массовая доля воды 51% (кривые 1) и 55% (кривые 2). $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)
 Fig. 4. Dependences of the Tamm resonance frequency f_{Tamm1} in the first (a) and f_{Tamm2} in the second (b) band gaps on the cellulose layer thickness d . The water mass fraction is 51% (curves 1) and 55% (curves 2). $L = 0.0$ mm (color online)

Зависимости коэффициента прохождения в первой и второй запрещённых зонах от толщины слоя целлюлозной бумаги являются монотонно убывающими функциями (рис. 6).

быть отражены в виде диаграммы в координатах «амплитуда ($S_{11\text{Tamm}}$) – частота (f_{Tamm})» (рис. 7). Эту диаграмму можно назвать «фазовым портретом таммовского резонанса», каждая точка которого соответствует определённой толщине d слоя целлюлозной бумаги.

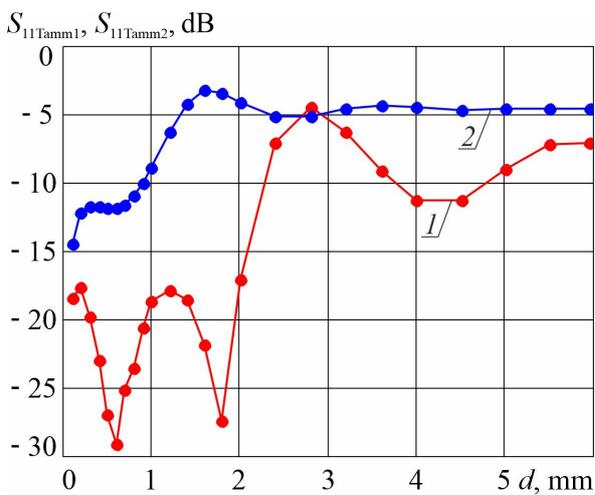


Рис. 5. Зависимости амплитуд коэффициентов отражения таммовского резонанса $S_{11\text{Tamm1}}$ (кривая 1) в первой и $S_{11\text{Tamm2}}$ (кривая 2) во второй запрещённых зонах от толщины d слоя целлюлозной бумаги. Массовая доля воды 55%. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)
 Fig. 5. Dependences of the amplitudes of the Tamm resonance reflection coefficients $S_{11\text{Tamm1}}$ (curve 1) in the first and $S_{11\text{Tamm2}}$ (curve 2) in the second band gap on the thickness d of the cellulose paper layer. The mass fraction of water is 55%. $L = 0.0$ mm (color online)

Особенности характеристик фотонных таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах фотонного кристалла в зависимости от толщины слоя целлюлозной бумаги могут

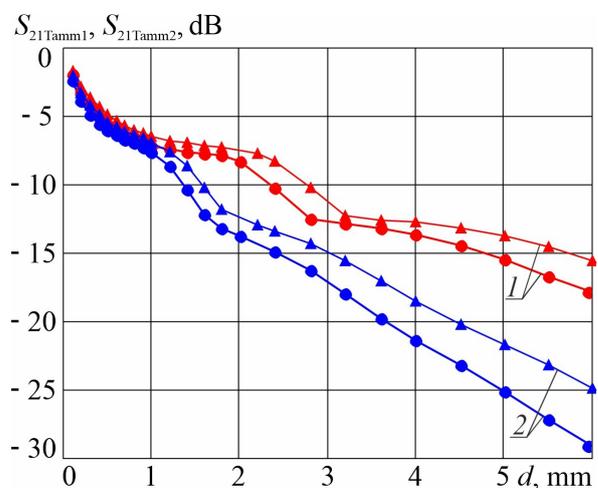


Рис. 6. Зависимости амплитуд коэффициентов прохождения таммовского резонанса $S_{21\text{Tamm1}}$ в первой (кривые 1) и $S_{21\text{Tamm2}}$ (кривые 2) во второй запрещённых зонах от толщины d слоя целлюлозной бумаги для массовых долей воды 51% (треугольные метки) и 55% (круглые метки). $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)
 Fig. 6. Dependences of the amplitudes of the Tamm resonance transmission coefficients $S_{21\text{Tamm1}}$ in the first (curves 1) and $S_{21\text{Tamm2}}$ in the second (curves 2) band gaps on the thickness d of the cellulose paper layer. The mass fraction of water is 51% (triangular marks) and 55% (circle marks). $L = 0.0$ mm (color online)

Положение резонансов в запрещённых зонах определяется как геометрическими размерами



и электромагнитными характеристиками целлюлозной бумаги, зависящими от массовой доли полярной жидкости, так и её расположением относительно фотонного кристалла.

Как следует из результатов расчета АЧХ фотонного кристалла, представленных на рис. 8 и 9, увеличение воздушного зазора L между слоем целлюлозной бумаги и последним слоем фотон-

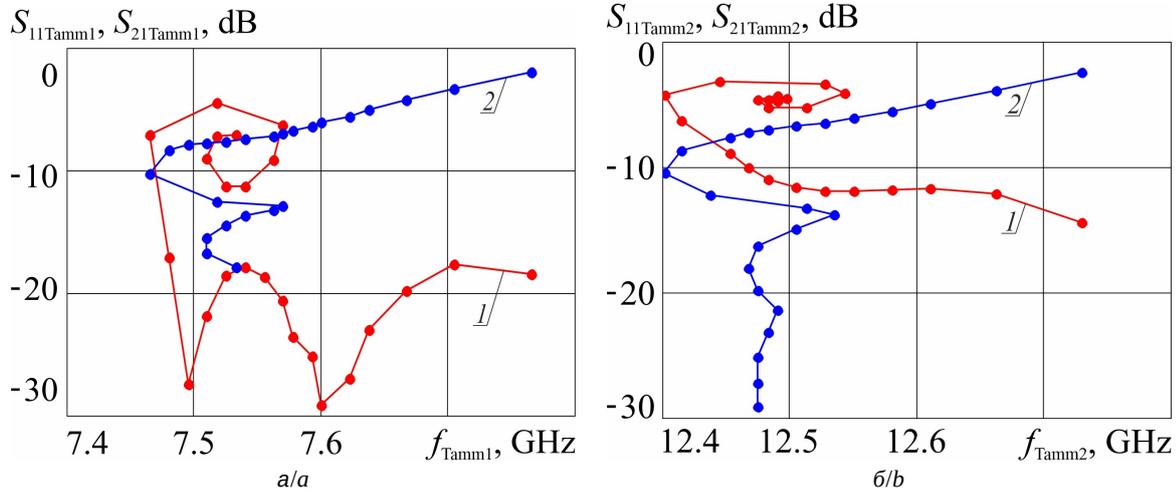


Рис. 7. Диаграммы «амплитуда – частота» таммовского резонанса в первой (кривые 1) и второй (кривые 2) запрещенных зонах: $S_{11\text{Tamm1}}, S_{21\text{Tamm1}}, f_{\text{Tamm1}}$ – в первой запрещенной зоне (а); $S_{11\text{Tamm2}}, S_{21\text{Tamm2}}, f_{\text{Tamm2}}$ – во второй запрещенной зоне фотонного кристалла (б). Массовая доля воды 55%. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 7. The “amplitude – frequency” diagrams of the Tamm resonance in the first (curves 1) and second (curves 2) band gaps of the photonic crystal: $S_{11\text{Tamm1}}, S_{21\text{Tamm1}}, f_{\text{Tamm1}}$ in the first band gap (a); $S_{11\text{Tamm2}}, S_{21\text{Tamm2}}, f_{\text{Tamm2}}$ in the second band gap (b). The mass fraction of water is 55%. $L = 0.0$ mm (color online)

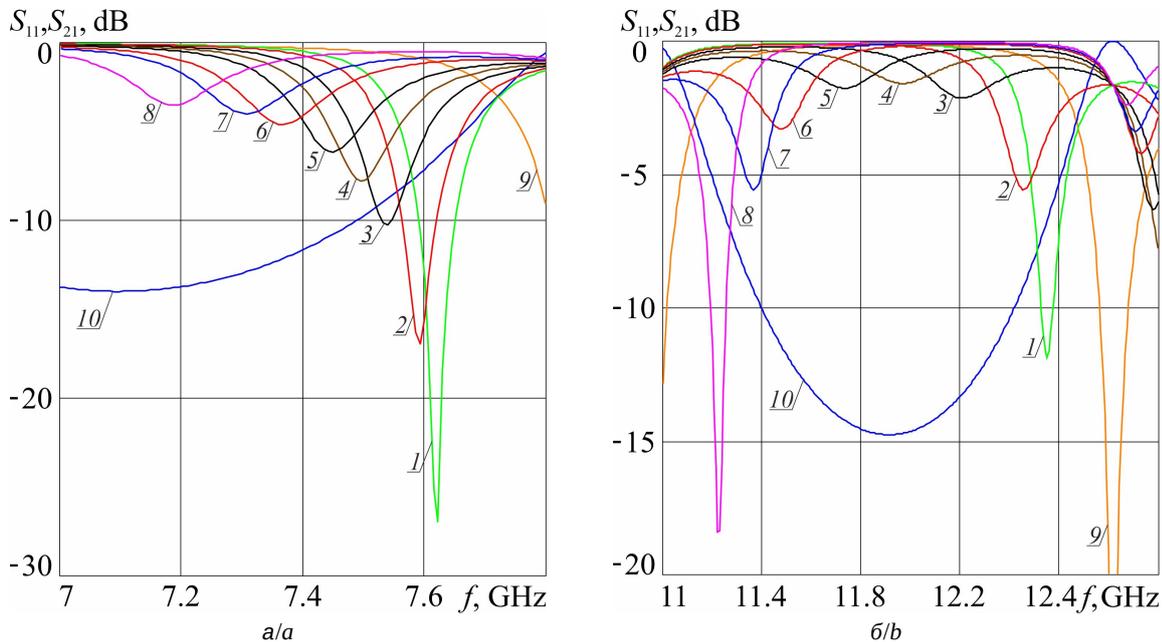


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещённых зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя целлюлозной бумаги толщиной $d = 0.5$ мм при различных значениях воздушного зазора L , мм: 1 – 0; 2 – 0.25; 3 – 0.5; 4 – 1.0; 5 – 2.0; 6 – 3.0; 7 – 3.5; 8 – 4.5; 9 и 10 (S_{21}) – без целлюлозной бумаги (цвет онлайн)

Fig. 8. Frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) band gaps of an 11-layer photonic crystal with the interface layer in the form of absorber made of cellulose paper with a thickness of $d = 0.5$ mm for different values of the air gap L , mm: 1 – 0, 2 – 0.25, 3 – 0.5, 4 – 1.0, 5 – 2.0, 6 – 3.0, 7 – 3.5, 8 – 4.5, 9 and 10 (S_{21}) – in the absence of cellulose paper (color online)



ного кристалла приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений как в первой (рис. 8, а и 9, а), так и во второй (рис. 8, б и 9, б) запрещенных зонах.

Изменение частоты и амплитуды таммовских резонансов в первой и второй запрещенных

зонах с увеличением воздушного зазора между плёнкой и последним слоем фотонного кристалла представлены на рис. 10 и 11. Как следует из представленных результатов, с увеличением величины воздушного зазора наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских

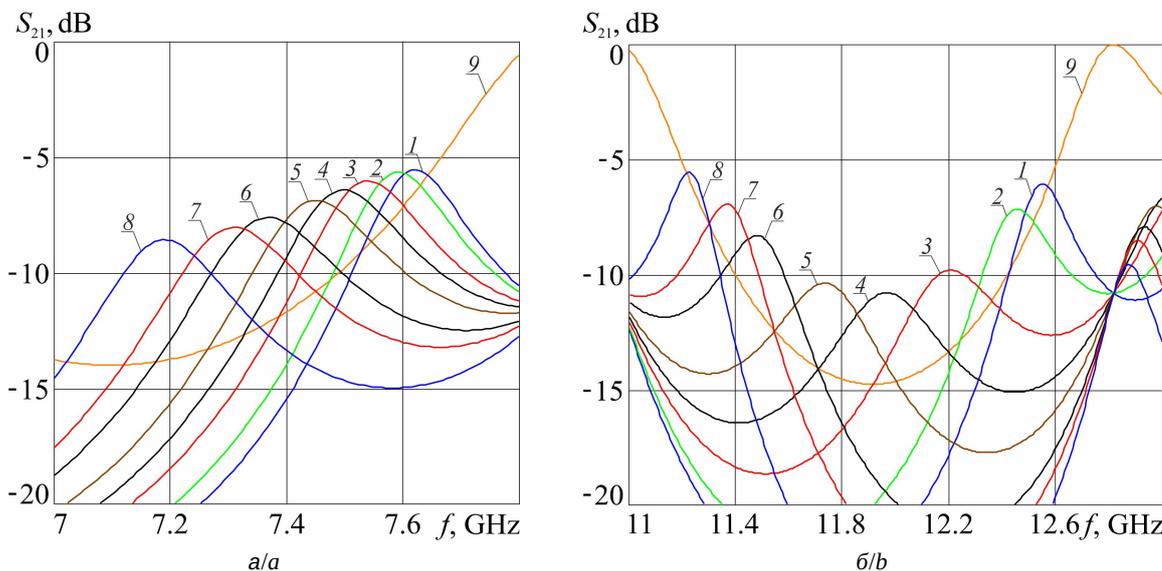


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициента прохождения S_{21} в первой (а) и второй (б) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды толщиной $d = 0.5$ мм при различных значениях воздушного зазора L , мм: 1 – 0; 2 – 0.25; 3 – 0.5; 4 – 1.0; 5 – 2.0; 6 – 3.0; 7 – 3.5; 8 – 4.5; 9 – без целлюлозной бумаги (цвет онлайн)

Fig. 9. Frequency dependences of the transmission coefficient S_{21} in the first (a) and second (b) band gaps of an 11-layer photonic crystal with the interface layer in the form of absorber made of cellulose paper with a thickness of $d = 0.5$ mm for different values of the air gap L , mm: 1 – 0, 2 – 0.25, 3 – 0.5, 4 – 1.0, 5 – 2.0, 6 – 3.0, 7 – 3.5, 8 – 4.5, 9 – in the absence of cellulose paper (color online)

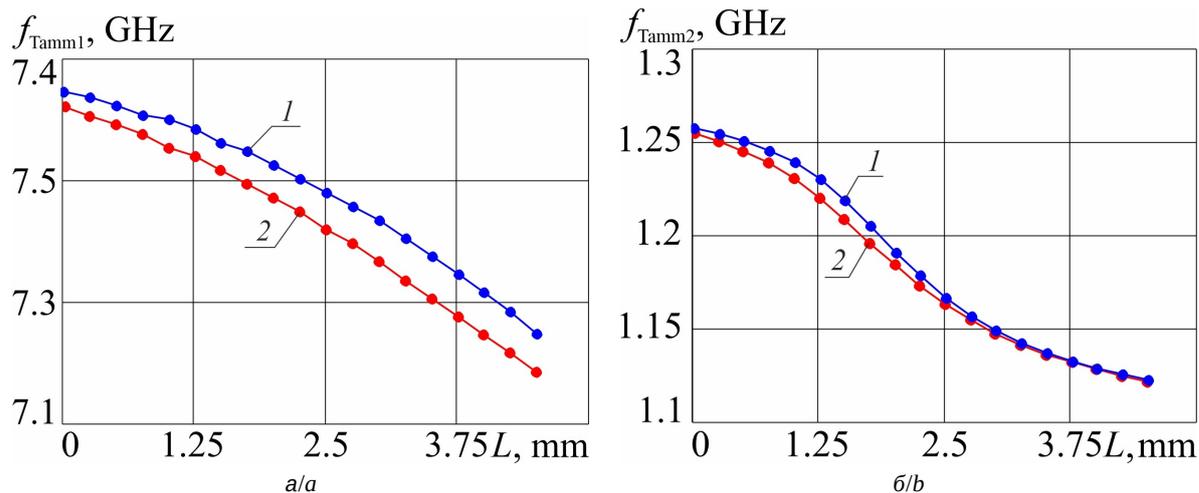


Рис. 10. Зависимости частоты таммовского резонанса f_{Tamm1} в первой (а) и f_{Tamm2} во второй (б) запрещенных зонах от величины воздушного зазора L между слоем целлюлозной бумаги и последним слоем фотонного кристалла. Массовая доля воды 51% (кривые 1) и 55% (кривые 2). $d = 0.5$ мм (цвет онлайн)

Fig. 10. Dependences of the Tamm resonance frequency f_{Tamm1} in the first (a) and f_{Tamm2} in the second (b) band gaps on the size of the air gap L between the cellulose paper layer and the last photonic layer. The mass fraction of water is 51% (curves 1) and 55% (curves 2). $d = 0.5$ mm (color online)



резонансов в первой и второй запрещённых зонах.

В то же время амплитуды коэффициентов отражения $S_{11\text{Tamm}}$ и прохождения $S_{21\text{Tamm}}$ таммовских резонансов с увеличением воздушного зазора L в диапазоне 0–5 мм изменяются монотонно в первой запрещённой зоне ($S_{11\text{Tamm}1}$ увели-

чивается, $S_{21\text{Tamm}1}$ уменьшается) и немонотонно во второй запрещённой зоне (при $L = 1.75$ мм величина $S_{11\text{Tamm}2}$ достигает максимального значения, $S_{21\text{Tamm}2}$ достигает минимального значения) (рис. 11). Это свидетельствует о возможности регулировки амплитуды таммовского резонанса посредством изменения величины L воздушно-

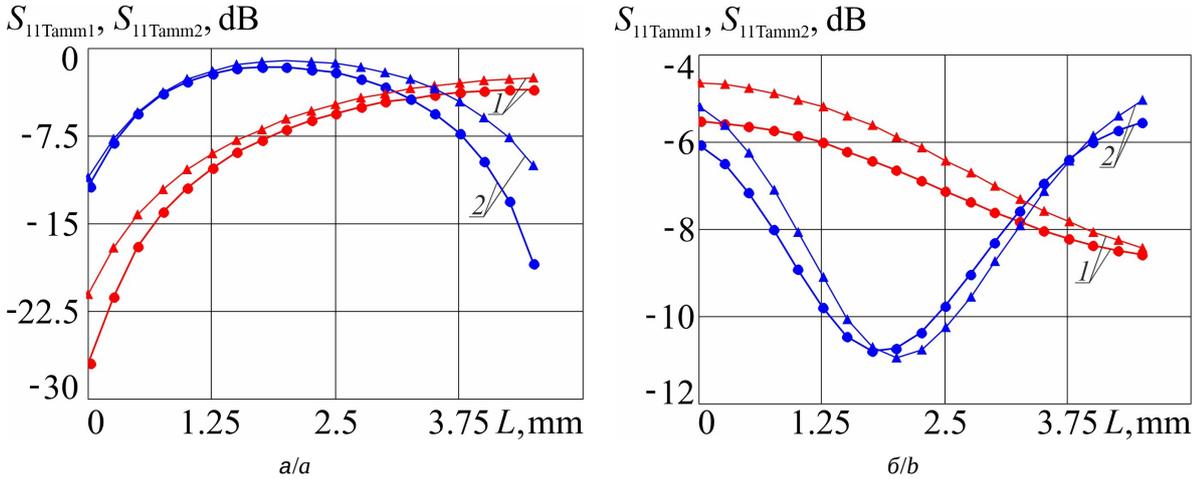


Рис. 11. Зависимости амплитуды коэффициентов отражения $S_{11\text{Tamm}1}$ и $S_{11\text{Tamm}2}$ (а) и прохождения $S_{21\text{Tamm}1}$ и $S_{21\text{Tamm}2}$ (б) таммовского резонанса в первой (кривые 1) и второй (кривые 2) запрещённых зонах от величины воздушного зазора L между слоем целлюлозной бумаги и последним слоем фотонного. Массовая доля воды 51% (треугольные метки) и 55% (круглые метки). $d = 0.5$ мм (цвет онлайн)

Fig. 11. Dependences of the amplitude of the reflection coefficients $S_{11\text{Tamm}1}$ and $S_{11\text{Tamm}2}$ (a) and transmission coefficients $S_{21\text{Tamm}1}$ and $S_{21\text{Tamm}2}$ (b) of the Tamm resonance in the first (curve 1) and second (curve 2) band gaps on the size of the air gap L between the cellulose paper layer and the last photonic layer. The mass fraction of water is 51% (triangular marks) and 55% (circle marks). $d = 0.5$ mm (color online)

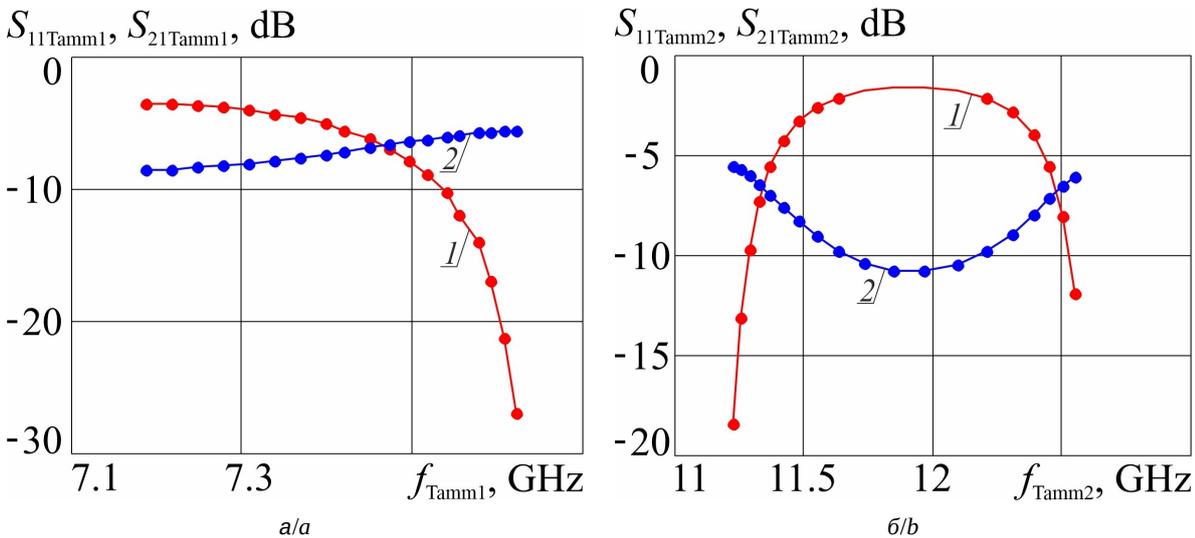


Рис. 12. Диаграммы амплитуда – частота таммовского резонанса $S_{11\text{Tamm}1}$ (кривая 1), $S_{21\text{Tamm}1}$ (кривая 2), $f_{\text{Tamm}1}$ в первой (а) и $S_{11\text{Tamm}2}$ (кривая 1), $S_{21\text{Tamm}2}$ (кривая 2), $f_{\text{Tamm}2}$ во второй (б) запрещённых зонах фотонного кристалла, каждая точка которой соответствует определённой величине L воздушного зазора. Массовая доля воды 55%. $d = 0.5$ мм (цвет онлайн)

Fig. 12. Amplitude – frequency diagrams of the Tamm resonance $S_{11\text{Tamm}1}$ (curve 1), $S_{21\text{Tamm}1}$ (curve 2), $f_{\text{Tamm}1}$ in the first (a) and $S_{11\text{Tamm}2}$ (curve 1), $S_{21\text{Tamm}2}$ (curve 2), $f_{\text{Tamm}2}$ in the second (b) band gaps of the photonic crystal, each point of which corresponds to a certain value L of the air gap. The mass fraction of water is 55%. $d = 0.5$ mm (color online)



го зазора при фиксированной толщине d слоя воды.

Характеристики фотонных таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах фотонного кристалла в зависимости от величины воздушного зазора представим в виде диаграммы в координатах «амплитуда – частота» (рис. 12). Эта диаграмма представляет «фазовый портрет таммовского резонанса», каждая точка которого соответствует определённой величине L воздушного зазора.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

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. Экспериментально было исследовано влияние толщины d слоя целлюлозной бумаги при массовой доле дистиллированной воды 55% на характеристики таммовского резонанса (рис. 13 и 14).

Как следует из результатов эксперимента, с ростом толщины целлюлозной бумаги при её малой толщине происходит уменьшение частоты f_{Tamm} таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах (рис. 15). Дальнейшее увеличение толщины целлюлозной бумаги приводит к затухающим осцилляциям частоты таммовского резонанса.

В первой и второй запрещённых зонах при малых толщинах слоя целлюлозной бумаги наблюдается резкое изменение коэффициентов отражения и прохождения таммовских резонансов. При больших толщинах амплитуды осцилляций коэффициента отражения уменьшаются, а амплитуды коэффициентов прохождения монотонно убывают со скоростью, зависящей от толщины слоя (рис. 16). Изменение этих характеристик в зависимости от ширины зазора L отражено на рис. 17 и 18.

Управление частотой и амплитудой таммовских резонансов, основываясь на результатах компьютерного моделирования, достигалось изменением структуры интерфейса с помощью введения воздушного зазора между фотонным кри-

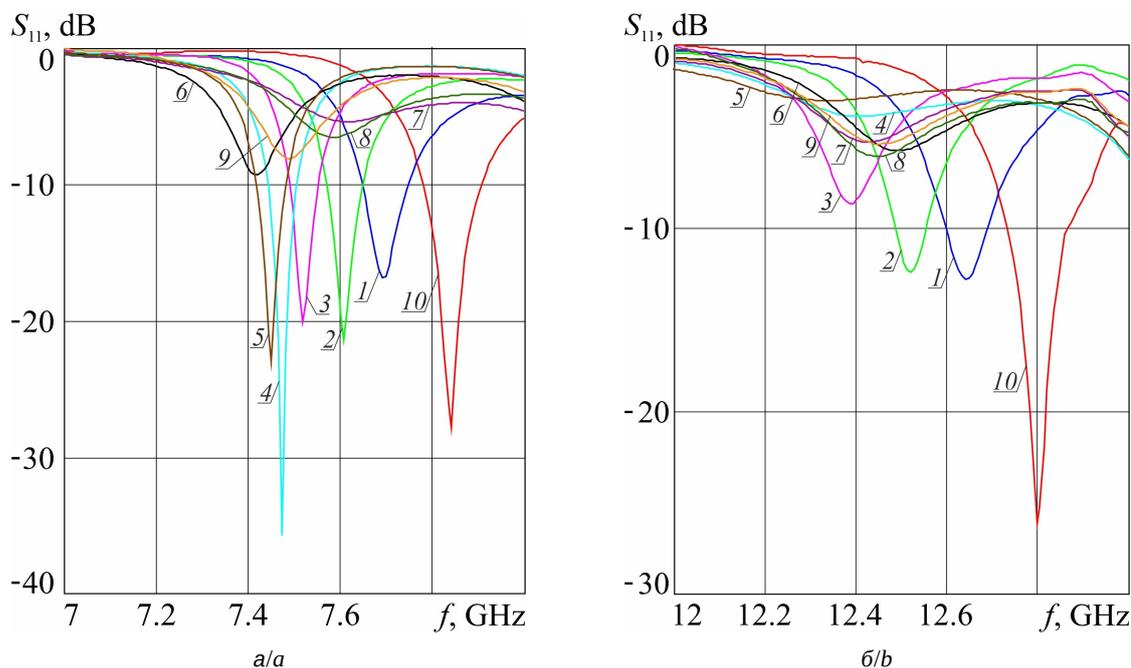


Рис. 13. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещённых зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде целлюлозной бумаги при фиксированной массовой доле дистиллированной воды 55% для различной толщины d , мм: 1 – 0.34; 2 – 0.56; 3 – 1.15; 4 – 1.79; 5 – 2.0; 6 – 2.2; 7 – 3.83; 8 – 4.7; 9 – 5.6; 10 – без целлюлозной бумаги. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 13. Experimental frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) band gaps of an 11-layer photonic crystal with the interface layer in the form of absorber made of cellulose paper at a fixed mass fraction of distilled water $X = 55\%$ for different thicknesses d , mm: 1 – 0.34, 2 – 0.56, 3 – 1.15, 4 – 1.79, 5 – 2.0, 6 – 2.2, 7 – 3.83, 8 – 4.7, 9 – 5.6, and 10 – in the absence of cellulose paper. $L = 0.0$ mm (color online)

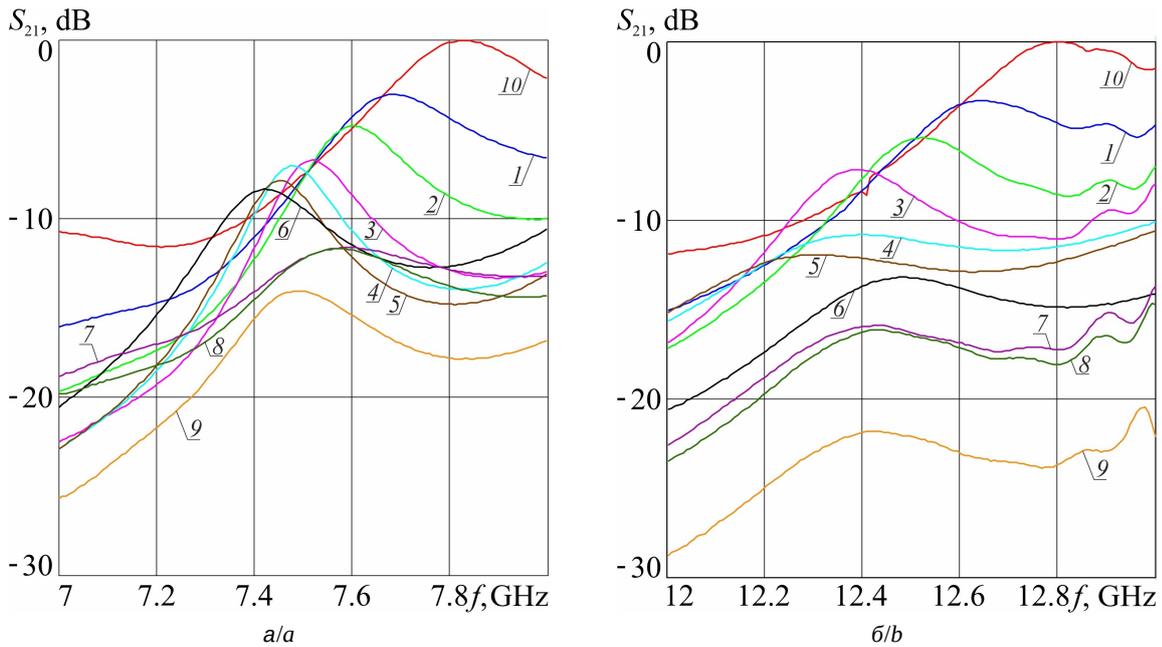


Рис. 14. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения S_{21} в первой (а) и второй (б) запрещённых зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде целлюлозной бумаги при фиксированной массовой доле дистиллированной воды 55% для различной толщины d , мм: 1 – 0.34; 2 – 0.56; 3 – 1.15; 4 – 1.79; 5 – 2.0; 6 – 2.2; 7 – 3.83; 8 – 4.7; 9 – 5.6; 10 – без целлюлозной бумаги; $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 14. Experimental frequency dependences of the transmission coefficient S_{21} in the first (a) and second (b) band gaps of an 11-layer photonic crystal with the interface layer in the form of absorber made of cellulose paper at a fixed mass fraction of distilled water $X = 55\%$ for different thicknesses d , mm: 1 – 0.34, 2 – 0.56, 3 – 1.15, 4 – 1.79, 5 – 2.0, 6 – 2.2, 7 – 3.83, 8 – 4.7, 9 – 5.6, and 10 – in the absence of cellulose paper. $L = 0.0$ mm (color online)

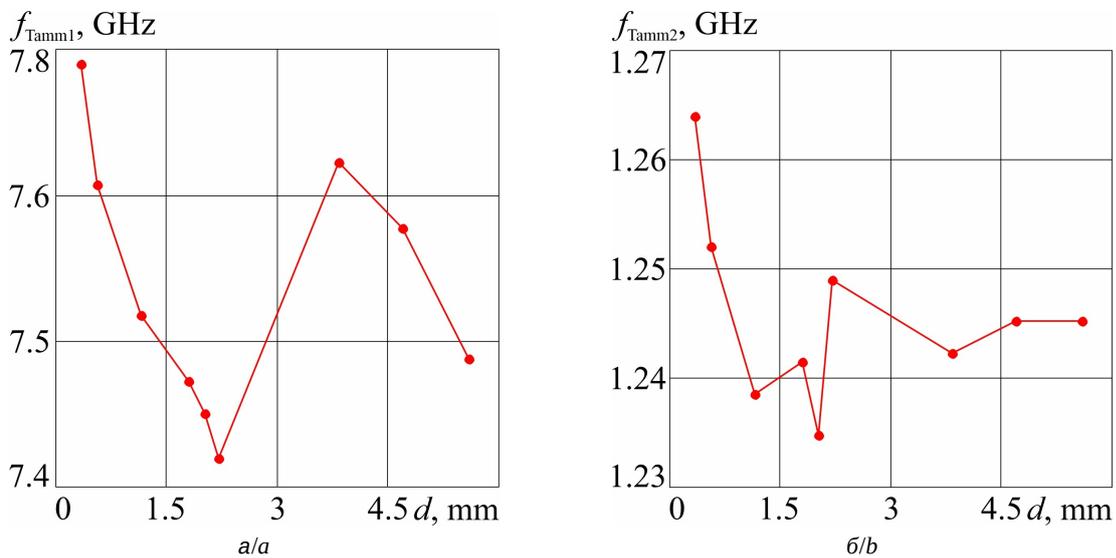


Рис. 15. Зависимости частоты таммовского резонанса в первой f_{Tamm1} (а) и второй f_{Tamm2} (б) запрещённых зонах от толщины слоя целлюлозной бумаги

Fig. 15. Dependences of the Tamm resonance frequency in the first f_{Tamm1} (a) and second f_{Tamm2} (b) band gaps on the thickness of the cellulose paper layer

сталлом и слоем целлюлозной бумаги с фиксированной массовой долей дистиллированной воды.

Воздушный зазор в эксперименте создавался с помощью расположения между фотонным

кристаллом и слоем целлюлозной бумаги тонких металлических диафрагм, разной толщины, с отверстием равным сечению волновода, использованного при создании фотонного кристалла.

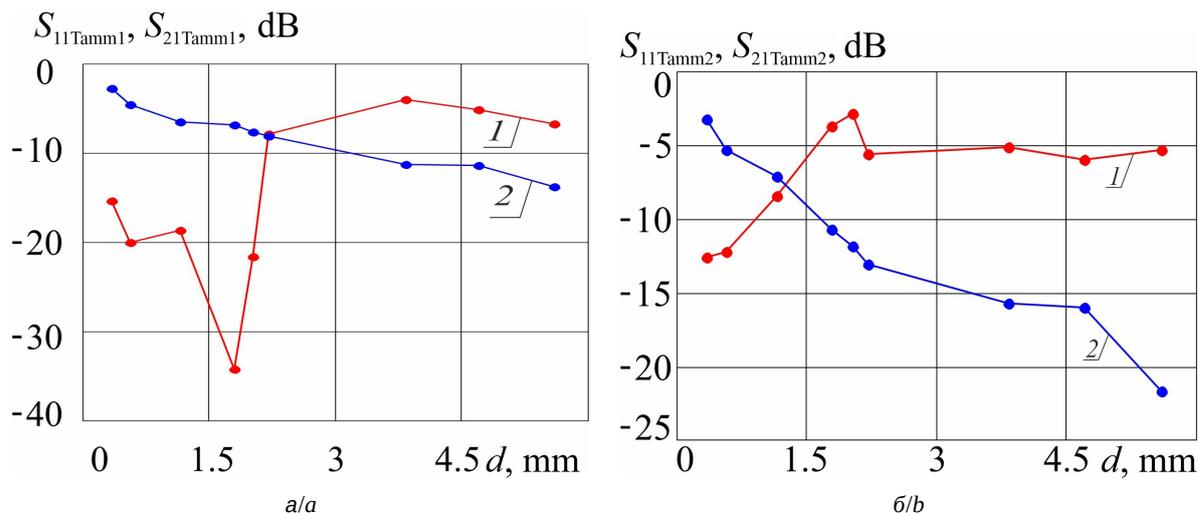


Рис. 16. Зависимости амплитуд коэффициентов отражения S_{11} (кривые 1) и прохождения S_{12} (кривые 2) таммовского резонанса в первой (а) и второй (б) запрещённых зонах от толщины слоя целлюлозной бумаги (цвет онлайн)

Fig. 16. Dependences of the amplitudes of the reflection coefficients S_{11} (curves 1) and transmission coefficients S_{12} (curves 2) of the Tamm resonance in the first (a) and second (b) band gaps on the thickness of the cellulose paper layer (color online)

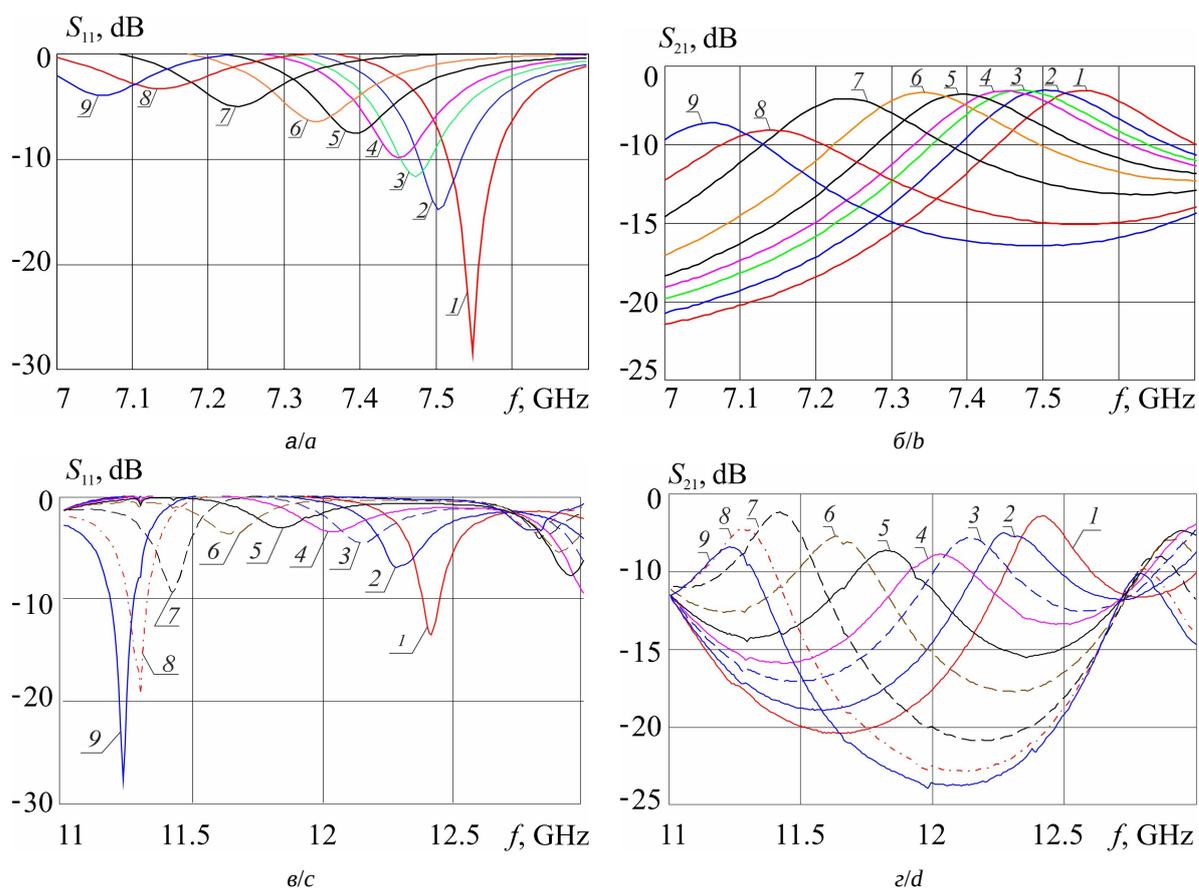


Рис. 17. Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} и коэффициентов прохождения S_{21} в первой (а, б) и второй (в, г) запрещённых зонах при использовании в качестве интерфейса слоя целлюлозы толщиной $d = 0.5$ мм при различных значениях зазора L , мм: 1 – 0; 2 – 0.5; 3 – 0.9; 4 – 1.4; 5 – 1.9; 6 – 2.43; 7 – 3.4; 8 – 4.3; 9 – 4.9 (цвет онлайн)

Fig. 17. Experimental frequency dependences of the reflection coefficients S_{11} and transmission coefficients S_{21} in the first (a, b) and second (c, d) band gaps when using a cellulose layer with a thickness of $d = 0.5$ mm as an interface for different values of the gap L , mm: 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 (color online)

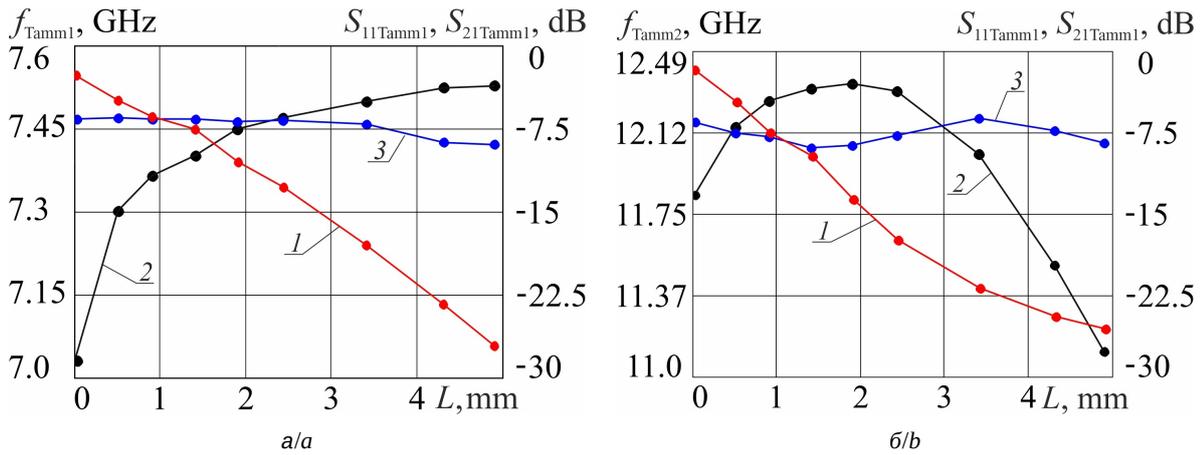


Рис. 18. Зависимости частот f_{Tamm1} и f_{Tamm2} (кривые 1), амплитуды коэффициента отражения S_{11} (кривые 2) и прохождения S_{12} (кривые 3) таммовского резонанса в первой (а) и во второй (б) запрещённых зонах от величины зазора (цвет онлайн)

Fig. 18. Dependences of the frequencies f_{Tamm1} and f_{Tamm2} (curves 1), the amplitude of the reflection coefficient S_{11} (curves 2) and the transmission S_{12} (curves 3) of the Tamm resonance in the first (a) and second (b) band gaps on the gap size (color online)

Как следует из результатов эксперимента АЧХ фотонного кристалла, представленных на рис. 17, 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 запрещённых зонах.

Изменение частоты и амплитуды таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах с увеличением воздушного зазора между плёнкой и последним слоем фотонного кристалла представлены на рис. 18. С увеличением величины воздушного зазора наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах. В то же время изменения амплитуд таммовских резонансов в первой зоне монотонны, а во второй – немонотонны. Следует отметить, при значительном уменьшении массовой доли полярной жидкости в целлюлозной бумаге немонотонность изменения амплитуд резонансов во второй запрещённой зоне исчезает.

Можно сделать вывод, 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.

Заключение

В работе рассмотрены особенности возникновения фотонных таммовских резонансов в запрещённых зонах одномерной брэгговской структуры СВЧ-диапазона при использовании в качестве интерфейса фотонного кристалла водосодержащей структуры – элемента «зелёной электроники», обладающего свойствами поглотителя СВЧ-энергии.

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. Последнее обеспечивает достижение высокой чувствительности таммовского резонанса к изменению как толщины слоя целлюлозы, так и массовой доли дистиллированной воды в этом слое.

Установлено, что увеличение толщины целлюлозной бумаги, содержащей дистиллированную воду при её массовой доле более 51%, приводит к затухающим осцилляциям частоты и амплитуды таммовского резонанса. С увеличением воздушного зазора наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов в первой и второй запрещённых зонах.

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.



Разработанная методика расчетов и изменений может применяться, в частности, как при конструировании перестраиваемых фильтров и аттенуаторов, использующих в качестве поглотителя структуры на основе целлюлозной бумаги, так и характеристики искусственно создаваемых материалов на основе целлюлозы и её производных с различными видами включений – от непроводящих диэлектриков в виде дистиллированной воды до проводящих включений в виде нанотрубок.

Список литературы / References

- Rybin M. V., Limonov M. F. Resonance effects in photonic crystals and metamaterials. *Phys. Usp.*, 2019, vol. 62, no. 8, pp. 823–838. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.03.038543>
- Tolmachev V. A. Optical properties of one-dimensional photonic crystals obtained by micromatching silicon (A review). *Opt. Spectrosc.*, 2017, vol. 122, no. 4, pp. 646–660. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17030201>
- Sibilia C., Benson T. M., Marciniak M., Szoplik T., eds. *Photonic Crystals: Physics and Technology*. Milan, Springer, 2008. 284 p. <https://doi.org/10.1007/978-88-470-0844-1>
- Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V. *One-dimensional Microwave Photonic Crystals: New Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2019. 154 p. <https://doi.org/10.1201/9780429276231>
- 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, vol. 68, iss. 12, pp. 5115–5122. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3021412>
- 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, vol. 22, iss. 2, pp. 123–130 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130>
- Sato T., Buchner R. Dielectric relaxation processes in ethanol/water mixtures. *J. Phys. Chem. A*, 2004, vol. 108, iss. 23, pp. 5007–5015. <https://doi.org/10.1021/jp035255o>
- Meissner T., Wentz F. J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, vol. 42, no. 9, pp. 1836–1849. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888>
- Wen J., Zhao Q., Peng R., Yao H., Qing Y., Yin J., Ren Q. Progress in water-based metamaterial absorbers: A review. *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 1461–1479. <https://doi.org/10.1364/OME.455723>
- Yoo Y. J., Ju S., Park S. Y., Kim Y. Ju., Bong J., Lim T., Kim K. W., Rhee J. Y., Lee Y. Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, no. 1, art. 14018. <https://doi.org/10.1038/srep14018>
- He F., Si K., Zha D., Li R., Zhang Yu., Dong J., Miao L., Bie Sh., Jiang J. Broadband microwave absorption properties of a frequency-selective surface embedded in a patterned honeycomb absorber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, vol. 63, iss. 4, pp. 1290–1294. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3050184>
- Kuzhir P. P., Paddubskaya A. G., Volynets N. I., Batrakov K. G., Kaplas T., Lamberti P., Kotsilkova R., Lambin P. Main principles of passive devices based on graphene and carbon films in microwave – THz frequency range. *J. Nanophoton.*, 2017, vol. 11, no. 3, art. 032504. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.032504>
- Zheng J., Zheng H., Pang Y., Qu B., Xu Z. Transparent broadband absorber based on a multilayer ITO conductive film. *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 3, pp. 3731–3742. <https://doi.org/10.1364/OE.482992>
- Bogatskaya A. V., Klenov N. V., Nikiforova P. M., Popov A. M., Schegolev A. E. Features of propagation and absorption of electromagnetic signals in periodic structures of conducting and dielectric layers. *Opt. Spectrosc.*, 2022, vol. 130, no. 4, pp. 481–487 (in Russian). <https://doi.org/10.21883/OS.2022.04.52259.48-21>
- Skripal A. V., Ponomarev D. V., Volshanik M. A. Resonances in microwave photonic crystals using a continuous layer of water as an interface. *Technical Physics Letters*, 2024, iss. 8, pp. 26–29. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.15.58437.19880>
- Skripal A. V., Ponomarev D. V., Volshanik M. A. Control of resonances in a one-dimensional bragg structure of the microwave range using a distilled water layer as an interface. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 398–411 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-398-411>
- Jose S. A., Cowan N., Davidson M., Godina G., Smith I., Xin J., Menezes P. L. A comprehensive review on cellulose nanofibers, nanomaterials, and composites: Manufacturing, properties, and applications. *Nanomaterials*, 2025, vol. 15, iss. 5, art. 356. <https://doi.org/10.3390/nano15050356>
- Song S., Li H., Liu P., Peng X. Applications of cellulose-based composites and their derivatives for microwave absorption and electromagnetic shielding. *Carbohydr. Polym.*, 2022, vol. 287, art. 119347. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119347>
- Chen Y., Pang L., Li Y., Luo H., Duan G., Mei C., Xu W., Zhou W., Liu K., Jiang S. Ultra-thin and highly flexible cellulose nanofiber/silver nanowire conductive paper for effective electromagnetic interference shielding. *Composites Part A*, 2020, vol. 135, art. 105960. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105960>
- Lee T. W., Lee S. E., Jeong Y. G. Highly effective electromagnetic interference shielding materials based on silver nanowire/cellulose papers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, vol. 8, iss. 20, pp. 13123–13132. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b02218>
- Wu L. P., Li Y. Z., Wang B. J., Mao Z. P., Xu H., Zhong Y., Zhang L., Sui X. Electroless Ag-plated



- sponges by tunable deposition onto cellulose-derived templates for ultra-high electromagnetic interference shielding. *Mater. Des.*, 2018, vol. 159, pp. 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.037>
22. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolyubov A. S. Determination of the metal nanometer layer thickness and semiconductor conductivity in metal-semiconductor structures from electromagnetic reflection and transmission spectra. *Technical Physics*, 2006, vol. 51, no. 5, pp. 644–649. <https://doi.org/10.1134/S1063784206050173>
23. Fan S., Yanik M. F., Wang Z., Sandhu S., Povinelli M. L. Advances in theory of photonic crystals. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 12, pp. 4493–4501. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.886061>
24. Nikitin A. A., Nikitin A. A., Ustinov A. B., Kalinikos B. A., Lähderanta E. Microwave photonic crystal on the slot transmission line with a ferroelectric film. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 6, pp. 913–918. <https://doi.org/10.1134/S106378421606013X>
25. *Agilent 85071E Materials Measurement Software. Technical Overview*. Available at: <https://hibp.ecse.rpi.edu/~connor/RF/Antenna%20Disk%20from%20Electrorent/Materials%20Measurements/85071E%20overview%205988-9472EN.pdf> (accessed December 24, 2025).

Поступила в редакцию 09.10.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025;
принята к публикации 19.12.2025; опубликована 31.03.2026

The article was submitted 09.10.2025; approved after reviewing 16.12.2025;
accepted for publication 19.12.2025; published 31.03.2026