

Дефектные моды фотонного кристалла с проводящим нанослоем на изолирующей подложке

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

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия
e-mail: skripala_v@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2024 г.

В окончательной редакции 23 октября 2024 г.

Принято к публикации 1 ноября 2024 г.

Исследовано возникновение дефектной моды в запрещенной зоне одномерного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением, обусловленной объемным нарушением периодичности структуры при наличии проводящих нанослоев, нанесенных на изолирующие подложки. Экспериментальные данные подтверждают результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик, выполненных с использованием метода матрицы переноса, демонстрируют возникновение дефектной моды в запрещенной зоне в X -диапазоне частот при толщинах проводящих слоев 100–140 нм и величинах поверхностного сопротивления в диапазоне значений 7–200 Ω/sq . Реализация эффекта прозрачности фотонного кристалла с проводящим нанослоем на частоте дефектной моды или эффекта подавления дефектной моды достигается выбором соотношения между продольным размером нарушения и длиной стоячей волны. Описана зависимость коэффициента поглощения электромагнитной волны в проводящем нанослое от направления распространения волны через фотонный кристалл, степень проявления которого определяется величиной напряженности электрического поля в месте расположения нанослоя.

Ключевые слова: фотонный кристалл, проводящий нанослой, амплитудно-частотные характеристики, дефектная мода.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59473.102-24

Введение

Уникальные свойства брэгговских структур, часто называемых фотонными кристаллами (ФК), обусловлены интерференционными эффектами, возникающими при взаимодействии с ними электромагнитного излучения [1–4]. Возникновение резонансных эффектов в брэгговских структурах СВЧ- и субтерагерцового диапазонов позволяет создавать на их основе различные типы СВЧ устройств, например, резонаторы с полупроводниковыми детекторами, направленные ответвители, миниатюрные резонансные антенны, согласованные нагрузки, различные типы СВЧ фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками, СВЧ сенсоры [5–12].

Ряд резонансных эффектов может быть обусловлен как объемными нарушениями периодичности брэгговской структуры (возникновение дефектных мод), так и особенностями ее интерфейса.

Возможность рассчитывать характеристики дефектных мод брэгговских структур СВЧ диапазона с точностью, позволяющей обеспечить хорошее совпадение с экспериментом, используется для неразрушающего контроля диэлектриков, полярных жидкостей, композитов, структур с полупроводниковыми слоями [4,13].

В этом случае исследуемый объект (диэлектрик, полупроводник, слой полярной жидкости и т.п.) вносится внутрь структуры ФК, чаще всего в его центральный слой. В зависимости от свойств объекта фиксируется изменение частоты, амплитуды, добротности дефектной

моды. Однако при исследовании высокопроводящих полупроводниковых и металлических нанослоев, материалов с высокими диэлектрическими потерями возникают ограничения, связанные с почти полным исчезновением дефектной моды в запрещенной зоне.

В качестве интерфейсных состояний можно рассматривать возникновение поверхностных таммовских состояний в ФК оптического и СВЧ диапазонов [14–20]. Авторами [18] теоретически обоснована и подтверждена экспериментально возможность возникновения таммовских резонансов на краю как первой, так и второй запрещенных зон одномерного СВЧ ФК, граничащего с металлическим нанослоем или нанослоем, выполненным в виде параллельных металлических полосок, при определенном диапазоне толщин и удельных электропроводностей нанослоя. Поскольку при контакте ФК с металлическим нанослоем ярко выраженный таммовский резонанс наблюдался лишь при определенных значениях толщин и удельных электропроводностей нанослоя, то для расширения диапазонов значений электропроводности и толщины проводящего слоя, при которых наблюдаются ярко выраженные таммовские резонансы, в работе [21] предложено управлять частотой таммовского резонанса с помощью изменения толщины крайнего слоя фотонного кристалла, граничащего с проводящим слоем.

Однако при реализации таммовского резонанса электрическое поле электромагнитной волны сосредоточено в слое ФК, граничащем с проводящим слоем, поэтому

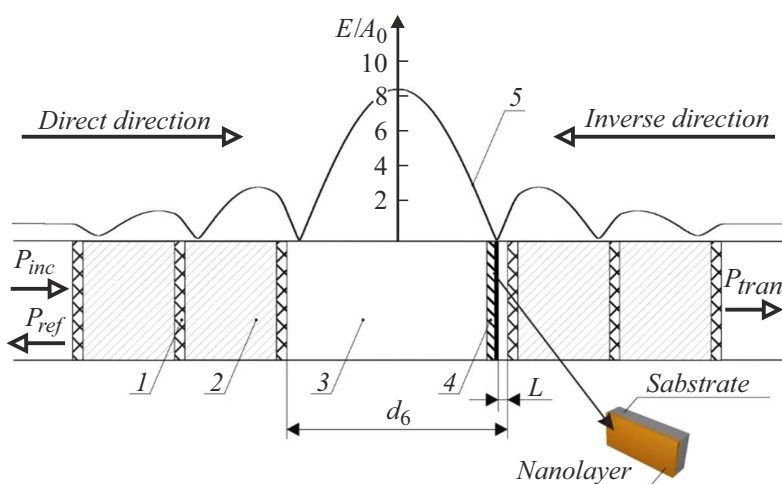


Рис. 1. Распределение амплитуды стоячей волны вдоль фотонного кристалла с нарушением $d_6 = 22$ мм и продольное сечение фотонного кристалла: 1 — слой поликора, толщиной 1.0 мм, 2 — слой тefлона, толщиной 9.0 мм, 3 — нарушение, 4 — исследуемая структура на расстоянии L от края нарушения, 5 — амплитуда стоячей волны.

изменение параметров этого слоя ФК хотя и приводит к изменению характеристик фотонного таммовского резонанса, но не является достаточно эффективным. В то время как расположение исследуемого образца в области сосредоточения поля электромагнитной волны может повысить эффективность управления резонансными особенностями на АЧХ ФК. Поскольку область сосредоточения электрического поля находится внутри ФК, то при расположении образца в этой области на АЧХ ФК реализуется резонансная особенность, которую, как правило, называют дефектной модой [23–25].

Авторами [26] установлено, что проводящий элемент малых размеров в нарушении приводит к незначительному уменьшению частоты дефектной моды, величина которого зависит от месторасположения этого элемента и размера нарушения. Авторы [14] в коаксиальном ФК использовали измеряемый диэлектрический образец в качестве нарушения, реализовали АЧХ с двумя запрещенными зонами, в каждой из которых возникала дефектная мода. Для измерений диэлектрической проницаемости была использована та мода, для которой дефект оказывался расположенным в пучности стоячей волны.

В настоящей работе рассматриваются особенности амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и прохождения одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла при наличии дефектной моды, обусловленной созданием нарушения периодичности, внутри которого располагается структура с проводящим нанослоем. Рассматриваются случаи, когда размер нарушения существенно больше продольного размера структуры с проводящим нанослоем, так и соизмерим с ним. Проводится анализ характеристик дефектной моды при изменении электропроводности проводящего слоя в широком диапазоне значений, основанный на учете распределения электрического поля внутри нарушения

ФК, в зависимости от направления распространения электромагнитной волны.

1. Моделирование СВЧ фотонного кристалла с нарушенным слоем

СВЧ ФК представлял собой отрезок прямоугольного волновода, заполненного диэлектрическими слоями двух типов с различной величиной диэлектрической проницаемости и толщиной. Количество слоев, равное одиннадцати, выбиралось из условия достаточности для получения ярко выраженной зонной структуры в X-диапазоне амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла. Нарушением выступал центральный слой, выполненный в виде отрезка волновода с воздушным заполнением.

При моделировании диэлектрическая проницаемость нечетных слоев фотонного кристалла выбиралась равной $\epsilon = 9.6$ (Al_2O_3), толщина — 1.0 мм, четных слоев $\epsilon = 2.0$ (тефлон), толщина 9.0 мм.

Исследуемая структура, представляющая собой нанометровый металлический слой, нанесенный на керамическую подложку (Al_2O_3) толщиной 0.5 мм, размещалась внутри нарушения фотонного кристалла, полностью заполняя поперечное сечение волновода (рис. 1).

2. Компьютерное моделирование характеристик дефектной моды СВЧ фотонного кристалла

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(\omega)$ и коэффициента пропускания $S_{21}(\omega)$ электромагнитной волны использовалась матрица передачи слоистой структуры с различными значениями

постоянной распространения электромагнитных волн волны γ_i и γ_{i+1} при учете распространения в волноводе только волны основного типа H_{10} [4,6,27,28]:

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

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

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

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

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

$$S_{21} = \frac{T_N[1, 1]T_N[2, 2] - T_N[1, 2]T_N[2, 1]}{T_N[2, 2]}, \quad (3)$$

где

$$T_N = \begin{pmatrix} T_N[1, 1] & T_N[1, 2] \\ T_N[2, 1] & T_N[2, 2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,(j+1)}$$

$$= T(z_{N,N+1}) \cdot T(z_{N-1,N}) \dots T(z_{1,2}) \cdot T(z_{0,1}) \quad (4)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N -слоев.

Постоянные распространения электромагнитной волны γ_0 , γ_d , γ_m соответственно в пустом волноводе, в диэлектрических слоях и в проводящем слое, полностью заполняющих волновод по поперечному сечению, были рассчитаны с использованием выражений:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (5)$$

$$\gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_d \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (6)$$

$$\gamma_m = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_m^* \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_m^* = \varepsilon_m' - j\varepsilon_m''$ — комплексная диэлектрическая проницаемость проводящего слоя; $\varepsilon_m' = \varepsilon_m - \frac{\sigma_m^2 m_m^*}{\varepsilon_0 e^2 n_m}$, $\varepsilon_m'' = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_0 \omega}$; ε_m , σ_m , m_m^* , n_m — относительная диэлектрическая проницаемость решетки, удельная электропроводность проводящего слоя, эффективная масса и концентрация электронов в проводящем слое соответственно; a — размер широкой стенки волновода; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота электромагнитной волны; ε_0 и σ_0 — электрическая и магнитная постоянные; ε_d — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

Для описания распределения электрического поля $E(z)$ в одномерном фотонном кристалле было использовано волновое уравнение вида:

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} + \gamma^2(z)E(z) = 0, \quad (8)$$

где $\gamma(z)$ — постоянная распространения электромагнитной волны.

Решение волнового уравнения внутри каждой из областей одномерного фотонного кристалла с постоянной распространения электромагнитной волны γ_j может быть представлено в виде суперпозиции падающих и отраженных волн и рассчитано с использованием следующего соотношения:

$$E_j = (T_j[1, 1]A_0 + T_j[1, 2]B_0) \cdot \exp(\gamma_j(z_{j+1} - z_j))$$

$$+ (T_j[2, 1]A_0 + T_j[2, 2]B_0) \cdot \exp(-\gamma_j(z_{j+1} - z_j)), \quad (9)$$

где $T_j[1, 1]$, $T_j[1, 2]$, $T_j[2, 1]$, $T_j[2, 2]$ — элементы матрицы передачи слоистой структуры, состоящей из j последовательно расположенных слоев.

Продольные размеры d_6 нарушения составляли 3.0 и 22.0 mm. В первом случае на частоте дефектной моды половина длины электромагнитной волны $\lambda/2$ превышает электрическую длину нарушения $\varepsilon^{1/2}d_6$, и в центре нарушения наблюдается узел стоячей волны. Во втором случае размер неоднородности вдоль направления распространения волны соизмерим с половиной длины волны λ на частоте дефектной моды. На частоте дефектной моды в области нарушения наблюдается пучность стоячей волны [14,26]. При этом конкретные параметры фотонного кристалла и нарушения выбирались из условия, чтобы в широкой полосе частот X-диапазона реализовывалась запрещенная зона, а дефектная мода возникала на частоте, близкой к середине запрещенной зоны.

При размере нарушения $d_6 = 22$ mm пучность стоячей волны наблюдалась в центре нарушения, а вблизи его границ внутри нарушения возникали узлы стоячей волны (рис. 1).

Перемещением исследуемой структуры внутри нарушения можно добиться различного уровня взаимодействия электромагнитной волны с ней.

Рассматривались образцы с толщиной проводящего слоя $l = 20$ nm и удельной электропроводностью σ в диапазоне от 10^0 до $10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Как следует из результатов расчета, при расположении металлической пленки в узле стоячей волны (на расстоянии $L = 1.35$ mm от границы нарушения) коэффициент прохождения S_{21} на частоте дефектной моды при изменении электропроводности образца от 10^0 до $10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ уменьшается от -0.01 до -4.5 dB. Такое незначительное уменьшение коэффициента прохождения S_{21} через образец с высокой электропроводностью можно трактовать как реализацию эффекта резонансного туннелирования через проводящую среду на частотах, меньших частоты плазменного резонанса [29].

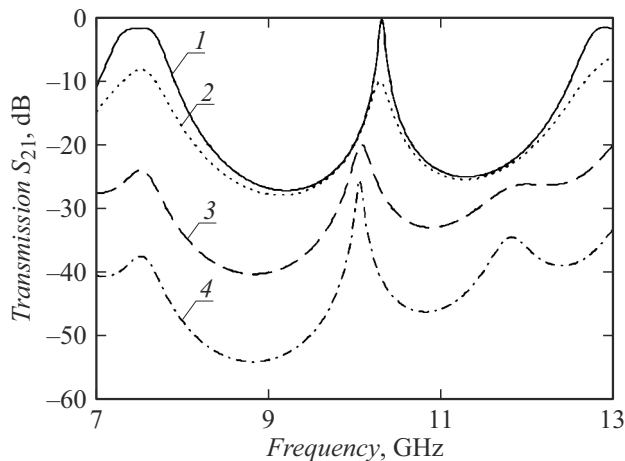


Рис. 2. АЧХ ФК с проводящим нанослоем толщиной 20 nm у границы нарушения и различных удельных электропроводностях нанослоя σ , [$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]: 1 — без пленки, 2 — 10^5 , 3 — $2 \cdot 10^6$, 4 — 10^7 . Толщина нанослоя 20 nm.

При расположении образца вдаль от узла, например, на самой границе нарушения ($L = 0.0 \text{ mm}$) коэффициент прохождения S_{21} на частоте дефектной моды при изменении электропроводности σ образца от 1 до $10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ уменьшается от -0.3 до -25 dB (рис. 2)

Отметим, что для увеличения коэффициента прохождения электромагнитной волны на частоте дефектной моды при расположении образца с высокой электропроводностью вблизи узла стоячей волны можно использовать в структуре фотонного кристалла слои диэлектрика с более высокой диэлектрической проницаемостью, например, слои полуизолирующего GaAs.

Как следует из результатов расчета, увеличение диэлектрической проницаемости нечетных слоев от 9.6 (Al_2O_3) до 12.5 (GaAs) приводит к увеличению коэффициента прохождения при наличии проводящей пленки с проводимостью $10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ от -1.4 до -0.8 dB . Это соответствует изменению коэффициента прохождения от 72 до 83%.

Авторы [26] для реализации ярко выраженной дефектной моды на АЧХ ФК при введении в нарушение проводящего включения использовали включение малых размеров по сравнению с поперечным сечением волновода. Однако в этом случае чувствительность дефектной моды к параметрам такого включения резко снижается.

Представленные результаты позволяют во многом решить проблему достижения высокой чувствительности при характеристике проводящих структур с помощью введения в нарушение проводящих структур большой площади (полностью заполняющих поперечное сечение волновода). Поскольку учет распределения поля в фотонном кристалле позволяет выбрать структуру нарушенного слоя, обеспечивающую возможность реализации ярко выраженной дефектной моды даже при введении проводящей структуры большой площади.

Анализ полученных результатов также позволяет сделать вывод, что при увеличении электропроводности

структуры может наблюдаться смещение частоты дефектной моды. При этом величина и знак этого смещения определяются расположением структуры внутри нарушения. При расположении металлической пленки внутри нарушения в узле стоячей волны частотного смещения дефектной моды не наблюдается. При расположении образца вблизи границы нарушения, на расстоянии, меньшем $L = 1.35 \text{ mm}$, наблюдается частотный сдвиг дефектной моды в область низких частот, а при расположении на расстоянии большем 1.35 mm, наблюдается частотный сдвиг дефектной моды в область высоких частот. Величина сдвига тем больше, чем дальше располагается образец от узла электрического поля. Следует отметить, что поскольку внутри нарушения наблюдается два узла электрического поля вблизи противоположных границ нарушения, то при перемещении образца от одного узла ко второму на расстояние, при котором образец станет ближе ко второму узлу чем к первому, величина частотного сдвига станет уменьшаться.

Следует отметить, что в зависимости от направления распространения волны через фотонный кристалл изменяется величина коэффициента поглощения электромагнитной волны в нанослоем (рис. 3), зависящая от положения образца внутри нарушения, особенно при высокой проводимости нанослоя, что связано с изменением ее коэффициента отражения, при неизменной величине коэффициента прохождения.

При расположении металлического нанослоя вблизи узла стоячей волны резонансные частоты дефектной моды коэффициентов отражения S_{11} и S_{22} для обоих направлений распространения волны в фотонном кристалле совпадают с резонансной частотой $f_0 = 10.132 \text{ GHz}$ дефектной моды коэффициента прохождения S_{21} , резонансная частота которого остается постоянной для обоих направлений распространения волны (рис. 3, a). Однако добротность резонансов S_{11} и S_{22} отличается более чем в 5 раз. При этом добротность резонанса коэффициента отражения S_{11} (кривая 3 на рис. 3, a) при прямом направлении распространения волны совпадает с добротностью резонанса коэффициента прохождения S_{21} (кривая 5 на рис. 3, a).

При расположении металлического нанослоя вдаль от узла стоячей волны, например на границе нарушения $L = 0.0 \text{ mm}$, резонансная частота дефектной моды коэффициента отражения (кривая 2 на рис. 3, b) для обратного направления распространения волны в фотонном кристалле не совпадает с резонансной частотой дефектной моды коэффициента прохождения (кривая 5 на рис. 3, b).

Резонансная частота $f_1 = 9.84 \text{ GHz}$ дефектной моды S_{11} (кривая 1 на рис. 3, b), при которой S_{11} минимален, совпадает с резонансной частотой дефектной моды S_{21} (кривая 5 на рис. 3, b), а коэффициент поглощения на этой частоте максимален (кривая 3 на рис. 3, b).

Напротив, на частоте 9.84 GHz S_{22} достигает величины -0.05 dB , а коэффициент поглощения минимален. Это и обеспечивает сохранение коэффициента прохож-

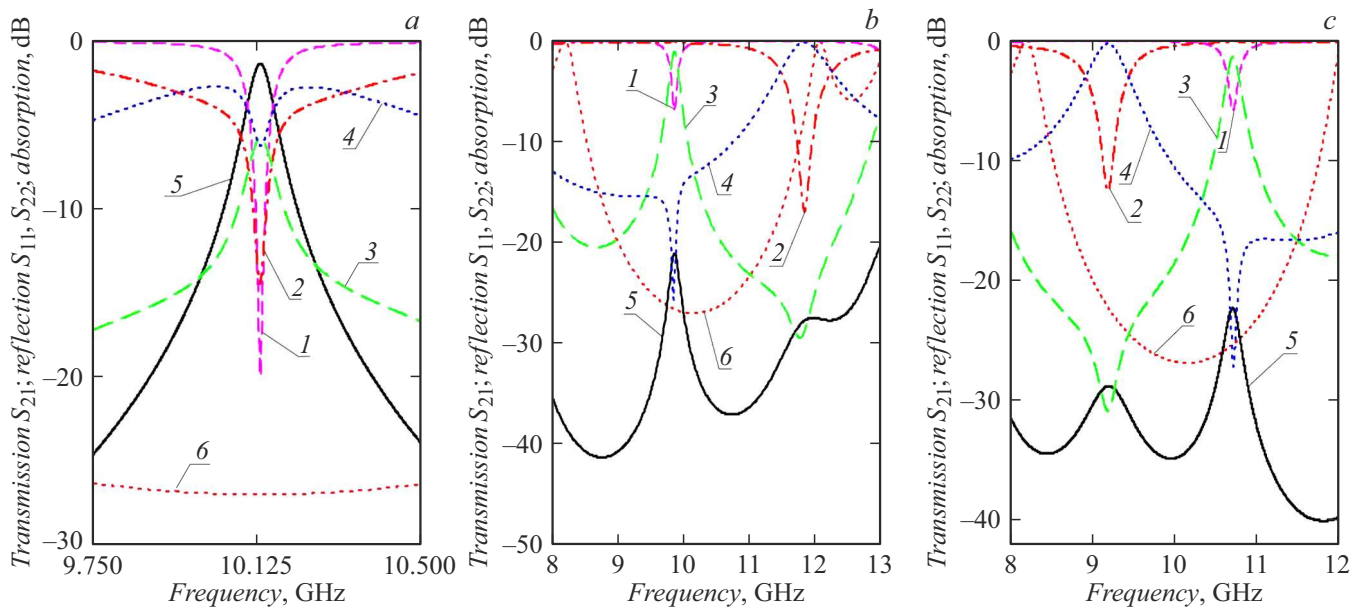


Рис. 3. Расчетные АЧХ коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ (кривые 1) и $S_{22}(f)$ (кривые 2), поглощения (кривые 3, 4) и прохождения $S_{21}(f)$ (кривые 5) ФК при различных положениях образца внутри нарушения, L , мм: a — 1.35, b — 0.0, c — 2.5, для двух противоположных направлений распространения волны (кривые 1, 3 — прямое направление, кривые 2, 4 — обратное направление), АЧХ коэффициента прохождения фотонного кристалла без нарушения периодичности (кривая 6). $\sigma = 2.5 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $l = 20 \text{ nm}$, $d_6 = 22 \text{ mm}$.

дения на прежнем уровне независимо от направления распространения волны.

Частотная зависимость коэффициента отражения S_{22} характеризуется резонансом на частоте $f_2 = 11.83 \text{ GHz}$ ($S_{22} = -16.9 \text{ dB}$). На этой частоте слабо выраженный локальный максимум S_{21} на уровне -27.5 dB обусловлен максимумом коэффициента поглощения, а S_{22} минимален и слабо влияет на S_{21} .

На рис. 3, c представлена АЧХ ФК при расположении образца на расстоянии $L = 2.5 \text{ mm}$, при котором наблюдается частотный сдвиг максимума коэффициента пропускания дефектной моды в область высоких частот $f_3 = 10.7 \text{ GHz}$.

Рассматривая эффект зависимости коэффициента поглощения электромагнитной волны в проводящем нанослое от направления распространения волны через фотонный кристалл, можно сделать вывод, что степень проявления эффекта определяется уровнем взаимодействия электромагнитной волны с исследуемой структурой, который зависит от напряженности электрического поля в месте расположения нанослоя.

Поскольку изменение параметров нарушения периодичности приводит к изменению частоты дефектной моды, то уменьшение размера нарушения до $d_6 = 3 \text{ mm}$ позволяет реализовать дефектную моду на частоте, близкой к середине запрещенной зоны, также как и при $d_6 = 22 \text{ mm}$. Однако в этом случае в центре нарушения наблюдается узел стоячей волны (рис. 4).

Результаты расчета АЧХ ФК с нарушением $d_6 = 3 \text{ mm}$, представленные на рис. 5, для случая распо-

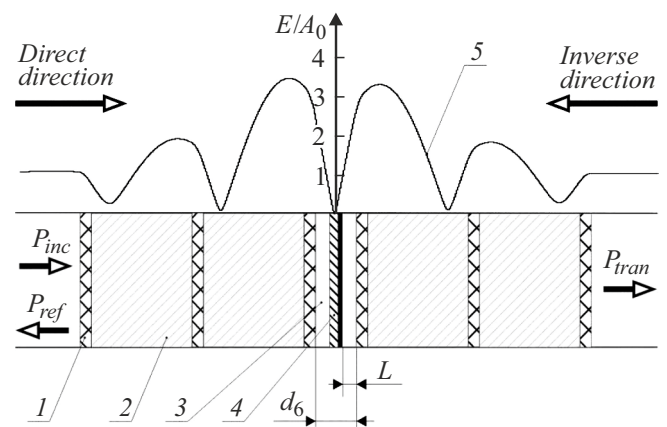


Рис. 4. Распределение амплитуды стоячей волны вдоль фотонного кристалла с нарушением $d_6 = 3 \text{ mm}$ и продольное сечение фотонного кристалла: 1 — слой поликора, толщиной 1.0 мм, 2 — слой тефлона, толщиной 9.0 мм, 3 — нарушение, 4 — исследуемая структура на расстоянии L от края нарушения, 5 — амплитуда стоячей волны.

ложения проводящего нанослоя в середине нарушения свидетельствуют о реализации эффекта прозрачности фотонного кристалла с проводящим нанослоем, при котором резонансная частота дефектной моды коэффициента отражения для обоих направлений распространения волны в фотонном кристалле совпадает с резонансной частотой дефектной моды коэффициента прохождения (рис. 5, a), которая осталась неизменной по сравнению

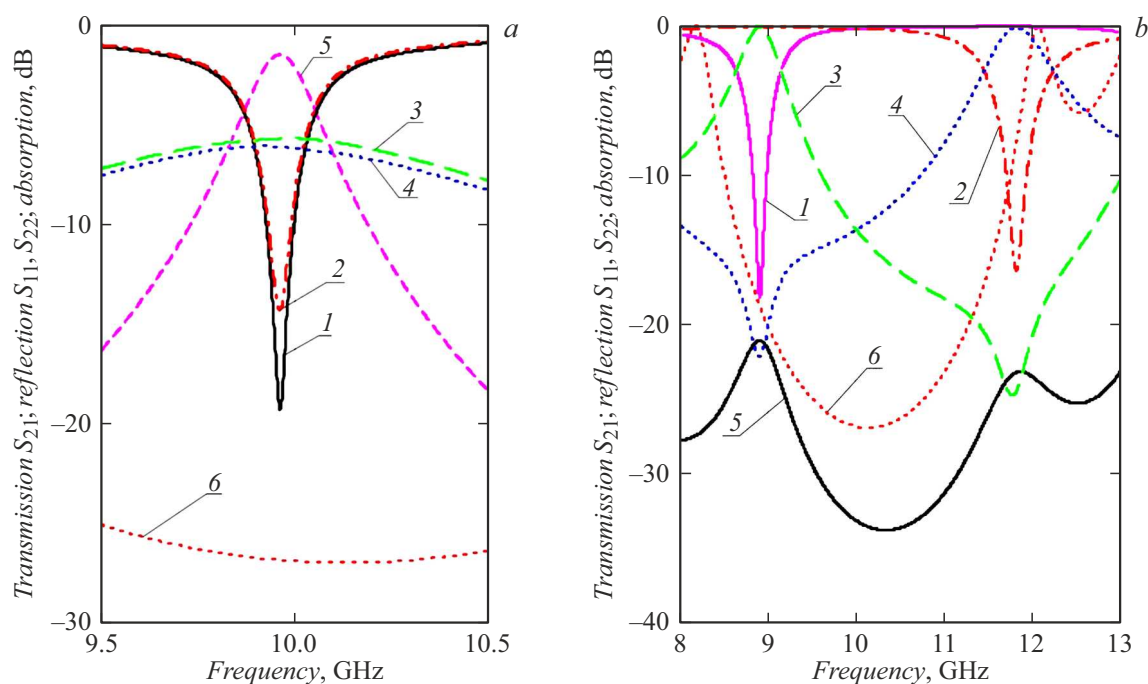


Рис. 5. Расчетные АЧХ $S_{11}(f)$ (кривые 1), $S_{22}(f)$ (кривые 2), поглощения (кривые 3, 4) и прохождения $S_{21}(f)$ (кривые 5), ФК при различных положениях образца внутри нарушения, L , mm: a — 1.5, b — 0.0, для двух направлений распространения волны (кривые 1, 3 — прямое, кривые 2, 4 — обратное), АЧХ $S_{21}(f)$ ФК без нарушения периодичности (кривая 6). $\sigma = 2.5 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $l = 20 \text{ nm}$, $d_6 = 3.0 \text{ mm}$.

с частотой дефектной моды для случая отсутствия проводящего нанослоя. При расположении проводящего нанослоя на границе нарушения проявляется эффект зависимости коэффициента поглощения электромагнитной волны в проводящем нанослое от направления распространения волны через фотонный кристалл (рис. 5, b).

3. Экспериментальное исследование резонансных характеристик СВЧ фотонных кристаллов

Экспериментально исследовался одномерный фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью, в диапазоне частот 7–13 GHz.

Экспериментальный макет ФК изготовлен из набора чередующихся плоскопараллельных пластин, которые были размещены в отрезке волновода сечением $23 \times 10 \text{ mm}$. Диэлектрическая проницаемость ϵ пластин, образующих нечетные и четные слои фотонного кристалла толщиной 1.0 и 9.0 mm в количестве одиннадцати, была измерена с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A и определена с помощью программного обеспечения Agilent 85071E Materials Measurement Software [30] и составила $\epsilon = 9.6$ (Al_2O_3) и 2.0 (тефлон) соответственно. В фотонном кристалле создавалось нарушение периодичности в виде замены центрального слоя из тефлона на воздушный отрезок длиной 22 mm.

Исследуемые образцы в виде пластины (Al_2O_3) толщиной 0.5 mm с резистивным слоем TaAlN вводились в нарушенный слой ФК. Слой TaAlN наносился методом термического испарения в вакууме. Исследуемые образцы характеризовались величиной поверхностного сопротивления ρ_l в диапазоне значений 7–200 Ω/sq и толщинами $l = 100 - 140 \text{ nm}$.

Измерения толщины проводящего нанослоя проводились методом „ступеньки“ с использованием атомно-силового микроскопа Agilent 5600. Измерение удельного поверхностного сопротивления было выполнено четырехзондовым методом с использованием зондовой станции Jandel RMS-EL-Z.

Частотные зависимости $S_{11}(f)$, $S_{22}(f)$, $S_{21}(f)$ фотонного кристалла, при различных положениях структур с нанослоем с различным поверхностным сопротивлением и толщиной внутри нарушения исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A.

В соответствии с результатами теоретического анализа экспериментально удалось пронаблюдать изменения частоты и амплитуды дефектной моды ФК с уменьшением ρ_l нанослоя при размещении его на границе нарушения ФК (рис. 6). Величина сдвига частоты дефектной моды в сторону уменьшения составляла около 200 MHz при изменении поверхностного сопротивления ρ_l нанослоя от 200 до 7 Ω/sq .

Также экспериментально установлено, что при расположении проводящей пленки с поверхностным сопро-

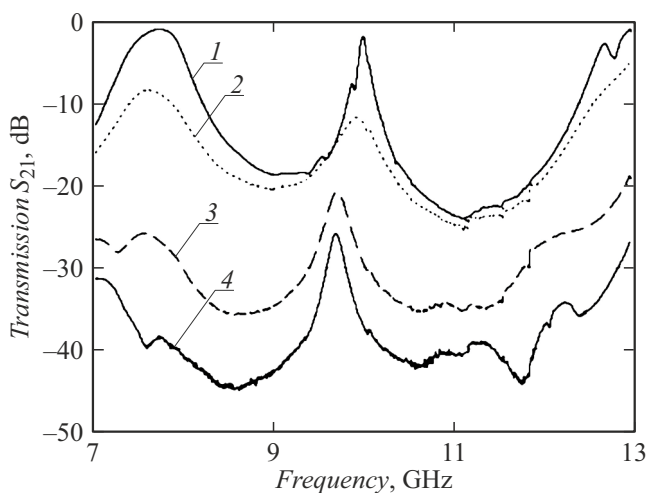


Рис. 6. Экспериментальные АЧХ ФК с проводящим нанослоем у границы нарушения и различных поверхностных сопротивлений нанослоя ρ_1 , Ω/sq : 1 — без пленки, 2 — 210, 3 — 20.0, 4 — 7.0. $d_6 = 22$ mm.

тивлением ρ_1 в диапазоне значений 7–200 Ω/sq на расстоянии ~ 1.6 mm от границы нарушения, соответствующем узлу стоячей волны, уменьшение коэффициента прохождения S_{21} не превышало -5.0 dB, а сдвиг частоты дефектной моды не наблюдался. При расположении проводящей пленки ($\rho_1 = 7$ Ω/sq) на расстоянии ~ 3.0 mm сдвиг наблюдался в сторону увеличения частоты и составлял около 400 MHz.

Экспериментально наблюдалось несколько типов резонансов на АЧХ коэффициента отражения в запрещенной зоне ФК в зависимости от расположения нанослоя внутри нарушения, величины проводимости нанослоя и направления распространения электромагнитной волны (рис. 7).

При расположении проводящего нанослоя вблизи узла стоячей волны при всех значениях ее поверхностного сопротивления в диапазоне от 200 до 7 Ω/sq резонансные частоты дефектной моды коэффициента отражения для прямого (кривая 1 на рис. 7, а) и обратного (кривая 2 на рис. 7, а) направлений распространения волны в фотонном кристалле совпадают с резонансной частотой дефектной моды коэффициента прохождения (кривая 3 на рис. 7, а). При этом, как это и следует из результатов компьютерного моделирования, резонансы характеризуются различной величиной добротности (кривые 1 и 2 на рис. 7, а).

При расположении структуры с проводящим нанослоем с низким поверхностным сопротивлением (высокой поверхностной проводимостью) внутри нарушения как слева, так и справа от узла стоячей волны, резонансная частота дефектной моды коэффициента отражения $S_{11}(f)$ (кривые 1 на рис. 7, b и c) совпадает с резонансной частотой дефектной моды $S_{21}(f)$ (кривые 3 на рис. 7, b и c), а резонансная частота дефектной моды

коэффициента отражения $S_{22}(f)$ (кривые 2 на рис. 7, b и c) не совпадает с резонансной частотой дефектной моды $S_{21}(f)$. При $L = 0.0$ mm резонансная частота дефектной моды $S_{22}(f)$ больше резонансной частоты дефектной моды $S_{21}(f)$, а при $L = 2.5$ mm резонансная частота дефектной моды $S_{22}(f)$ меньше резонансной частоты дефектной моды $S_{21}(f)$. Такое поведение АЧХ подтверждает результаты компьютерного моделирования, выполненного методом матрицы переноса.

Заключение

Рассмотрены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла при наличии дефектной моды, обусловленной созданием нарушения периодичности, внутри которого располагается металлодиэлектрическая структура с проводящим нанослоем.

Проведен анализ характеристик дефектной моды при изменении электропроводности проводящего нанослоя в широком диапазоне значений, основанный на учете распределения электрического поля внутри нарушения фотонного кристалла в зависимости от его размеров.

Показано, что в зависимости от соотношения между продольным размером нарушения и длиной стоячей волны внутри фотонного кристалла как эффект прозрачности фотонного кристалла с проводящим нанослоем на частоте дефектной моды, так и эффект подавления дефектной моды реализуются при различных структурах нарушенного слоя.

Установлено, что частотное положение дефектной моды коэффициента прохождения при фиксированном положении образца внутри нарушения изменяется с уменьшением поверхностного сопротивления проводящего нанослоя. При этом величина и знак этого изменения определяются расположением структуры внутри нарушения.

Показано, что в зависимости от направления распространения волны через фотонный кристалл изменяется поглощение электромагнитной волны в проводящем нанослоем, определяемое уровнем взаимодействия электромагнитной волны с исследуемой структурой, который зависит от напряженности электрического поля в месте расположения нанослоя.

Полученные результаты могут быть использованы для достижения высокой чувствительности к толщине и удельной электропроводности при характеристике сильнолегированных полупроводниковых и металлических нанослоев, графеновых структур и металлодиэлектрических метаповерхностей с помощью введения в нарушение проводящих структур большой площади.

Финансирование работы

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

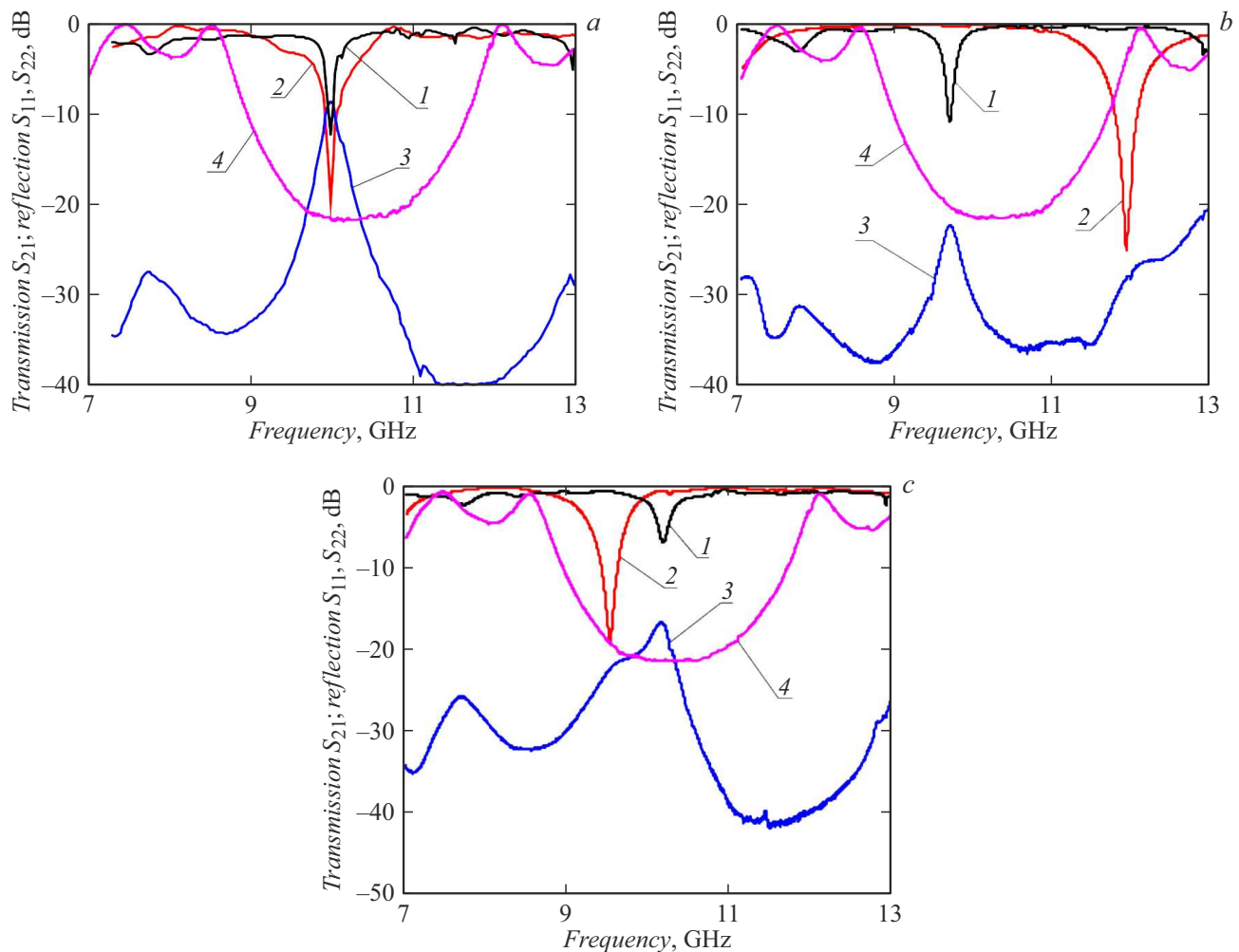


Рис. 7. Экспериментальные АЧХ $S_{11}(f)$ (кривые 1), $S_{22}(f)$ (кривые 2), и $S_{21}(f)$ (кривые 3) ФК при различных положениях образца внутри нарушения, L , мм: a — 1.6, b — 0.0, c — 2.5. АЧХ $S_{21}(f)$ фотонного кристалла без нарушения периодичности (кривая 4). $l = 140$ nm, $\rho_l = 19.5$ Ω/sq , $d_6 = 22$ mm.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.М. Рыбин, М.Ф. Лимонов. УФН, **189** (8), 881 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2019.03.038543 [M.V. Rybin, M.F. Limonov. Phys. Usp., **62** (8), 823 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2019.03.038543]
- [2] В.А. Толмачев. Опт. и спектр., **122** (4), 665 (2017). DOI: 10.7868/S0030403417030217 [V.A. Tolmachev. Opt. Spectrosc., **122** (4), 646 (2017). DOI: 10.1134/S0030400X17030201]
- [3] C. Sibilía, T.M. Benson, M. Marciniak, T. Szoplik. *Photonic crystals: physics and technology* (Springer, Milan, 2008), DOI: 10.1007/978-88-470-0844-1
- [4] D.A. Usanov, S.A. Nikitov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev. *One-dimensional microwave photonic crystals: new applications*. (CRC Press, Taylor Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2019), DOI: 10.1201/9780429276231
- [5] В.М. Мухортов, С.И. Масычев, А.А. Маматов, Вас.М. Мухортов. Письма в ЖТФ, **39** (20), 70 (2013). [V.M. Mukhortov, S.I. Masychnev, A.A. Mamatov. Tech. Phys. Lett., **39** (10), 921 (2013). DOI: 10.1134/S1063785013100234]
- [6] Ал.А. Никитин, Ан.А. Никитин, А.Б. Устинов, Е. Lähderanta, Б.А. Калиникос. ЖТФ, **86** (6), 115 (2016). [A.A. Nikitin, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, E. Lähderanta. Tech. Phys., **61** (6), 913 (2016). DOI: 10.1134/S106378421606013X]
- [7] В.А. Беляев, С.А. Ходенков, В.Ф. Шабанов. Докл. Phys., **61** (4), 155 (2016). DOI: 10.1134/S1028335816040017
- [8] Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, Р.Г. Галеев, В.Ф. Шабанов. ДАН. Физика, **485** (1), 27 (2019). DOI: 10.31857/S0869-5652485127-32 [B.A. Belyaev, V.F. Shabanov, S.A. Khodenkov, R.G. Galeev. Dokl. Phys., **64** (3), 85 (2019). DOI: 10.1134/S1028335819030017]
- [9] H.C.C. Fernandes, J.L.G. Medeiros, I.M.A. Junior, D.B. Brito. PIRS Online, **3** (5), 689 (2007). DOI: 10.2529/PIERS060901105337

- [10] H.B. El-Shaarawy, F. Coccetti, R. Plana, M. El-Said, E.A. Hashish. *WSEAS Trans. Comm.*, **7** (11), 1112 (2008).
- [11] J. Yao, C. Yuan, H. Li, J. Wu, Y. Wang, A.A. Kudryavtsev, V.I. Demidov, Z. Zhou. *AIP Advances*, **9** (6), 065302(2019). DOI: 10.1063/1.5097194
- [12] Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang, Hai Xiao, Jun Fan. *Appl. Phys. Lett.*, **99** (11), 113517 (2011). DOI: 10.1063/1.3636406
- [13] Jie Huang, Tao Wei, Xinwei Lan, Jun Fan, and Hai Xiao. *Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* (San Diego, United States, 2012), 83452Z. DOI: 10.1117/12.915035
- [14] Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, О.М. Рузанов, И.О. Тимофеев. *Радиотехника и электроника*, **65** (5), 495 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420040099 [D.A. Usanov, A.V. Skripal', D.V. Ponomarev, O.M. Ruzanov, I.O. Timofeev, S.A. Nikitov. *J. Comm. Technol. Electron.*, **65** (5), 541 (2020). DOI: 10.1134/S1064226920040087]
- [15] R.G. Bikbaev, S.Ya. Vetrov, I.V. Timofeev. *J. Opt.*, **19** (1), 015104 (2017). DOI: 10.1088/2040-8986/19/1/015104
- [16] А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.М. Мерзликин, А.А. Лисянский. *УФН*, **180** (3), 249 (2010). DOI: 10.3367/UFNr.0180.201003b.0249 [A.P. Vinogradov, A.V. Dorofeev, A.M. Merzlikin, A.A. Lisyansky. *Phys. Usp.*, **53** (3), 243 (2010). DOI: 10.3367/UFNe.0180.201003b.0249]
- [17] A.P. Vinogradov, A.V. Dorofeev, S.G. Erokhin, M. Inoue, A.A. Lisyansky. *Phys. Rev. B*, **74** (4), 045128 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevB.74.045128
- [18] A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, A.A. Komarov. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **68** (12), 5115 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.3021412
- [19] D.P. Belozorov, A.A. Girich, S.V. Nedukh, A.N. Moskal'tsova, S.I. Tarapov. *PIER Lett.*, **46**, 7 (2014). DOI: 10.2528/PIERL13122502
- [20] T. Goto, A.V. Dorofeev, A.M. Merzlikin, A.V. Baryshev, A.P. Vinogradov, M. Inoue, A.A. Lisyansky, A.V. Granovsky. *Phys. Rev. Lett.*, **101** (11), 113902 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.113902
- [21] А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, А.А. Комаров, В.Е. Шаронов. *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*, **22** (2), 123 (2022). DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130 [A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, A.A. Komarov, V.E. Sharonov. *Izv. Sarat. Univ. Phys.*, **22** (2), 123 (2022). DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130]
- [22] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, R.D. Meade. *Phys. Rev. Lett.*, **67** (24), 3380 (1991). DOI: 10.1103/PhysRevLett.67.3380
- [23] Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов. *ДАН*, **403** (3), 319 (2005). [B.A. Belyaev, A.S. Voloshin, V.F. Shabanov. *Dokl. Phys.*, **50** (7), 337 (2005). DOI: 10.1134/1.2005355]
- [24] В.А. Гуняков, С.А. Мысливец, А.М. Паршин, В.Я. Зырянов, В.Г. Архипкин, В.Ф. Шабанов. *ЖТФ*, **80** (10), 95 (2010). [V.A. Guniakov, S.A. Myslivets, A.M. Parshin, V.Y. Zyryanov, V.G. Arkhipkin, V.F. Shabanov. *Tech. Phys.*, **55** (10), 1484 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210100142]
- [25] M. Inoue, A. Baryshev, H. Takagi, P.B. Lim, K. Hatafuku, J. Noda, K. Togo. *Phys. Lett.*, **98**, 132511 (2011). DOI: 10.1063/1.3567940
- [26] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов. *ЖТФ*, **87** (6), 884 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.06.44511.1898 [D.A. Usanov, A.V. Skripal', A.A. Romanov. *Tech. Phys.*, **62** (6), 899 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217060263]
- [27] 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.
- [28] В.С. Горелик, В.В. Капачев. *ЖЭТФ*, **150** (3), 435 (2016). DOI: 10.7868/S0044451016090017 [V.S. Gorelik, V.V. Kapachev. *JETP*, **123** (3), 373 (2016). DOI: 10.1134/S1063776116070062]
- [29] А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, В.Е. Шаронов. *Письма в ЖТФ*, **49** (19), 27 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.19.56269.19645 [A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, V.E. Sharonov. *Tech. Phys. Lett.*, **49** (10), 23 (2023). DOI: 10.21883/00000000000]
- [30] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics_Of_MeasuringDielectrics_5989-2589EN.pdf