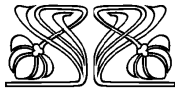
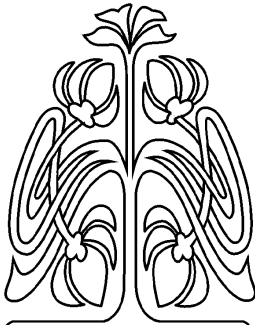




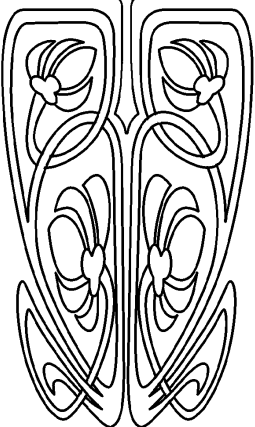
ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 398–411
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 398–411
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-398-411>, EDN: GJKOUQ

Научная статья
УДК 621.372.2



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Управление резонансами в одномерной брэгговской структуре сверхвысокочастотного диапазона при использовании в качестве интерфейса слоя дистиллированной воды

А. В. Скрипаль [✉], Д. В. Пономарев, М. А. Волшаник

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

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, 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, ponomarev87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7822-937X>, AuthorID: 561183

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

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследовано возникновение фотонных таммовских резонансов в запрещенных зонах одномерного сверхвысокочастотного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса структуры, содержащей слой дистиллированной воды, характеризующейся высоким значением действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости в трехсантиметровом диапазоне длин волн. На основании результатов компьютерного моделирования с использованием метода матрицы передачи и эксперимента доказана возможность управления фотонными резонансами Тамма с помощью изменения как толщины слоя дистиллированной воды, так и величины воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем воды. Установлено, что при увеличении толщины слоя дистиллированной воды наблюдаются осцилляции частоты и амплитуды таммовского резонанса как в первой, так и во второй запрещенной зоне одномерной брэгговской структуры сверхвысокочастотного диапазона, затухающие при большой толщине слоя воды. При этом наибольшая амплитуда таммовского резонанса достигается для каждой толщины слоя воды при определенном значении воздушного зазора.

Ключевые слова: брэгговские структуры, сверхвысокочастотный диапазон, фотонные таммовские состояния, интерфейс, слой дистиллированной воды

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 25-22-00199.

Для цитирования: Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Волшаник М. А. Управление резонансами в одномерной брэгговской структуре сверхвысокочастотного диапазона при использовании в качестве интерфейса слоя дистиллированной воды // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 398–411. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-398-411>, EDN: GJKOUQ

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



Article

Control of resonances in a one-dimensional bragg structure of the microwave range using a distilled water layer as an interface

A. V. Skripal[✉], D. V. Ponomarev, M. A. Volshanik

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

Abstract. Background and Objectives: The methods to control the characteristics of microwave devices on photonic crystals are based on the high sensitivity of resonance states in the forbidden band to the creation of volume defect in the periodic structure and the features of its interface. The appearance of surface photonic Tamm states in microwave photonic crystals adjacent to the electromagnetic radiation absorber layer can be considered as interface states. Currently, there is an increasing interest in the possibility of using structures containing polar liquids, such as water, both in the form of continuous layers and in the form of individual periodically located drops as an absorber of electromagnetic energy in microwave technology, since water in the microwave range is characterized by both a significant value of the real part of the complex permittivity and an imaginary part of the complex permittivity. At the same time, microwave absorbers based on water-containing structures, compared to more traditional materials based on layers with high electrical conductivity, have a number of advantages, such as biocompatibility, availability, ease of adjustment, optical transparency. The appearance of analogs of photonic Tamm states is also possible in the presence of an interface in the form of a polar liquid layer characterized by a positive value of the real part of the complex permittivity and a significant value of the imaginary part of the complex permittivity. When choosing a polar liquid as an absorber, it is necessary to take into account that both the real and imaginary parts of the permittivity significantly depend on the frequency of the probing microwave signal. For the appearance of photonic Tamm states in a photonic crystal with an interface in the form of a polar liquid layer, the imaginary part of the complex permittivity of which is several orders of magnitude smaller than this value for metal nanolayers, the thickness of the liquid layer should be of the same order of the wavelength of electromagnetic radiation, unlike conducting nanolayers. In this case, the electric field of the electromagnetic wave turns out to be partially localized in the liquid layer. In this regard, it is of interest to carry out theoretical and experimental research of the resonance characteristics of microwave photonic crystals associated with the effect of the appearance of photonic Tamm states in the forbidden band, depending on the parameters of the interface based on a structure containing water in the form of a continuous layer. **Materials and Methods:** To carry out the research of Tamm states, a photonic crystal consisting of alternating layers of two types of dielectrics was created. Its last layer was separated from the distilled water layer by a thin dielectric film. The distance between the film and the last layer of the photonic crystal could be adjusted. A vector network analyzer was used to measure frequency characteristics in the frequency range of 7–13 GHz. **Results:** It has been established that with an increase of thickness of the distilled water layer, oscillations of the frequency and amplitude of the Tamm resonance are observed both in the first and in the second forbidden bands of the one-dimensional microwave Bragg structure, damping at a large thickness of the water layer. In this case, the greatest amplitude of the Tamm resonance is achieved for each thickness of the water layer at a certain value of the air gap. **Conclusion:** Based on the results of computer modeling using the transfer matrix method and experiment, the possibility to control photonic Tamm resonances by changing both the thickness of the distilled water layer and the size of the air gap between the photonic crystal and the water layer has been established.

Keywords: Bragg structures, microwave range, photonic Tamm states, interface, distilled water layer

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation, Grant No. 25-22-00199.

For citation: 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>, EDN: GJKOUQ

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

Введение

В основе методов управления характеристиками СВЧ-устройств на основе фотонных кристаллов [1–6] лежит высокая чувствительность резонансных состояний в запрещенной зоне к созданию объемных нарушений периодичности брэгговской структуры (возникновение дефектных мод) [7–11] и особенностям ее интерфейса [12, 13].

В качестве интерфейсных состояний можно рассматривать возникновение поверхностных фотонных таммовских состояний в СВЧ фотонных кристаллах, граничащих со слоем поглотителя электромагнитного излучения, вы-

полненного в виде проводящего нанослоя, при определенных значениях толщин и удельных электропроводностей этого слоя, комплексная диэлектрическая проницаемость которого обладает отрицательной действительной частью и значительной величиной мнимой части относительной диэлектрической проницаемости [12, 13]. Такое интерфейсное состояние характеризуется возникновением ярко выраженного резонанса в фотонной запрещенной зоне. Отметим, что поверхностное таммовское состояние как состояние возникающее на границе фотонного кристалла и однородного слоя или слоя металло-диэлектрического нанокompозита, характеризу-



ющихся отрицательной диэлектрической проницаемостью (проводящая среда на частотах ниже плазменной), описывается в довольно большом числе работ при рассмотрении свойств фотонных кристаллов в оптическом диапазоне частот [14–24]. Поскольку характерной особенностью фотонного таммовского состояния является локализация электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вблизи интерфейса фотонного кристалла, то изменение параметров слоя фотонного кристалла, прилегающего к интерфейсу, и характеристик самого интерфейса может приводить к изменению характеристик фотонного таммовского резонанса.

В случае, когда фотонный кристалл граничит с проводящим слоем, толщина которого на много порядков меньше длины волны электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне, изменение электропроводности и толщины проводящего слоя не приводит к изменению частоты таммовского резонанса, а только к изменению его амплитуды [12, 13]. При этом управление частотой таммовского резонанса возможно только изменением структуры интерфейса, например, характеристик слоя фотонного кристалла, прилегающего к проводящему слою.

В настоящее время усилился интерес к возможности применения в микроволновой технологии в качестве поглотителя электромагнитной энергии структур, содержащих полярные жидкости, например, воду, как в виде сплошных слоев, так и в виде отдельных периодически расположенных капель [25], поскольку вода в СВЧ-диапазоне характеризуется значительной величиной как 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 слоев с высокой электропроводностью [6, 7, 26–29], обладают рядом преимуществ, таких как биосовместимость, доступность, простота настройки, оптическая прозрачность [25, 30].

Однако возникновение аналогов фотонных таммовских состояний возможно и при наличии интерфейса в виде слоя полярной жидкости, характеризующейся положительной величиной действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и значительной величиной мнимой части комплексной

диэлектрической проницаемости [31]. При выборе в качестве поглотителя полярную жидкость [32] необходимо учитывать, что как действительная, так и мнимая части диэлектрической проницаемости существенно зависят от частоты зондирующего СВЧ-сигнала. Например, в диапазоне частот от 7 до 13 GHz мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости этилового спирта не превышает 5 единиц, в то время как для воды эта величина принимает значения от 25 до 35 единиц.

Для возникновения фотонных таммовских состояний в фотонном кристалле с интерфейсом в виде слоя полярной жидкости, мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости которой на несколько порядков меньше этой величины для металлических нанослоев, толщина слоя жидкости должна быть одного порядка с длиной волны электромагнитного излучения в отличие от проводящих нанослоев. В этом случае электрическое поле электромагнитной волны оказывается частично локализованным и в слое жидкости.

В связи с этим представляет интерес теоретическое и экспериментальное исследование резонансных характеристик сверхвысокочастотных фотонных кристаллов, связанных с эффектом возникновения фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне, в зависимости от параметров интерфейса на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя.

1. Компьютерное моделирование управления характеристиками таммовских резонансов

В диапазоне частот 7–13 GHz 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). 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 нм. Дополнительно между пленкой и последним слоем фотонного кристалла создавался воздушный зазор, толщина L которого регулировалась (рис. 1).

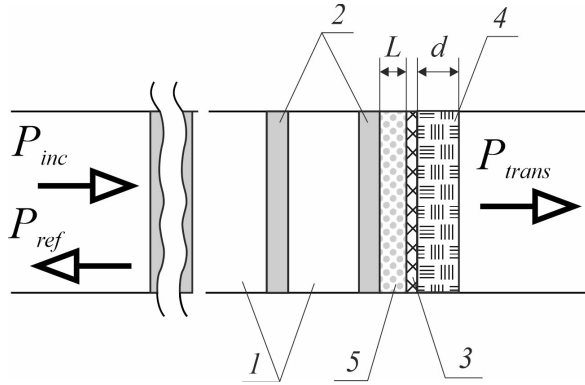


Рис. 1. Конструкция одномерного СВЧ фотонного кристалла с поглотителем электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя, в качестве интерфейса: 1 – слой тefлона, 2 – слой Al_2O_3 , 3 – пленка тefлона, 4 – слой дистиллированной воды, 5 – воздушный зазор

Fig. 1. Design of a one-dimensional microwave photonic crystal with an interface layer as microwave electromagnetic radiation absorber based on a water-containing structure in the form of a continuous layer: 1 – Teflon layer, 2 – Al_2O_3 layer, 3 – Teflon film, 4 – distilled water layer, 5 – air gap

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и коэффициента прохождения $S_{21}(f)$ электромагнитной волны использовалась матрица передачи слоистой структуры с различными значениями постоянной распространения электромагнитных волн γ_i и γ_{i+1} при учете распространения в волноводе только волны основного типа H_{10} [1, 33–35]:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j) z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j) z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j) z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j) z_{j,j+1}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

которая связывает коэффициенты A_j , B_j и A_{j+1} , B_{j+1} , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы $z_{j,j+1}$, соотношением

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}. \quad (2)$$

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

$$S_{11} = -\frac{\mathbf{T}[2,1]}{\mathbf{T}[2,2]}, \quad S_{21} = \frac{\mathbf{T}[1,1]\mathbf{T}[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2]\mathbf{T}[2,1]}{\mathbf{T}[2,2]}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}[1,1] & \mathbf{T}[1,2] \\ \mathbf{T}[2,1] & \mathbf{T}[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}) \quad (4)$$

– матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев.

Постоянные распространения электромагнитной волны γ_0 , γ_d , $\gamma_{\text{жид}}$ соответственно в пустом волноводе, в диэлектрических слоях и в слое полярной жидкости, полностью заполняющих волновод по поперечному сечению, были рассчитаны с использованием выражений:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{\text{жид}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_{\text{жид}}^* \epsilon_0 \mu_0}, \quad (5)$$

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

Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(f)$ дистиллированной воды определялась на основе модели двухчастотной дебаевской релаксации [32, 36–40]:

$$\epsilon^*(f) = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon_1}{1 + i2\pi f\tau_1} + \frac{\Delta\epsilon_3}{1 + i2\pi f\tau_3}, \quad (6)$$

где $\epsilon_\infty = 3.96$ – оптическая диэлектрическая проницаемость, $\Delta\epsilon_1 = 72.15$ и $\Delta\epsilon_3 = 2.14$ – амплитуды релаксации, $\tau_1 = 8.32$ пс и $\tau_3 = 0.39$ пс – времена релаксации [32].

Для выяснения особенностей проявления и возможности управления фотонными таммовскими резонансами в структуре одномерного СВЧ фотонного кристалла с интерфейсом в виде поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона на основе структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя (см. рис. 1), был выполнен расчет коэффициента прохождения и отражения в диапазоне частот 7–13 GHz.



Как следует из результатов расчета, на АЧХ фотонных кристаллов как в первой, так и во второй запрещенных зонах на частотах f_{Tamm1} и f_{Tamm2} возникают таммовские резонансы, положение которых зависит от толщины слоя дистиллированной воды (рис. 2, а, б).

При увеличении толщины слоя дистиллированной воды наблюдается монотонное уменьшение частоты f_{Tamm1} таммовского резонанса в первой запрещенной зоне в диапазоне толщин 0–2.0 мм (см. рис. 3, а) и частоты f_{Tamm2} во второй запрещенной зоне в диапазоне толщин 0–1.2 мм

(см. рис. 3, б). Дальнейшее увеличение слоя воды приводит к затухающим осцилляциям частоты таммовского резонанса.

Изменение амплитуд коэффициентов отражения таммовского резонанса $S_{11\text{Tamm1}}$ в первой и $S_{11\text{Tamm2}}$ во второй запрещенных зонах с увеличением толщины слоя воды представлены на рис. 4. Как следует из представленных результатов, с увеличением толщины d слоя воды наблюдаются осцилляции амплитуды таммовских резонансов, затухающие при большой толщине слоя воды. При этом осцилляции амплитуды там-

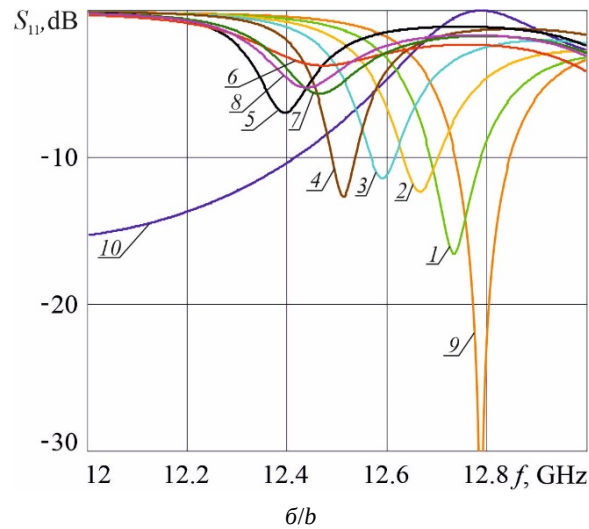
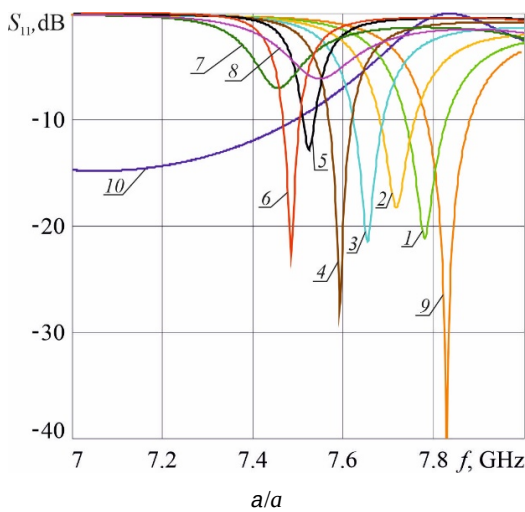


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды различной толщины d , мм: 1 – 0.04, 2 – 0.1, 3 – 0.2, 4 – 0.4, 5 – 1.0, 6 – 1.5, 7 – 2.0, 8 – 2.5, 9 и 10 (S_{21}) – при отсутствии слоя воды; $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 2. Frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) forbidden bands of an 11-layer photonic crystal using as an interface of microwave electromagnetic radiation in the form of a distilled water layer of different thickness d , mm: 1 – 0.04, 2 – 0.1, 3 – 0.2, 4 – 0.4, 5 – 1.0, 6 – 1.5, 7 – 2.0, 8 – 2.5, 9 and 10 (S_{21}) – without the water layer; $L = 0.0$ mm (color online)

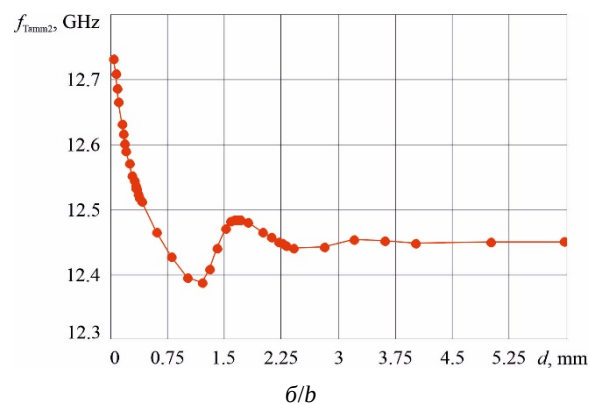
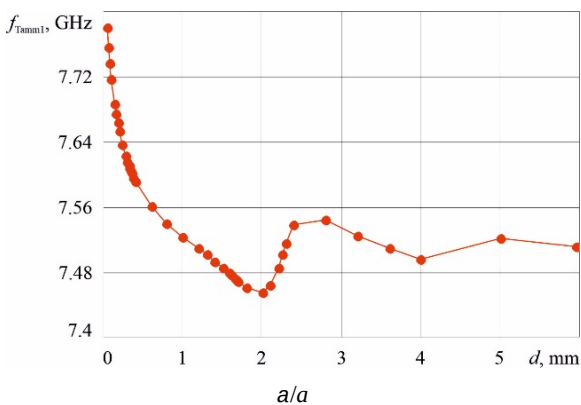


Рис. 3. Зависимости частоты таммовского резонанса f_{Tamm1} в первой (а) и f_{Tamm2} во второй (б) запрещенных зонах от толщины d слоя воды. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 3. Dependences of the Tamm resonance frequency f_{Tamm1} in the first (a) and f_{Tamm2} in the second (b) forbidden bands on the thickness d of the water layer. $L = 0.0$ mm (color online)



мовских резонансов во второй запрещенной зоне значительно меньше.

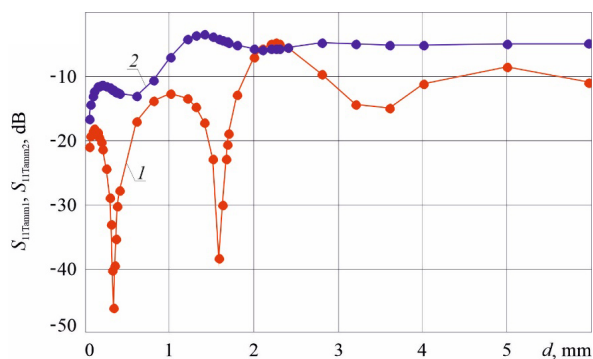
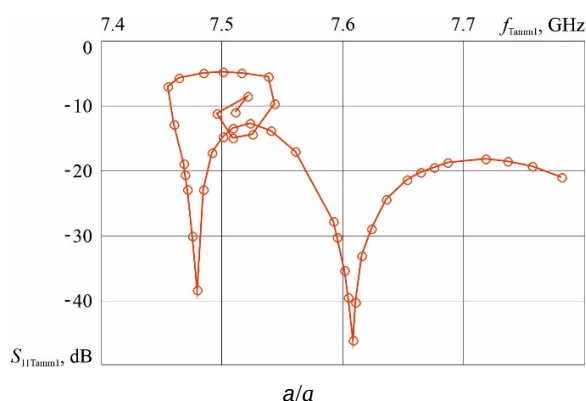


Рис. 4. Зависимости амплитуд коэффициентов отражения таммовского резонанса $S_{11Tamm1}$ в первой и $S_{11Tamm2}$ во второй запрещенных зонах от толщины d слоя воды. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependences of the amplitudes of the reflection coefficients of the Tamm resonance $S_{11Tamm1}$ in the first and $S_{11Tamm2}$ in the second forbidden bands on the thickness d of the water layer. $L = 0.0$ mm (color online)

Особенности характеристик фотонных таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах фотонного кристалла в зависимости от толщины слоя воды могут быть представлены в виде диаграммы в координатах амплитуда (S_{11Tamm}) – частота (f_{Tamm}) (рис. 5, а, б), которая может быть названа «фазовым портретом таммовского резонанса». При этом каждая точка диаграммы соответствует определенной толщине d слоя воды.

Управление частотой и амплитудой таммовских резонансов достигалось изменением структуры интерфейса: созданием воздушного зазора



между тефлоновой пленкой и последним слоем фотонного кристалла.

Как следует из результатов расчета АЧХ фотонного кристалла, представленных на рис. 6, а, б, 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 как в первой, так и во второй запрещенных зонах (сдвиг частоты во второй запрещенной зоне более чем в два раза превосходит аналогичный сдвиг в первой запрещенной зоне).

Изменение частоты и амплитуды таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах с увеличением воздушного зазора между пленкой и последним слоем фотонного кристалла представлены на рис. 7 и 8. Как следует из представленных результатов (см. рис. 7, а, б), с увеличением величины воздушного зазора наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах. При этом в первой запрещенной зоне эта зависимость в диапазоне зазоров от 0 до 4.5 мм является линейной.

В то же время амплитуды таммовских резонансов с увеличением воздушного зазора изменяются немонотонно как в первой, так и во второй запрещенных зонах (см. рис. 8), что свидетельствует о возможности регулировки глубины таммовского резонанса изменением величины L воздушного зазора при фиксированной толщине d слоя воды.

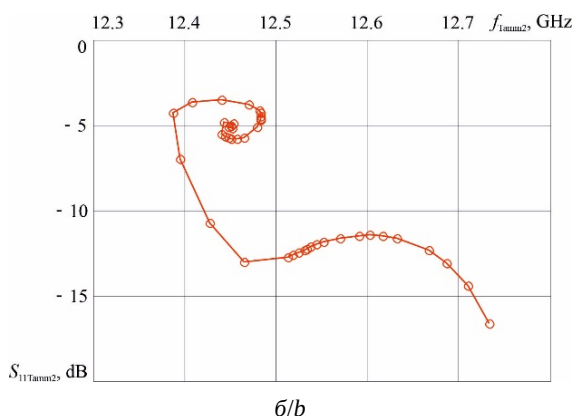


Рис. 5. Диаграмма амплитуда – частота таммовского резонанса $S_{11Tamm1}$, f_{Tamm1} в первой (а) и $S_{11Tamm2}$, f_{Tamm2} во второй (б) запрещенных зонах фотонного кристалла, каждая точка которой соответствует определенной толщине d слоя воды. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 5. Amplitude – frequency diagram of the Tamm resonance $S_{11Tamm1}$, f_{Tamm1} in the first (a) and $S_{11Tamm2}$, f_{Tamm2} in the second (b) forbidden bands of the photonic crystal, each point of which corresponds to a certain thickness d of the water layer. $L = 0.0$ mm (color online)

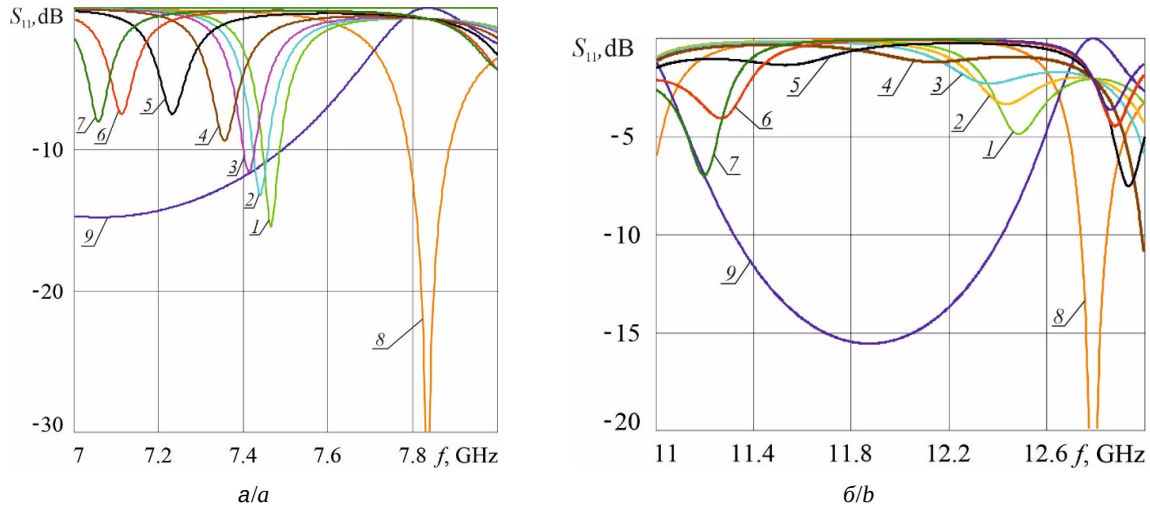


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды толщиной $d = 1.75$ мм при 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 и 9 (S_{21}) – при отсутствии слоя воды (цвет онлайн)
Fig. 6. Frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) forbidden bands of an 11-layer photonic crystal when using as an interface an absorber of electromagnetic radiation of the microwave range in the form of a distilled water layer with the thickness $d = 1.75$ mm at 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 and 9 (S_{21}) – without the water layer (color online)

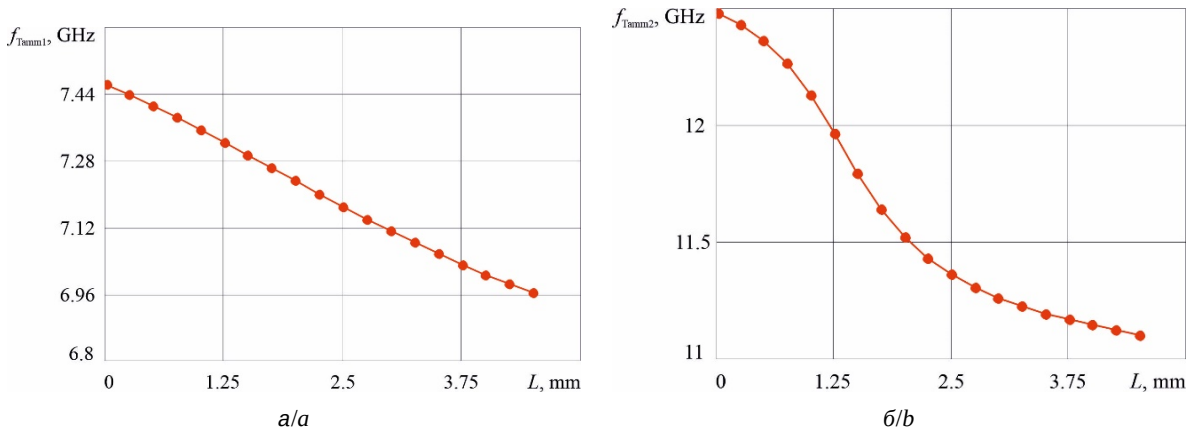


Рис. 7. Зависимости частоты таммовского резонанса f_{Tamm1} в первой (а) и f_{Tamm2} во второй (б) запрещенных зонах от величины L воздушного зазора между пленкой и последним слоем фотонного кристалла. $d = 1.75$ мм (цвет онлайн)
Fig. 7. Dependences of the Tamm resonance frequency f_{Tamm1} in the first (a) and f_{Tamm2} in the second (b) forbidden bands on the value L of the air gap between the film and the last layer of the photonic crystal. $d = 1.75$ mm (color online)

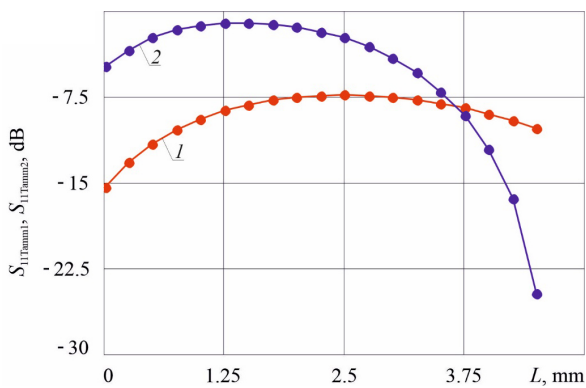


Рис. 8. Зависимости амплитуд коэффициентов отражения таммовского резонанса $S_{11Tamm1}$ в первой и $S_{11Tamm2}$ во второй запрещенных зонах от величины L воздушного зазора между пленкой и последним слоем фотонного кристалла. $d = 1.75$ мм
Fig. 8. Dependences of the amplitudes of the reflection coefficients of the Tamm resonance $S_{11Tamm1}$ in the first and $S_{11Tamm2}$ in the second forbidden band on the value L of the air gap between the film and the last layer of the photonic crystal. $d = 1.75$ мм



Особенности характеристик фотонных таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах фотонного кристалла в зависимости от величины воздушного зазора могут быть представлены в виде диаграммы в координатах амплитуда – частота (рис. 9, а, б), которая может быть названа «фазовым портретом таммовского резонанса». При этом каждая точка диаграммы соответствует определенной величине L воздушного зазора.

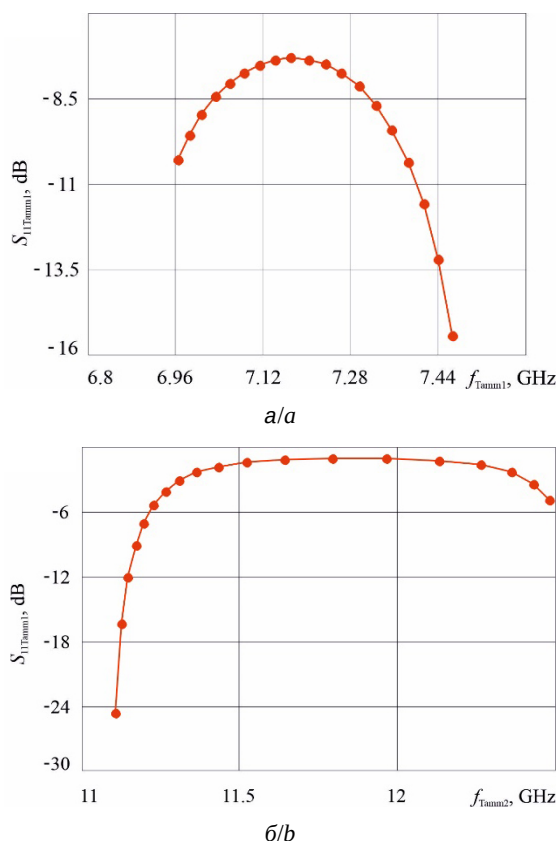


Рис. 9. Диаграмма амплитуда – частота таммовского резонанса $S_{11Tamm1}$, f_{Tamm1} в первой (а) и $S_{11Tamm2}$, f_{Tamm2} во второй (б) запрещенных зонах фотонного кристалла, каждая точка которой соответствует определенной величине L воздушного зазора. $d = 1.75$ мм (цвет онлайн)

Fig. 9. Amplitude – frequency diagram of the Tamm resonance $S_{11Tamm1}$, f_{Tamm1} in the first (a) and $S_{11Tamm2}$, f_{Tamm2} in the second (b) forbidden bands of the photonic crystal, each point of which corresponds to a certain value L of the air gap. $d = 1.75$ mm (color online)

2. Результаты экспериментальных исследований

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 (Keysight Technologies, США) 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. 10, а, б).

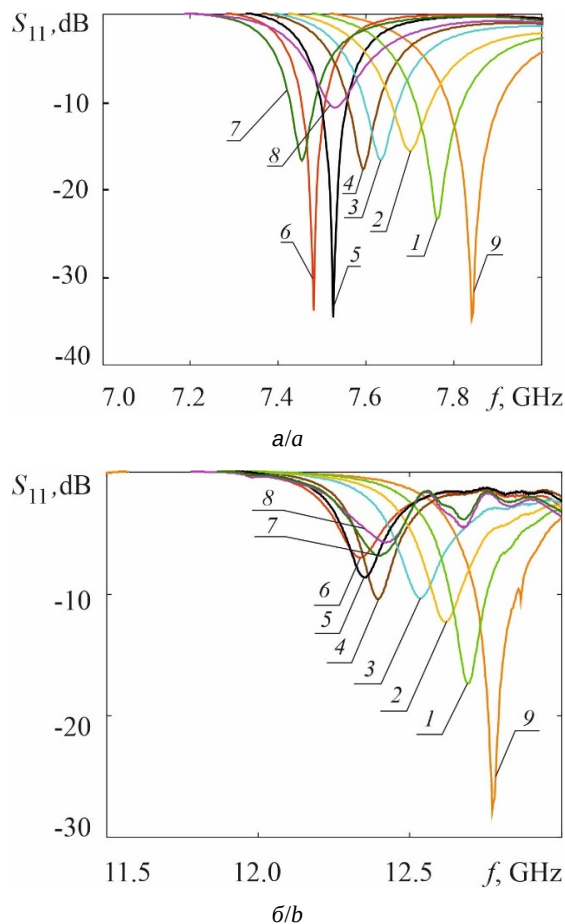


Рис. 10. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды различной толщины d , мм: 1 – 0.06, 2 – 0.15, 3 – 0.3, 4 – 0.6, 5 – 1.0, 6 – 1.2, 7 – 1.74, 8 – 3.05, 9 – при отсутствии слоя воды; $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 10. Experimental frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) forbidden bands of an 11-layer photonic crystal using as an interface an absorber of microwave electromagnetic radiation in the form of a distilled water layer of different thickness d , mm: 1 – 0.06, 2 – 0.15, 3 – 0.3, 4 – 0.6, 5 – 1.0, 6 – 1.2, 7 – 1.74, 8 – 3.05, 9 – without the water layer; $L = 0.0$ mm (color online)

Как следует из результатов эксперимента, при увеличении толщины слоя дистиллированной воды наблюдается монотонное уменьшение



частоты таммовского резонанса как в первой запрещенной зоне в диапазоне толщин 0–1.7 мм (рис. 11, а), так и во второй запрещенной зоне в диапазоне толщин 0–1.2 мм (рис. 11, б). Дальнейшее увеличение слоя воды приводит к затухающим осцилляциям частоты таммовского резонанса.

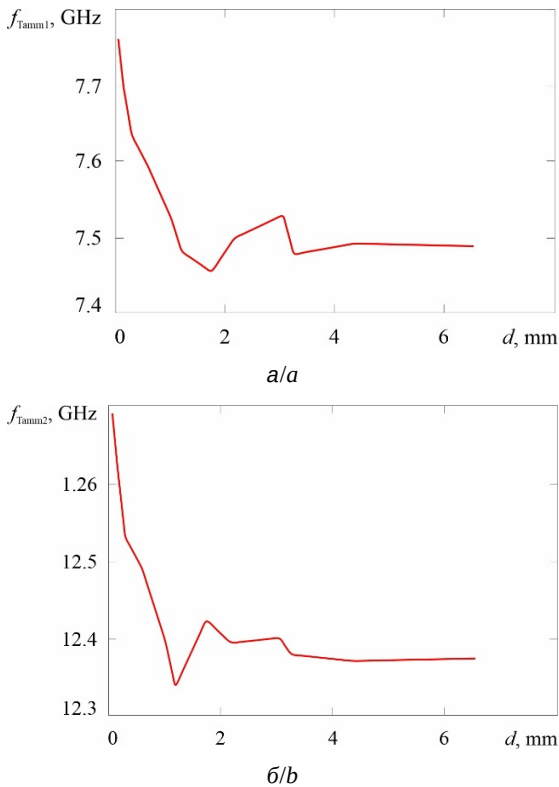


Рис. 11. Зависимости частоты таммовского резонанса f_{Tamm1} в первой (а) и f_{Tamm2} во второй (б) запрещенных зонах от толщины d слоя воды. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 11. Dependences of the Tamm resonance frequency f_{Tamm1} in the first (a) and f_{Tamm2} in the second (b) forbidden bands on the thickness d of the water layer. $L = 0.0$ mm (color online)

Изменение амплитуды таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах с увеличением толщины слоя воды представлены на рис. 12.

Как следует из представленных результатов, с увеличением толщины d слоя воды наблюдаются осцилляции амплитуды таммовских резонансов, затухающие при большой толщине слоя воды. При этом в первой запрещенной зоне наблюдается значительное изменение амплитуды таммовского резонанса. При больших толщинах слоя воды частоты и амплитуды таммовских резонансов стремятся к своим предельным значениям.

Управление частотой и амплитудой таммовских резонансов, основываясь на результатах

компьютерного моделирования, достигалось изменением структуры интерфейса: созданием воздушного зазора между тефлоновой пленкой и последним слоем фотонного кристалла.

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.

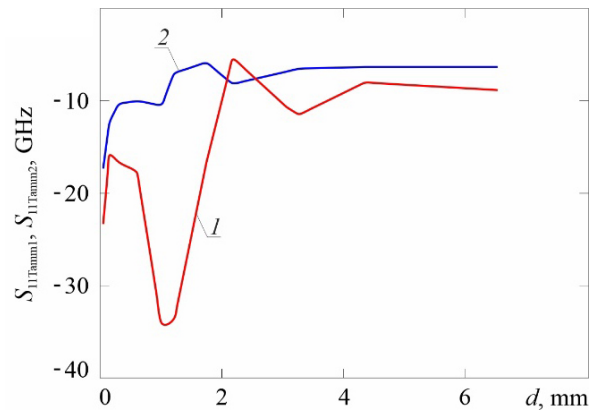


Рис. 12. Зависимости амплитуд коэффициентов отражения таммовского резонанса $S_{11\text{Tamm1}}$ в первой и $S_{11\text{Tamm2}}$ во второй запрещенных зонах от толщины d слоя воды. $L = 0.0$ мм (цвет онлайн)

Fig. 12. Dependences of the amplitudes of the Tamm resonance reflection coefficients $S_{11\text{Tamm1}}$ in the first and $S_{11\text{Tamm2}}$ in the second forbidden bands on the thickness d of the water layer. $L = 0.0$ mm (color online)

Увеличение воздушного зазора между пленкой и последним слоем фотонного кристалла при фиксированной толщине слоя воды, как это следует из результатов измерения частотных зависимостей коэффициента отражения S_{11} , представленных на рис. 13, 14 приводит к смещению частоты таммовского резонанса в область более низких значений как в первой, так и во второй запрещенных зонах, что согласуется с результатами расчета.

Из анализа результатов эксперимента, представленных на рис. 13 и рис. 14, также следует, что регулировка величины воздушного зазора позволяет управлять амплитудой таммовских резонансов. При этом для каждой фиксированной толщины слоя воды для достижения максимальной амплитуды таммовского резонанса следует выбрать определенную величину воздушного зазора.

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты компьютерного моделирования фотонных таммовских резонансов в одномерной брэгговской структуре СВЧ-диапазона

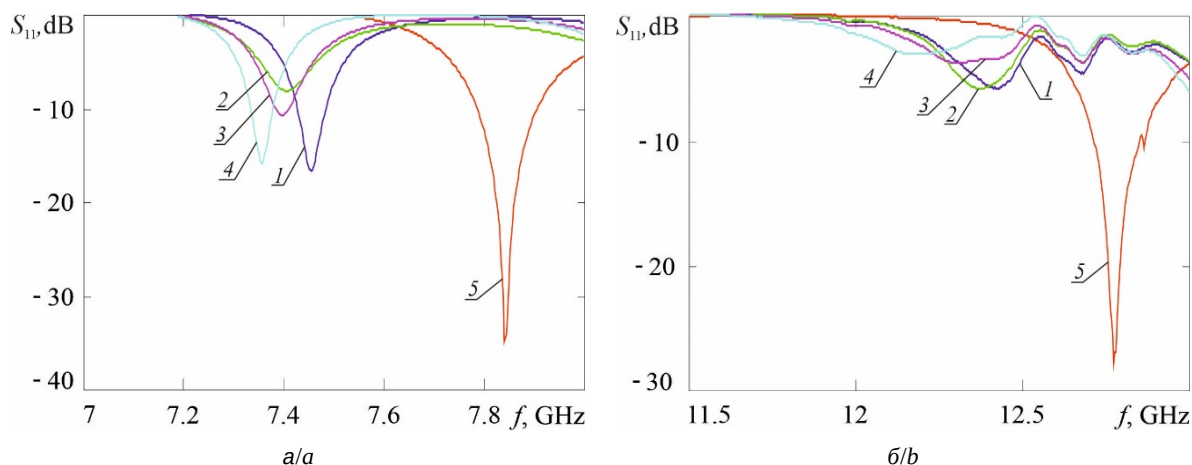


Рис. 13. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды толщиной $d = 1.75$ мм при различных значениях воздушного зазора L , мм: 1 – 0, 2 – 0.27, 3 – 0.47, 4 – 0.98, 5 – при отсутствии слоя воды (цвет онлайн)

Fig. 13. Experimental frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) forbidden zones of an 11-layer photonic crystal when using as an interface an absorber of electromagnetic radiation of the microwave range in the form of a distilled water layer with a the thickness $d = 1.75$ mm at different values of the air gap L , mm: 1 – 0, 2 – 0.27, 3 – 0.47, 4 – 0.98, 5 – without the water layer (color online)

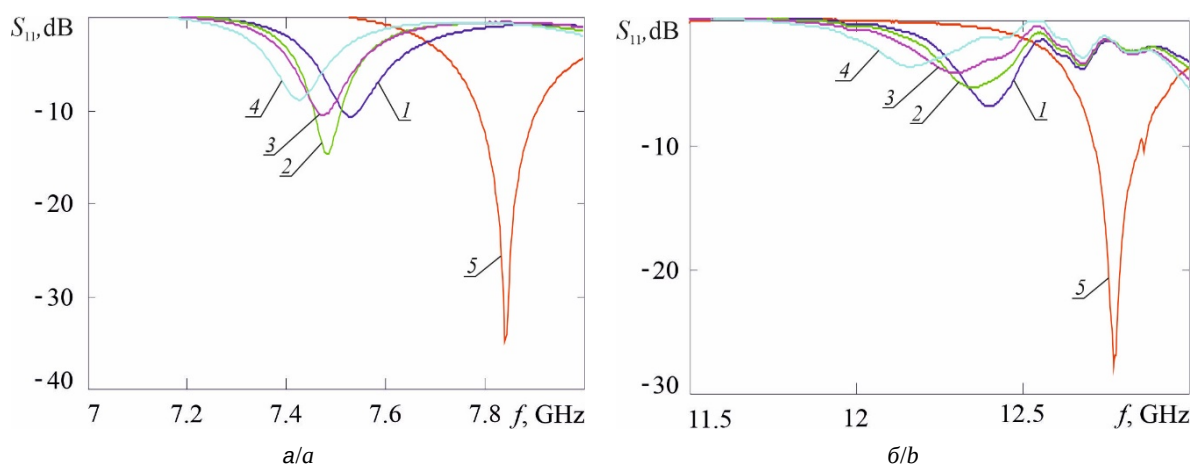


Рис. 14. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} в первой (а) и второй (б) запрещенных зонах 11-слойного фотонного кристалла при использовании в качестве интерфейса поглотителя электромагнитного излучения микроволнового диапазона в виде слоя дистиллированной воды толщиной $d = 3.05$ мм при различных значениях воздушного зазора L , мм: 1 – 0, 2 – 0.27, 3 – 0.47, 4 – 0.98, 5 – при отсутствии слоя воды (цвет онлайн)

Fig. 14. Experimental frequency dependences of the reflection coefficient S_{11} in the first (a) and second (b) forbidden bands of an 11-layer photonic crystal when using as an interface an absorber of electromagnetic radiation of the microwave range in the form of a distilled water layer with the thickness $d = 3.05$ mm at different values of the air gap L , mm: 1 – 0, 2 – 0.27, 3 – 0.47, 4 – 0.98, 5 – without the water layer (color online)

при использовании в качестве интерфейса слоя дистиллированной воды.

Заключение

Рассмотрены особенности возникновения фотонных таммовских резонансов в запрещенных зонах одномерной брэгговской структуры СВЧ-диапазона при использовании в качестве

интерфейса структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя.

Выполнен расчет с использованием метода матрицы передачи характеристик таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах при изменении толщины слоя дистиллированной воды и структуры интерфейса.

Показано, что амплитуда и частота таммовских резонансов регулируется как толщиной слоя



жидкости, так и толщиной воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем дистиллированной водой. Последнее обеспечивает достижение высокой чувствительности таммовского резонанса к изменению толщины слоя полярной жидкости.

Установлено, что увеличение толщины слоя дистиллированной воды приводит к затухающим осцилляциям частоты и амплитуды таммовского резонанса. С увеличением воздушного зазора наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах. При этом в первой запрещенной зоне эта зависимость в диапазоне величин зазоров от 0 до 4.5 мм является линейной.

Экспериментальные данные подтверждают результаты расчетов и демонстрируют эффект возникновения фотонных таммовских состояний в запрещенной зоне при использовании в качестве интерфейса структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя.

Полученные результаты могут быть использованы, в частности, как при конструировании узкополосных перестраиваемых СВЧ-фильтров на отражение и СВЧ-аттенюаторов на основе фотонных кристаллов, использующих в качестве поглотителя слой воды, так и характеристики метаструктур, содержащих включения воды в виде сплошного слоя.

Список литературы

1. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V. One-dimensional microwave photonic crystals: New applications. Boca Raton, FL, USA : CRC Press ; Taylor Francis Group, 2019. 154 p. <https://doi.org/10.1201/9780429276231>
2. Беляев Б. А., Ходенков С. А., Галеев Р. Г., Шабанов В. Ф. Фильтр нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 27–32. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485127-32>
3. Беляев Б. А., Ходенков С. А., Шабанов В. Ф. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 4. С. 400–404. <https://doi.org/10.7868/S086956521610008X>
4. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // PIER. 2003. Vol. 41. P. 185–209. <https://doi.org/10.2528/pier02010808>
5. Fernandes H. C. C., Medeiros J. L. G., Junior I. M. A., Brito D. Photonic crystal at millimeter waves applications // PIERS Online. 2007. Vol. 3, № 5. P. 689–694. <https://doi.org/10.2529/PIERS060901105337>
6. Усанов Д. А., Мещанов В. П., Скрипаль А. В., Попова Н. Ф., Пономарев Д. В., Мерданов М. К. Согласованные нагрузки сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на СВЧ фотонных кристаллах // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, вып. 2. С. 216–220. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.02.44128.1794>
7. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Мерданов М. К., Евтеев С. Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми p-i-p-i-p-диодами характеристиками // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 1. С. 65–71. <https://doi.org/10.7868/S0033849417010090>
8. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Рузанов О. М., Тимофеев И. О. Использование СВЧ коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 5. С. 495–503. <https://doi.org/10.31857/S0033849420040099>
9. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Латышева Е. В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 45–53. <https://doi.org/10.7868/S0033849416010137>
10. Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Шаронов В. Е. Резонансные характеристики сверхвысокочастотных фотонных кристаллов с включениями в виде проводящих нанослоев // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49, вып. 19. С. 27–30. <https://doi.org/10.61011/PJTf.2023.19.56269.19645>
11. Фархутдинов Р. В., Насыбуллин А. Р., Морозов О. Г., Вазиев Т. О., Ишкаев Т. М., Садчиков В. В. Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном волноводе как датчик контроля диэлектрических параметров жидких сред // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 4–2. С. 114–120. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.114-120>
12. 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. P. 5115–5122. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3021412>
13. Skripal Al. 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. P. 123–130. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130>
14. Vinogradov A. P., Dorofeenko A. V., Erokhin S. G., Inoue M., Lisyansky A. A. Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74, № 4. P. 045128 (1–8). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.045128>
15. Виноградов А. П., Дорофеев А. В., Мерзликин А. М., Лисьянский А. А. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах // УФН. 2010. Т. 180, № 3. С. 249–263. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201003b.0249>



16. Belozorov D. P., Girich A. A., Nedukh S. V., Moskaltsova A. N., Tarapov S. I. Microwave analogue of Tamm states in periodic chain-like structures // *PIER Letters*. 2014. Vol. 46. P. 7–12. <https://doi.org/10.2528/PIERL13122502>
17. Goto T., Dorofeenko A. V., Merzlikin A. M., Baryshev A. V., Vinogradov A. P., Inoue M., Lisyansky A. A., Granovsky A. B. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101, iss. 11. P. 113902 (1–3). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.113902>
18. Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R. A., Chamberlain J. M., Kavokin A. V., Shelykh I. A. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror // *Phys. Rev. B*. 2007. Vol. 76, iss. 16. P. 165415 (1–5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.165415>
19. Sasin M. E., Seisyan R. P., Kaliteevski M. A., Brand S., Abram R. A., Chamberlain J. M., Egorov A. Yu., Vasilev A. P., Mikhlin V. S., Kavokin A. V. Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92, iss. 25. P. 251112 (1–3). <https://doi.org/10.1063/1.2952486>
20. Brand S., Kaliteevski M. A., Abram R. A. Optical Tamm states above the bulk plasma frequency at a Bragg stack/metal interface // *Phys. Rev. B*. 2009. Vol. 79, iss. 8. P. 085416 (1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.085416>
21. Beletskii N. N., Borysenko S. A. On the spectrum of electromagnetic waves in one-dimensional defective photon crystal bordering on conducting medium // *Radio Physics and Electronics*. 2016. Vol. 7, iss. 16. P. 1457–1465. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i16.40>
22. Bikbaev R. G., Vetrov S. Ya., Timofeev I. V. The optical Tamm states at the interface between a photonic crystal and nanoporous silver // *J. Opt.* 2017. Vol. 19, iss. 1. P. 015104 (1–6). <https://doi.org/10.1088/2040-8986/19/1/015104>
23. Pankin P. S., Vetrov S. Ya., Timofeev I. V. Hybrid states formed by the optical Tamm and defect modes in a one-dimensional photonic crystal // *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. Shanghai, China, 2016. P. 4571–4574. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735688>
24. Fang Y., Chen L., Zhu N., Zhou J. Tamm states of one-dimensional metal-dielectric photonic crystal // *IET Optoelectronics*. 2013. Vol. 7, iss. 1. P. 9–13. <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2012.0064>
25. 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, № 4. P. 1461–1479. <https://doi.org/10.1364/OME.455723>
26. Fan He, Kaixuan Si, Dace Zha, Rui Li, Yulu Zhang, Jianxiong Dong, Ling Miao, Shaowei Bie, Jianjun Jiang. 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. P. 1290–1294. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3050184>
27. 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, № 3. P. 032504 (1–19). <https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.032504>
28. 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, № 3. P. 3731–3742. <https://doi.org/10.1364/OE.482992>
29. Богацкая А. В., Кленов Н. В., Никифорова П. М., Попов А. М., Щеголев А. Е. Особенности распространения и поглощения электромагнитных сигналов в периодических структурах из проводящих и диэлектрических слоев // *Оптика и спектроскопия*. 2022. Т. 130, вып. 4. С. 481–487. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.04.52259.48-21>
30. 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, № 1. P. 14018 (1–8). <https://doi.org/10.1038/srep14018>
31. Скрипаль Ал. В., Пономарев Д. В., Волианик М. А. Резонансы в фотонных кристаллах сверхвысококачественного диапазона при использовании в качестве интерфейса структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя // *Письма в ЖТФ*. 2024. Т. 50, вып. 15. С. 30–33. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.15.58437.19880>
32. Sato T., Buchner R. Dielectric Relaxation Processes in Ethanol/ Water Mixtures // *J. Phys. Chem. A*. 2004. Vol. 108, iss. 23. P. 5007–5015. <https://doi.org/10.1021/jp035255o>
33. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // *ЖТФ*. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112–117. <https://doi.org/10.1134/S1063784206050173>
34. 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, № 12. P. 4493–4501. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.886061>
35. Никитин Ал. А., Никитин Ан. А., Устинов А. Б., Lahderanta E., Калиникос Б. А. Сверхвысококачественный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой // *ЖТФ*. 2016. Т. 86, вып. 6. С. 115–120. <https://doi.org/10.1134/S106378421606013X>
36. 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, № 9. P. 1836–1849. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888>
37. Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Шарков Е. А., Сазонов Д. С., Пашинов Е. В., Ашеко А. А., Батулин С. А. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий. М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2013. 60 с.



38. Бордонский Г. С., Гурулева А. А., Орлов А. О. Диэлектрическая проницаемость глубоко переохлажденной воды по данным измерений на частотах 7.6 и 9.7 ГГц // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 3. 259–267. <https://doi.org/10.31857/S0033849422030044>
39. Zhu Y., Yang H. Defective microwave photonic crystals for salinity detection // Coatings. 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 1243 (1–13). <https://doi.org/10.3390/coatings11101243>
40. Богатин А. С. Релаксационные поляризации: сильные и слабые процессы // Физика твердого тела. 2012. Т. 54, вып. 1. С. 59–65. <https://doi.org/10.1134/S1063783412010064>
- ## References
1. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V. *One-dimensional microwave photonic crystals: New applications*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, Taylor Francis Group, 2019. 154 p. <https://doi.org/10.1201/9780429276231>
 2. Belyaev B. A., Shabanov V. F., Khodenkov S. A., Galeev R. G. A lowpass filter based on a 2d microstrip electromagnetic crystal. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 85–89. <https://doi.org/10.1134/S1028335819030017>
 3. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Shabanov V. F. Investigation of frequency-selective devices based on a microstrip 2D photonic crystal. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 155–159. <https://doi.org/10.1134/S1028335816040017>
 4. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals. *PIER*, 2003, vol. 41, pp. 185–209. <https://doi.org/10.2528/pier02010808>
 5. Fernandes H. C. C., Medeiros J. L. G., Junior I. M. A., Brito D. Photonic crystal at millimeter waves applications. *PIERS Online*, 2007, vol. 3, no. 5, pp. 689–694. <https://doi.org/10.2529/PIERS060901105337>
 6. Usanov D. A., Skripal' A. V., Ponomarev D. V., Merdanov M. K. A matched load based on Bragg structures for the THz-frequency range. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, no. 3, pp. 210–212. <https://doi.org/10.1134/S1063785018030124>
 7. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal' A. V., Merdanov M. K., Evteev S. G. Waveguide photonic crystals on resonant irises with characteristics controlled by n–i–p–i–n–diodes. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 58–63. <https://doi.org/10.1134/S1064226918010138>
 8. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal' A. V., Ponomarev D. V., Ruzanov O. M., Timofeev I. O. Application of a microwave coaxial Bragg structure for the measurement of parameters of insulators. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, vol. 65, no. 5, pp. 541–548. <https://doi.org/10.1134/S1064226920040087>
 9. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal' A. V., Ponomarev D. V., Latysheva E. V. Multiparametric measurements of epitaxial semiconductor structures with the use of one-dimensional microwave photonic crystals. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 1, pp. 42–49. <https://doi.org/10.1134/S1064226916010125>
 10. Skripal A. V., Ponomarev D. V., Sharonov V. E. Resonance characteristics of microwave photonic crystals with inclusions in the form of conducting nanolayers. *Technical Physics Letters*, 2023, vol. 49, no. 10, pp. 23–26. <https://doi.org/10.61011/TPL.2023.10.57051.19645>
 11. Farkhutdinov R. V., Nasybulin A. R., Morozov O. G., Vaziev T. O., Ishkaev T. M., Sadchikov V. V. Bragg microwave structure in a coaxial waveguide as a sensor for monitoring the dielectric parameters of liquid media. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2019, vol. 22, no. 4–2, pp. 114–120 (in Russian). <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.114-120>
 12. 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>
 13. Skripal Al. 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. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130>
 14. Vinogradov A. P., Dorofeenko A. V., Erokhin S. G., Inoue M., Lisyansky A. A. Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces. *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 74, no. 4, pp. 045128 (1–8). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.045128>
 15. Vinogradov A. P., Dorofeenko A. V., Merzlikin A. M., Lisyansky A. A. Surface states in photonic crystals. *Phys. Usp.*, 2010, vol. 53, iss. 3, pp. 243–256. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201003b.0249>
 16. Belozorov D. P., Girich A. A., Nedukh S. V., Moskaltsova A. N., Tarapov S. I. Microwave analogue of Tamm states in periodic chain-like structures. *PIER Letters*, 2014, vol. 46, pp. 7–12. <https://doi.org/10.2528/PIERL13122502>
 17. Goto T., Dorofeenko A. V., Merzlikin A. M., Baryshev A. V., Vinogradov A. P., Inoue M., Lisyansky A. A., Granovsky A. B. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, iss. 11, pp. 113902 (1–3). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.113902>
 18. Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R. A., Chamberlain J. M., Kavokin A. V., Shelykh I. A. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror. *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 76, iss. 16, pp. 165415 (1–5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.165415>
 19. Sasin M. E., Seisyan R. P., Kaliteevski M. A., Brand S., Abram R. A., Chamberlain J. M., Egorov A. Yu., Vasilev A. P., Mikhlin V. S., Kavokin A. V. Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, iss. 25, pp. 251112 (1–3). <https://doi.org/10.1063/1.2952486>
 20. Brand S., Kaliteevski M. A., Abram R. A. Optical Tamm states above the bulk plasma frequency at a Bragg stack/metal interface. *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 79, iss. 8,



- pp. 085416 (1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.085416>
21. Beletskii N. N., Borysenko S. A. On the spectrum of electromagnetic waves in one-dimensional defective photon crystal bordering on conducting medium. *Radio Physics and Electronics*, 2016, vol. 7, iss. 16, pp. 1457–1465. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i16.40>
 22. Bikbaev R. G., Vetrov S. Ya., Timofeev I. V. The optical Tamm states at the interface between a photonic crystal and nanoporous silver. *J. Opt.*, 2017, vol. 19, iss. 1, pp. 015104 (1–6). <https://doi.org/10.1088/2040-8986/19/1/015104>
 23. Pankin P. S., Vetrov S. Ya., Timofeev I. V. Hybrid states formed by the optical Tamm and defect modes in a one-dimensional photonic crystal. In: *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. Shanghai, China, 2016, pp. 4571–4574. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735688>
 24. Fang Y., Chen L., Zhu N., Zhou J. Tamm states of one-dimensional metal-dielectric photonic crystal. *IET Optoelectronics*, 2013, vol. 7, iss. 1, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2012.0064>
 25. 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>
 26. Fan He, Kaixuan Si, Dace Zha, Rui Li, Yulu Zhang, Jianxiong Dong, Ling Miao, Shaowei Bie, Jianjun Jiang. 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>
 27. 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, pp. 032504 (1–19). <https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.032504>
 28. 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>
 29. 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. *Optics and Spectroscopy*, 2022, vol. 130, iss. 4, pp. 379–384. <https://doi.org/10.21883/EOS.2022.04.53722.48-21>
 30. 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, pp. 14018 (1–8). <https://doi.org/10.1038/srep14018>
 31. Skripal A. V., Ponomarev D. V., Volshansk M. A. Resonances in microwave photonic crystals using a continuous layer of water as an interface. *Technical Physics Letters*, 2024, vol. 50, no. 15, pp. 30–33 (in Russian). <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.15.58437.19880>
 32. 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>
 33. 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>
 34. 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>
 35. 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>
 36. 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>
 37. Sadovsky I. N., Kuzmin A. V., Sharkov E. A., Sazonov D. S., Pashinov E. V., Asheko A. A., Batulin S. A. *The analysis of dielectric permittivity's models of water environment, used in tasks of remote sensing of water areas*. Moscow, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013. 60 p. (in Russian).
 38. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O. Permittivity of Deeply Supercooled Water Based on the Measurements at Frequencies of 7.6 and 9.7 GHz. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 249–256. <https://doi.org/10.1134/S1064226922030044>
 39. Zhu Y., Yang H. Defective microwave photonic crystals for salinity detection. *Coatings*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 1243 (1–13). <https://doi.org/10.3390/coatings11101243>
 40. Bogatin A. S. Relaxation Polarizations: Strong and Weak Processes. *Physics of the Solid State*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 62–69. <https://doi.org/10.1134/S1063783412010064>

Поступила в редакцию 03.08.2024; одобрена после рецензирования 15.09.2024; принята к публикации 20.09.2024
 The article was submitted 03.08.2024; approved after reviewing 15.09.2024; accepted for publication 20.09.2024