

06.3;11.1;13.1;15.2

Резонансные характеристики сверхвысокочастотных фотонных кристаллов с включениями в виде проводящих нанослоев

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

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

Поступило в Редакцию 1 июня 2023 г.

В окончательной редакции 24 июля 2023 г.

Принято к публикации 4 августа 2023 г.

Описаны теоретически и исследованы экспериментально резонансные характеристики одномерных фотонных кристаллов с нарушением периодичности, связанные с эффектом резонансного туннелирования микроволнового излучения через проводящий нанослой на частотах, меньших частоты плазменного резонанса. Эффект прозрачности на частоте дефектной моды достигается вследствие минимального уровня взаимодействия электромагнитного излучения с проводящим нанослоем при его размещении в узле напряженности электрического поля стоячей электромагнитной волны внутри нарушения фотонного кристалла.

Ключевые слова: фотонный кристалл, нанослой, резонансное туннелирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.19.56269.19645

Тонкие проводящие нанослои используются в разнообразных областях микроволновой технологии. На их основе создаются СВЧ-согласованные нагрузки, болометрические измерители мощности миллиметрового и субтерагерцевого диапазонов, электромагнитные экраны, элементы интегральных СВЧ-схем, элементы гибкой электроники и фотоники с большими площадями [1–3].

Возможность применения тонких проводящих слоев в качестве элементной базы микроволновой технологии во многом обусловлена их способностью как поглощать электромагнитную энергию, так и становиться прозрачными.

Поглотители на основе проводящих слоев, как правило, реализуются в виде многослойных структур, содержащих проводящие слои, чередующиеся с диэлектрическими слоями. При этом проводящие слои могут быть выполнены в виде металлических и сильнолегированных полупроводниковых слоев на основе графена и углеродных пленок, металлических и графеновых метаповерхностей [4–6].

Эффект прозрачности проводящих слоев в микроволновом диапазоне на частотах, меньших частоты плазменного резонанса, может трактоваться как эффект туннелирования электромагнитной волны, аналогичный эффекту туннелирования элементарной частицы через потенциальный барьер с высотой, большей энергии частицы [7]. В качестве структур с эффектом туннелирования рассматривались тонкие слои плазмы, сэндвич-структуры из плазмы и диэлектрика, чередующиеся металлодиэлектрические структуры, многослойные структуры из метаматериалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью и диэлектрическими слоями с высокими значениями диэлектрической проницаемости [8–10]. При

этом высокая прозрачность структур, содержащих сверхтонкие проводящие слои, достигается при реализации резонансного туннелирования микроволнового излучения, возникающего вследствие резонансного отражения в диэлектрических слоях, окружающих проводящие слои и образующих резонаторы Фабри–Перо. Одной из разновидностей резонаторов Фабри–Перо является объемное нарушение периодичности в сверхвысокочастотном фотонном кристалле (ФК), приводящее к возникновению дефектной моды в запрещенной зоне на амплитудно-частотной характеристике [11].

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследуются резонансные характеристики ФК, связанные с эффектом резонансного туннелирования микроволнового излучения на частоте дефектной моды ФК, при введении в нарушение проводящих нанослоев.

В диапазоне частот $f = 7–13$ GHz исследован сверхвысокочастотный ФК на основе прямоугольного волновода с диэлектрическим заполнением в виде периодически чередующихся слоев керамики Al_2O_3 (нечетные слои, $\epsilon = 9.6$, толщина 1.0 mm) и тефлона (четные слои, $\epsilon = 2.0$, толщина 9 mm). Фотонный кристалл состоял из 11 слоев, слои полностью заполняют поперечное сечение волновода. В ФК создавалось нарушение периодичности за счет замены центрального слоя из тефлона на воздушный отрезок (рис. 1). Продольный размер нарушения составлял $d_6 = 22.0$ mm. Исследуемая металлодиэлектрическая структура представляла собой нанометровый металлический слой, нанесенный на керамическую подложку (Al_2O_3), и размещалась внутри нарушения ФК, полностью заполняя поперечное сечение волновода (рис. 1).

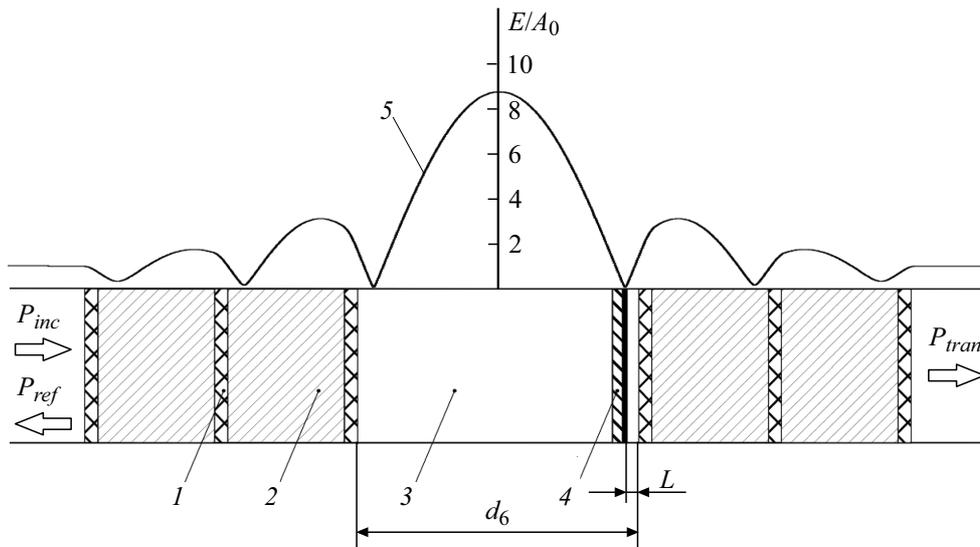


Рис. 1. Продольное сечение ФК со структурой в виде керамической подложки (Al_2O_3) толщиной 0.5 mm с нанесенным проводящим слоем и продольное распределение электрического поля E стоячей электромагнитной волны в ФК на частоте дефектной моды (кривая 5). 1 — слои поликора, 2 — слои фторопласта, 3 — нарушение, 4 — исследуемая структура. Продольный размер ФК 64 mm. A_0 — амплитуда электрического поля падающей на ФК электромагнитной волны. P_{inc} , P_{tran} и P_{ref} — падающая, прошедшая и отраженная волны.

Параметры структуры фотонного кристалла были выбраны из условия реализации запрещенной зоны в диапазоне частот от 8 до 12 GHz.

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и прохождения $S_{21}(f)$ электромагнитной волны использовалась матрица передачи слоистой структуры [12–14] с различными значениями постоянной распространения электромагнитных волн γ_i и γ_{i+1} при учете распространения в волноводе только волны основного типа H_{10} , где i — номер слоя.

Для описания распределения электрического поля $E(z)$ в одномерном ФК [10] было использовано волновое уравнение, которое в пределах каждого однородного слоя ФК имеет вид

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} + \gamma_i^2(z)E(z) = 0,$$

где $\gamma_i(z)$ — постоянная распространения электромагнитной волны в i -слое.

Размер нарушения был выбран таким, чтобы дефектная мода возникала в середине запрещенной зоны, а на частоте дефектной моды в центре нарушения наблюдалась пучность напряженности электрического поля стоячей электромагнитной волны. В этом случае внутри нарушения вблизи его границ наблюдаются узлы стоячей волны (рис. 1). Размещая исследуемую структуру вблизи узла или пучности стоячей волны, можно добиться различного уровня взаимодействия электромагнитной волны с исследуемой структурой.

Рассматривались образцы в виде керамической подложки (Al_2O_3) толщиной 0.5 mm с нанесенным проводя-

щим слоем толщиной $d = 20$ nm и удельной электропроводностью $\sigma = 2.5 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Как следует из результатов расчета $S_{21}(f)$ и $S_{11}(f)$, представленных на рис. 2, а, при расположении металлодиэлектрической структуры в узле стоячей волны на расстоянии $L = 1.4$ mm от правой границы нарушения коэффициент прохождения S_{21} на частоте дефектной моды 10.132 GHz равен -1.4 dB, что означает существенное 72% прохождение мощности микроволнового излучения на частоте дефектной моды ФК (кривая 5 на рис. 2, а). Такое прохождение можно трактовать как реализацию эффекта резонансного туннелирования через проводящую среду на частотах, меньших частоты плазменного резонанса.

Причиной неполного прохождения мощности является ее поглощение в проводящем слое. Рассматривая металлические нанослои в СВЧ-диапазоне как среды с отрицательной действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости, необходимо учитывать наличие у таких слоев значительной величины ее мнимой части $\epsilon'' = 10^4 - 10^6$. При этом в условиях резонансного туннелирования коэффициент отражения становится незначительным, менее 1% (кривая 2 на рис. 2, а).

Отметим, что отдельно взятая металлодиэлектрическая структура с указанными выше параметрами пропускает менее 1% мощности в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

При расположении образца вдали от узла (например, на самой границе нарушения $L = 0$ mm или на расстоянии от границы нарушения, превышающем $L = 1.4$ mm) S_{21} резко уменьшается до значений, меньших -20 dB (кривые 4 и 6 на рис. 2, а), т.е. эффект резонансного

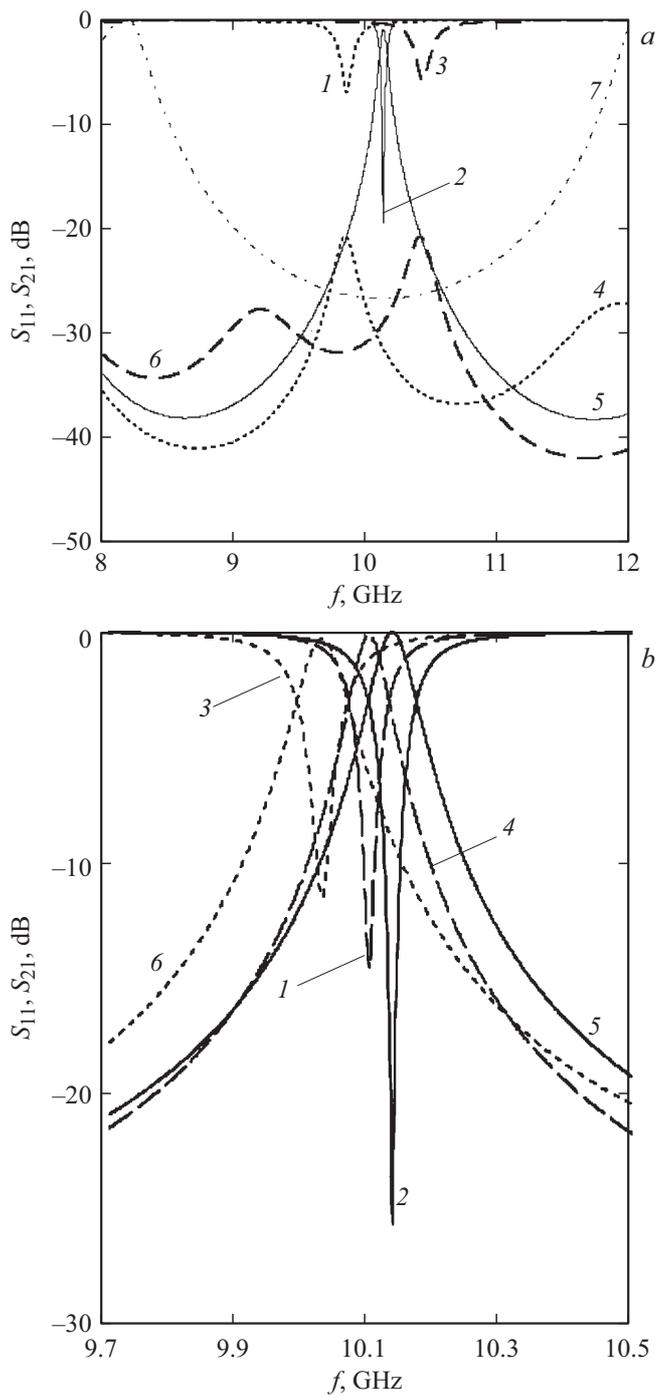


Рис. 2. Расчетные амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ (1–3) и прохождения $S_{21}(f)$ (4–6) ФК при различных положениях образца внутри нарушения. $L = 0$ (1, 4), 1.4 (2, 5), 2.5 mm (3, 6). 7 — амплитудно-частотная характеристика коэффициента прохождения фотонного кристалла без нарушения периодичности. *a* — с проводящим нанослоем, *b* — без проводящего нанослоя.

туннелирования через слой с высокой проводимостью практически исчезает.

Отметим, что степень прозрачности проводящего слоя на частоте дефектной моды растет при увеличении числа

слоев фотонного кристалла и увеличении кратности значений их диэлектрических проницаемостей.

Из результатов расчета $S_{21}(f)$ и $S_{11}(f)$ ФК с образцом без проводящего нанослоя внутри нарушения, представленных на рис. 2, *b*, следует, что изменение положения образца внутри нарушения вблизи узла стоячей волны приводит к сдвигу резонансной частоты дефектной моды и незначительному уменьшению S_{21} вследствие небольшого увеличения S_{11} .

Экспериментально исследовался ФК, созданный в соответствии с описанной выше моделью, в диапазоне частот $f = 7–13$ GHz. Внутри нарушения располагался образец в виде поликоровой пластины (Al_2O_3) толщиной 0.5 mm с нанесенным сплошным проводящим нанослоем TaAlN толщиной 140 nm с поверхностным сопротивлением $\rho_l = 19.5 \Omega/\text{sq}$. Толщина проводящего нанослоя была измерена с помощью атомно-силового микроскопа Agilent 5600. Поверхностное сопротивление измерялось четырехзондовым методом с использованием зондовой станции Jandel RMS-EL-Z. Амплитудно-частотные характеристики $S_{21}(f)$ и $S_{11}(f)$ ФК при различных положениях структур с нанослоем внутри нарушения исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A.

В соответствии с результатами теоретического анализа экспериментально удалось наблюдать эффект высокой степени прозрачности металлодиэлектрической структуры при расположении металлического слоя внутри нарушения ФК на расстоянии 1.5 mm от границы

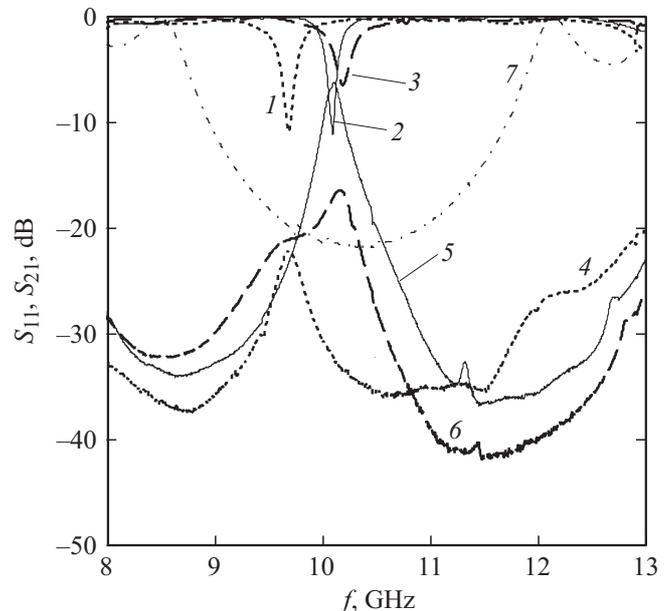


Рис. 3. Экспериментальные амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ (1–3) и прохождения $S_{21}(f)$ (4–6) ФК при различных положениях образца с проводящим нанослоем внутри нарушения. $L = 0$ (1, 4), 1.5 (2, 5), 2.5 mm (3, 6). 7 — амплитудно-частотная характеристика коэффициента прохождения фотонного кристалла без нарушения периодичности.

нарушения (кривая 5 на рис. 3). При расположении образца на самой границе нарушения $L = 0$ мм или на расстоянии от границы нарушения, превышающем $L = 1.5$ мм, S_{21} резко уменьшается до значений порядка -20 дБ (кривые 4 и 6 на рис. 3), т.е. эффект резонансного туннелирования в этих случаях становится незначительным.

Таким образом, исследования резонансных характеристик сверхвысокочастотных ФК с нарушением периодичности, содержащих нанометровый металлический слой, позволили наблюдать эффект высокой степени прозрачности металлодиэлектрической структуры на частотах, меньших частоты плазменного резонанса, и установить, что причиной эффекта резонансного туннелирования на частоте дефектной моды является достижение минимального уровня взаимодействия электромагнитного излучения с проводящим слоем при его размещении в узле стоячей волны внутри нарушения ФК.

Полученные результаты могут быть использованы, в частности, как при конструировании узкополосных перестраиваемых СВЧ-фильтров пропускания и СВЧ-аттенуаторов на основе фотонных кристаллов, содержащих полупроводниковые элементы с управляемым уровнем инжекции свободных носителей заряда, так и при характеристике сильнолегированных полупроводниковых и металлических нанослоев, графеновых структур и металлодиэлектрических метаповерхностей.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект 17308ГУ/2022 от 12.04.2022) и Министерства образования и науки РФ (в рамках программы стратегического академического лидерства „Приоритет 2030“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.А. Усанов, В.П. Мещанов, А.В. Скрипаль, Н.Ф. Попова, Д.В. Пономарев, М.К. Мерданов, *ЖТФ*, **87** (2), 216 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44128.1794 [D.A. Usanov, V.P. Meshchanov, A.V. Skripal', N.F. Popova, D.V. Ponomarev, M.K. Merdanov, *Tech. Phys.*, **62** (2), 243 (2017). DOI: 10.1134/S106378421702027X].
- [2] R. Asmatulu, P.K. Bollavaram, V.R. Patlolla, I.M. Alarifi, W.S. Khan, *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **3** (1), 66 (2020). DOI: 10.1007/s42114-020-00135-7
- [3] Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, A.C. Arias, *Adv. Mater.*, **32** (15), 1905279 (2020). DOI: 10.1002/adma.201905279
- [4] H. Fan, S. Kaixuan, Z. Dace, L. Rui, Z. Yulu, D. Jianxiong, M. Ling, B. Shaowei, J. Jianjun, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **63** (4), 1290 (2021). DOI: 10.1109/TEMC.2021.3050184
- [5] J. Zheng, H. Zheng, Y. Pang, B. Qu, Z. Xu, *Opt. Express*, **31** (3), 3731 (2023). DOI: 10.1364/OE.482992
- [6] А.В. Богацкая, Н.В. Кленов, П.М. Никифорова, А.М. Попов, А.Е. Щеголев, *Оптика и спектроскопия*, **130** (4), 481 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.04.52259.48-21 [A.V. Bogatskaya, N.V. Klenov, P.M. Nikiforova, A.M. Popov, A.E. Schegolev, *Opt. Spectrosc.*, **130** (4), 379 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.04.53722.48-2].
- [7] А.Б. Шварцбург, *УФН*, **179** (1), 43 (2007). DOI: 10.3367/UFNr.0177.200701b.0043 [A.B. Shvartsburg, *Phys. Usp.*, **50** (1), 37 (2007). DOI: 10.1070/PU2007v050n01ABEH006148].
- [8] C.H. Liu, N.J. Behdad, *Appl. Phys.*, **113** (6), 064909 (2013). DOI: 10.1063/1.4790584
- [9] B. Wang, F. Righetti, M.A. Cappelli, *Phys. Plasmas*, **25** (3), 031902 (2018). DOI: 10.1063/1.5018422
- [10] A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, A.A. Komarov, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **68** (12), 5115 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.3021412
- [11] D.A. Usanov, S.A. Nikitin, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, *One-dimensional microwave photonic crystals: new applications* (CRC Press, Boca Raton–London–N.Y., 2019). DOI: 10.1201/9780429276231
- [12] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, *ЖТФ*, **76** (5), 112 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206050173 [D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.V. Abramov, A.S. Bogolyubov, *Tech. Phys.*, **51** (5), 644 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206050173].
- [13] S. Fan, M.F. Yanik, Z. Wang, S. Sandhu, M.L. Povinelli, *J. Light. Technol.*, **24** (12), 4493 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2006.886061
- [14] Ал.А. Никитин, Ан.А. Никитин, А.Б. Устинов, E. Lähderanta, Б.А. Калиникос, *ЖТФ*, **86** (6), 115 (2016). [Al.A. Nikitin, An.A. Nikitin, A.B. Ustinov, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos, *Tech. Phys.*, **61** (6), 913 (2016). DOI: 10.1134/S106378421606013X].