11

Таммовские резонансы в фотонном кристалле с ферромагнитным эластомером

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

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

Поступило в Редакцию 2 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 6 июня 2026 г.
Принято к публикации 9 июня 2026 г.

Описаны свойства сверхвысокочастотного фотонного кристалла, контактирующего со слоем эластомера, содержащего диспергированные ферритовые микрочастицы. Экспериментальные данные подтверждают результаты расчетов, выполненных с использованием метода волновых матриц передачи с учетом частотных зависимостей комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей ферромагнитного эластомера, в том числе модифицированного введением воздушных включений. Продемонстрировано, что положение и степень выраженности таммовских резонансов определяется толщиной и эффективными диэлектрическими и магнитными проницаемостями эластомера, и расположением ферромагнитного эластомера относительно фотонного кристалла. Учет влияния воздушных включений, равномерно распределенных по сечению ферромагнитного эластомера, выполнен введением в расчетную модель экспериментально измеренных частотных зависимостей эффективных диэлектрических и магнитных проницаемостей эластомера. Описаны характеристики таммовских резонансов при различных значениях толщины слоя эластомера и воздушного зазора между слоем ферромагнитного эластомера и фотонным кристаллом. Установлено влияние воздушных включений в слое ферромагнитного эластомера на изменение периода и амплитуды осцилляций частоты таммовских резонансов от толщины слоя эластомера.

Ключевые слова: фотонный кристалл, таммовский резонанс, интерфейс, ферромагнитный эластомер.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64191.87-26

Введение

Свойства СВЧ фотонных кристаллов (ФК), обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой [1–3], позволяют создавать на их основе новые типы структур и СВЧ-устройств с управляемыми параметрами [4–8], а также разрабатывать сенсоры физических величин [9,10] и реализовать высокочувствительные методы измерения параметров материалов [11–13].

Ряд резонансных эффектов связан с возникновением интерфейсных состояний различной природы, в том числе поверхностных таммовских состояний. Известно, что одним из способов, обеспечивающих эффект возникновения таммовских резонансов (ТР), кроме контакта двух ФК с различными размерами элементарных ячеек [14–16], является контакт ФК со средой с отрицательной диэлектрической или магнитной проницаемостью [17–19].

Среды с отрицательной магнитной проницаемостью в СВЧ-диапазоне частот также могут быть созданы в виде композитных структур, состоящих из металлических субволновых элементов, но обладающих резонансными свойствами — искусственные метаматериалы в виде щелевого кольцевого резонатора (SRR — Split Ring Resonator) [20]. Возможность появления отрицательной магнитной восприимчивости у чисто диэлектрических соединений с большой диэлектрической проницаемостью описана в работе [21].

В качестве искусственной среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью может быть использована система из тонких металлических проводов, расположенных параллельно [22]. Триплетный элемент для создания изотропных структур с отрицательной диэлектрической проницаемостью описан в [23].

Искусственная структура, образованная двумя подрешетками сферических частиц из диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью, встроенными в диэлектрическую матрицу с малой диэлектрической проницаемостью, которая обладает одновременно отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостями, представлена в [24].

Использование в качестве интерфейсных слоев ФК сильнолегированных полупроводниковых слоев и металлических нанослоев, также позволяет наблюдать ТР в запрещенных зонах ФК [25].

Применение поглотителей СВЧ-энергии на основе экологически безопасных структур, содержащих воду [26,27] в качестве интерфейса, позволяет реализовать ТР с управляемой частотой и амплитудой [28].

Использование структур на основе композитных материалов, состоящих из полимерной матрицы с диспергированными ферромагнитными нано- или микрочастицами (ферромагнитных эластомеров (ФЭ)), позволяет

создавать поглотители разнообразных форм и различными электромагнитными характеристиками [29]. Такие композиты характеризуются, как правило, одновременно значительной величиной комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостями.

В настоящей работе исследовались резонансные характеристики одномерного СВЧ волноводного ФК, обусловленные возникновением таммовских состояний, при использовании в качестве интерфейса ФЭ, характеризующегося комплексными диэлектрическими и магнитными проницаемостями, величины которых в СВЧ-диапазоне являются частотно-зависимыми. При этом радиопоглощающие свойства интерфейса регулировались введением в ФЭ воздушных включений, а его параметры задавались с помощью эффективных значений диэлектрических и магнитных проницаемостей.

1. Компьютерное моделирование ФК с ФЭ

В диапазоне частот 7–13 GHz смоделированы ФК на основе отрезка прямоугольного волновода с чередующимися слоями керамики Al_2O_3 (толщина 0.5 mm) и тефлона (толщина 18 mm). ФК состояли из 11 слоев, слои полностью заполняли поперечное сечение волновода.

ФК контактировал со слоем ФЭ различной толщины (от 1.0 до 10.0 mm), полностью заполняющим поперечное сечение волновода. Слой ФЭ отделялся от ФК воздушным зазором, толщина L которого могла изменяться. Конструкция волноводного ФК с ФЭ представлена на рис. 1.

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $S_{11}(f)$ и прохождения $S_{21}(f)$ электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, полностью заполняющей волновод по поперечному сечению, может быть применен метод волновой матрицы передачи [30–32].

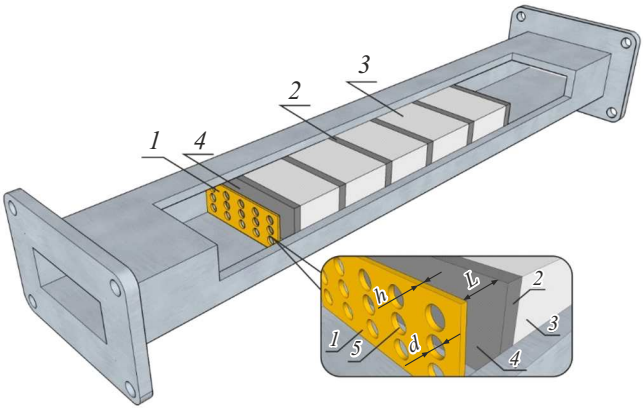


Рис. 1. Конструкция одномерного СВЧ ФК с ФЭ. *1* — слой ФЭ с воздушными включениями, *2* — слой керамики Al_2O_3, *3* — слой тефлона, *4* — воздушный зазор, *5* — воздушное включение.

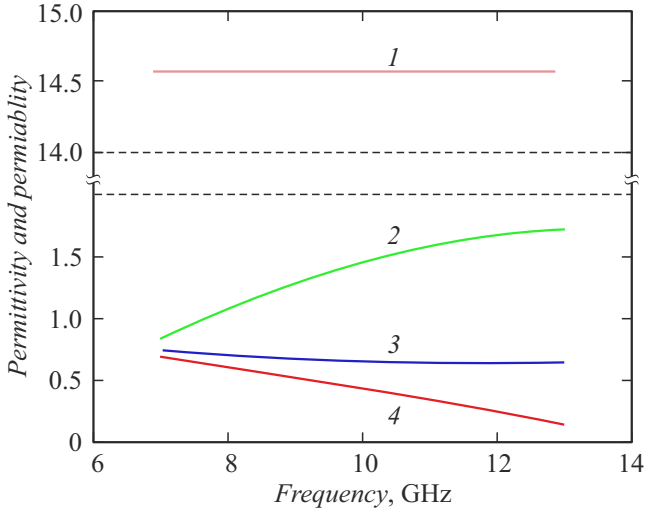


Рис. 2. Экспериментальные частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической $\varepsilon^*(f)$ и магнитной $\mu^*(f)$ проницаемостей слоя ФЭ. *1* — ε', *2* — ε'', *3* — μ', *4* — μ''

Для расчета матриц передачи элементарных четырехполюсников, описывающих отдельные элементы периодической структуры, которые в среднем однородны и полностью заполняют отрезки прямоугольного волновода по поперечному сечению, может быть использовано выражение для волнового сопротивления отрезка прямоугольного волновода, характеризующее распространение волны основного типа H_{10}, в виде [33]:

$$\rho(\omega, \sigma, \varepsilon, b, a, \mu) = \frac{2\omega\mu\mu_0 \frac{b}{a}}{\sqrt{\omega^2\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 + j\omega\sigma\mu\mu_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}.$$

Коэффициенты прохождения S_{11} и отражения S_{21} СВЧ мощности определяются через элементы матрицы передачи.

При расчетах $S_{11}(f)$ и $S_{21}(f)$ фотонного кристалла, выполненных с помощью оригинального программного продукта, созданного в среде Mathcad, использовались экспериментальные значения комплексной диэлектрической $\varepsilon^*(f) = \varepsilon' - i\varepsilon''$ и магнитной проницаемостей $\mu^*(f) = \mu' - i\mu''$ слоя ФЭ, измеренные в диапазоне частот 7–13 GHz (рис. 2).

Образец ФЭ был изготовлен по технологии перехода компаунда на основе порошка марганец-цинкового феррита 1000НМ, силиконового герметика, силиконового низкомолекулярного каучука СКНТ и катализатора из вязкотекучего состояния в резиноподобное состояние.

Частотные зависимости $\varepsilon^*(f)$ и $\mu^*(f)$ были измерены с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A с использованием ПО Agilent 85071E Materials Measurement Software [34].

Применение ФЭ в качестве интерфейса вызывает возникновение в первой и во второй запрещенных зонах на частотах f_{Tamm1} и f_{Tamm2} ТР, характеристики которых зависят от толщины ФЭ (рис. 3).

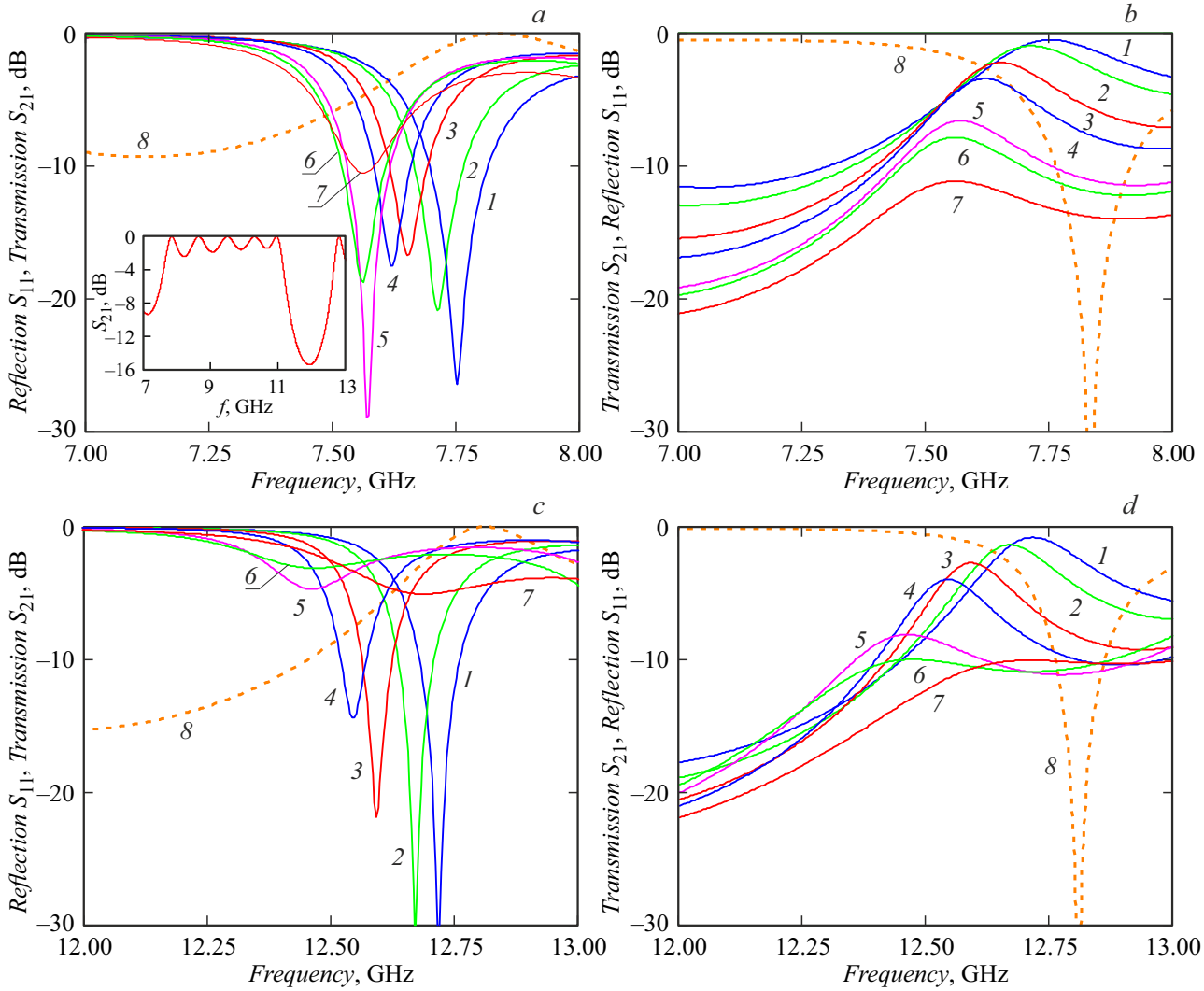


Рис. 3. Расчетные АЧХ: S_{11} (a,c), S_{21} (b,d) ФК с интерфейсом в виде слоя ФЭ при различной толщине слоя h, mm: *1* — 0.3, *2* — 0.5, *3* — 1.0, *4* — 1.4, *5* — 2.4, *6* — 2.8, *7* — 4.0. Кривые *8* (S_{21}) на рисунке (a,c) и кривые *8* (S_{11}) на рисунке (b,d) — отсутствие ФЭ. $L = 0.0$ mm. Вставка на *a* — АЧХ ФК без ФЭ.

При увеличении толщины эластомера наблюдаются затухающие осцилляции частот f_{Tamm1} и f_{Tamm2} ТР в первой (рис. 4, *a*) и второй запрещенных зонах (рис. 4, *b*), обусловленные эффектом полуволнового резонанса в слое ферромагнитного поглотителя. Так, например, осцилляции в первой запрещенной зоне исчезают при толщинах больших ~ 10.0 mm (кривая *1* рис. 4, *a*), а их период составляет ~ 5.5 mm. Во второй зоне осцилляции исчезают при толщинах больших ~ 15.0 mm (кривая *1* рис. 4, *b*) с периодом ~ 4.0 mm.

Увеличение толщины ФЭ также приводит к затухающим осцилляциям коэффициентов отражения (рис. 5, *a*) в первой и второй запрещенных зонах. Величины амплитуд коэффициентов отражения при больших толщинах ФЭ становятся постоянными величинами.

Зависимости амплитуд коэффициентов прохождения (рис. 5, *b*) в первой и второй запрещенных зонах от толщины слоя ферромагнитного эластомера являются монотонно убывающими функциями.

Была исследована возможность управления характеристиками ТР с использованием в качестве интерфейса слоя ФЭ с регулируемыми радиопоглощающими свойствами. Это достигалось введением воздушных включений (позиция *5* на рис. 1) в образцы ФЭ. Исследовались образцы ФЭ с разным диаметром d сквозных круглых отверстий (d, mm: 0.0; 0.6; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5). Количество отверстий оставалось постоянным (15 шт.). Отверстия были распределены равномерно по сечению в три слоя по пять отверстий в каждом слое.

В этом случае параметры ФЭ задавались в виде эффективных значений комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей, которые были получены в результате экспериментальных измерений комплексной диэлектрической $\varepsilon^*(f)$ и магнитной проницаемостей $\mu^*(f)$ слоя ФЭ в диапазоне частот 7–13 GHz.

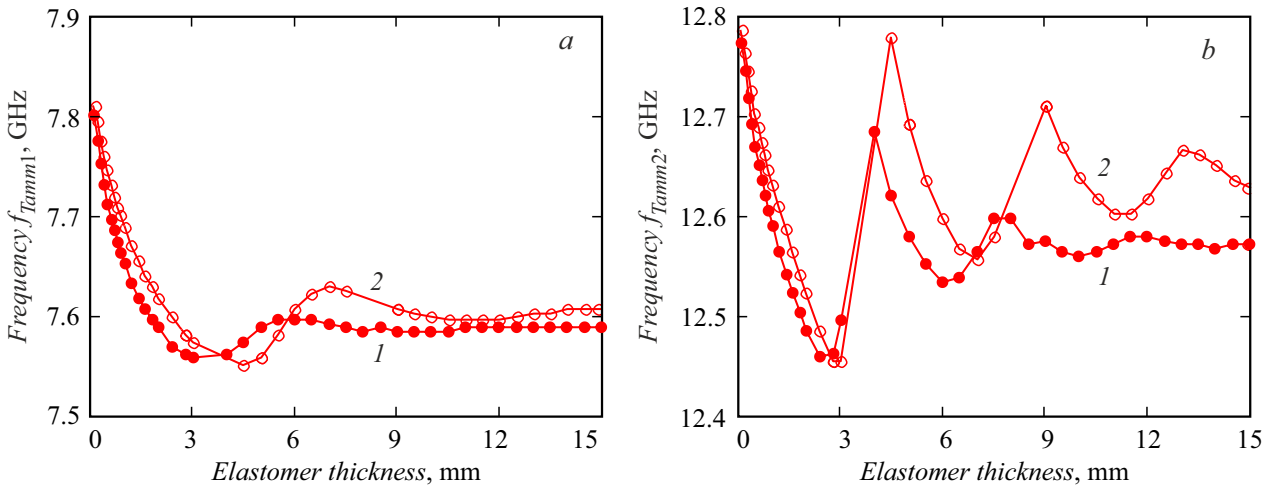


Рис. 4. Зависимости частоты ТР f_{Tamm1} (a) и f_{Tamm2} (b) от толщины h слоя ФЭ. *1* — сплошной образец эластомера, *2* — образец ФЭ с воздушными включениями. $L = 0.0$ mm.

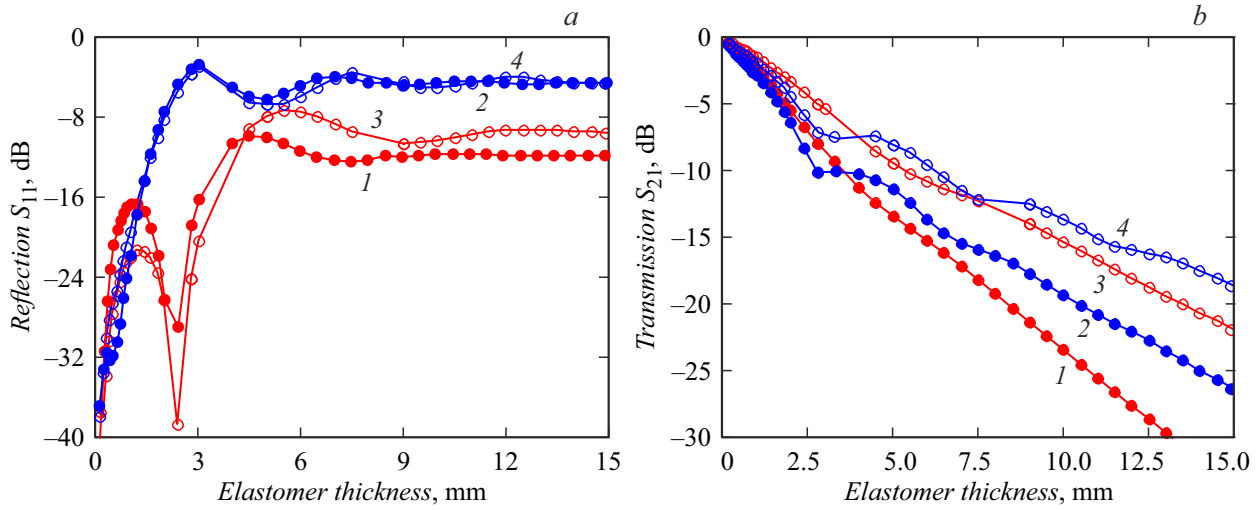


Рис. 5. Зависимости $S_{11Tamm1}$ (кривые *1*, *3* на (a)), $S_{11Tamm2}$ (кривые *2*, *4* на (a)), $S_{21Tamm1}$ (кривые *1*, *3* на (b)) и $S_{21Tamm2}$ (кривые *2*, *4* на (b)) от толщины h слоя ФЭ. Кривые *1*, *2* — сплошной образец, кривые *3*, *4* — образец с воздушными включениями. $L = 0.0$ mm.

Такой подход, основанный на использовании эффективных значений параметров ФЭ, полученных из результатов измерений зависимостей $S_{11}(f)$ и $S_{12}(f)$ [34], позволяет исключить необходимость построения электродинамической модели ФЭ, описывающей зависимости $\varepsilon^*(f)$ и $\mu^*(f)$ с учетом структуры, физических и геометрических параметров отдельных элементов исследуемых образцов [35].

Из результатов измерений $\varepsilon^*(f)$ и $\mu^*(f)$ следует, что увеличение объемной доли воздушных включений приводит к заметному уменьшению эффективных значений как действительной, так и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости ФЭ. При этом величина мнимой части комплексной магнитной проницаемости ФЭ также уменьшается, а величина действительной части комплексной магнитной проницаемости, будучи меньшей единицы в диапазоне частот 7–13 GHz у сплошного образца ФЭ, увеличивается с ростом доли воздушных включений, приближаясь к единице.

Результаты управления характеристиками ТР с использованием в качестве интерфейса слоя ФЭ, содержащего воздушные включения, представлены на рис. 4 и 5.

Результаты расчета частоты ТР при использовании в качестве интерфейса слоя ФЭ, содержащего воздушные включения диаметром $d = 2.0$ mm, от толщины слоя ФЭ представлены на рис. 4 (кривые *2*). Наличие воздушных включений приводит к увеличению периода осцилляций частоты как в первой, так и во второй запрещенных зонах. При этом амплитуды осцилляций частоты во второй запрещенной зоне возрастают сильнее чем в первой.

Создание воздушных включений в слое ФЭ оказывает большее влияние на осцилляции коэффициента

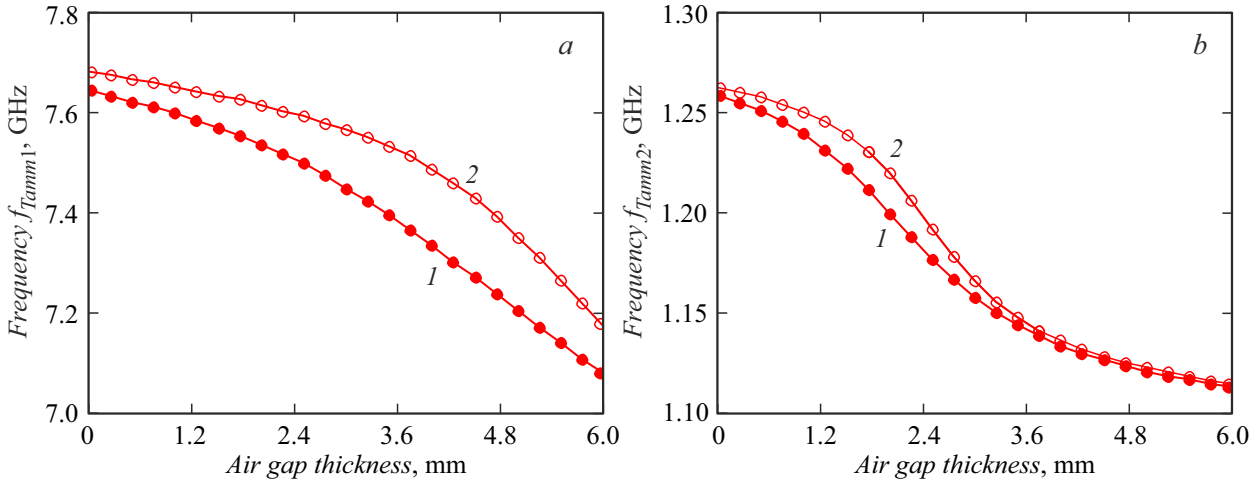


Рис. 6. Зависимости f_{Tamm1} (a) и f_{Tamm2} (b) от величины воздушного зазора L между слоем ФЭ и ФК. *1* — сплошной образец, *2* — образец с воздушными включениями. $H = 1.2$ mm.

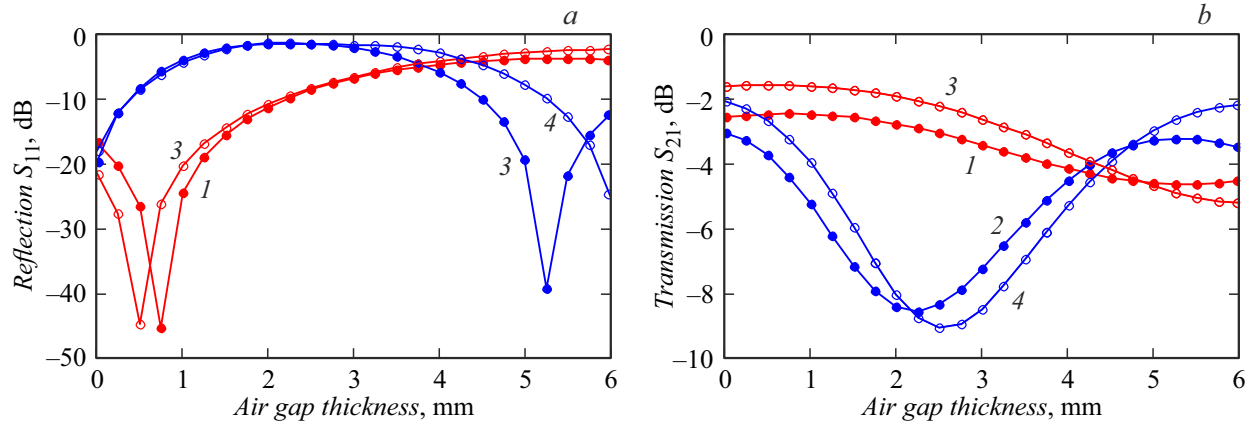


Рис. 7. Зависимости амплитуды $S_{11Tamm1}$ в первой (кривые *1*, *3* (a)) и $S_{11Tamm2}$ во второй запрещенной зоне (кривые *2*, *4* (a)) ТР и $S_{21Tamm1}$ в первой (кривые *1*, *3* (b)) и $S_{21Tamm2}$ во второй запрещенной зоне (кривые *2*, *4* (b)) от величины зазора L между слоем ФЭ и ФК. $h = 1.2$ mm.

отражения на частоте ТР в первой запрещенной зоне (кривая *3* на рис. 5, *a*). При этом амплитуда коэффициента отражения при больших толщинах ФЭ принимает большее значение, по сравнению со случаем отсутствия воздушных включений. Влияние воздушных включений в ФЭ на коэффициент отражения на частоте ТР во второй высокочастотной запрещенной зоне практически незаметно.

При наличии воздушных включений зависимости амплитуды коэффициента прохождения в первой и второй запрещенных зонах остаются монотонно убывающими функциями от толщины слоя ФЭ (кривые *3*, *4* на рис. 5, *b*), но величина коэффициента прохождения становится больше, вследствие уменьшения мнимых частей комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей.

При этом величина коэффициента прохождения, как и в случае использования сплошного ФЭ, при толщинах, меньших 4.0 mm, больше в первой запрещенной зоне, а при толщинах, больших 4.0 mm, больше во второй запрещенной зоне.

Положение ТР зависит не только от электрофизических параметров и геометрических размеров слоя ФЭ, но и от его расположения относительно ФК.

Изменение частоты и амплитуды ТР при модификации интерфейса в виде введения воздушного зазора между ФЭ и ФК представлены на рис. 6 и 7. Такая модификация, как следует из представленных результатов, увеличением величины воздушного зазора L приводит к уменьшению частоты ТР в первой и второй запрещенных зонах (рис. 6).

В то же время амплитуды S_{11Tamm} и S_{21Tamm} ТР с увеличением воздушного зазора L в диапазоне 0–6 mm изменяются немонотонно: $S_{11Tamm1}(L)$ характеризуется минимумом при толщине 0.75 mm (кривая *1* на рис. 7, *a*), а $S_{11Tamm2}(L)$ характеризуется минимумом при толщине

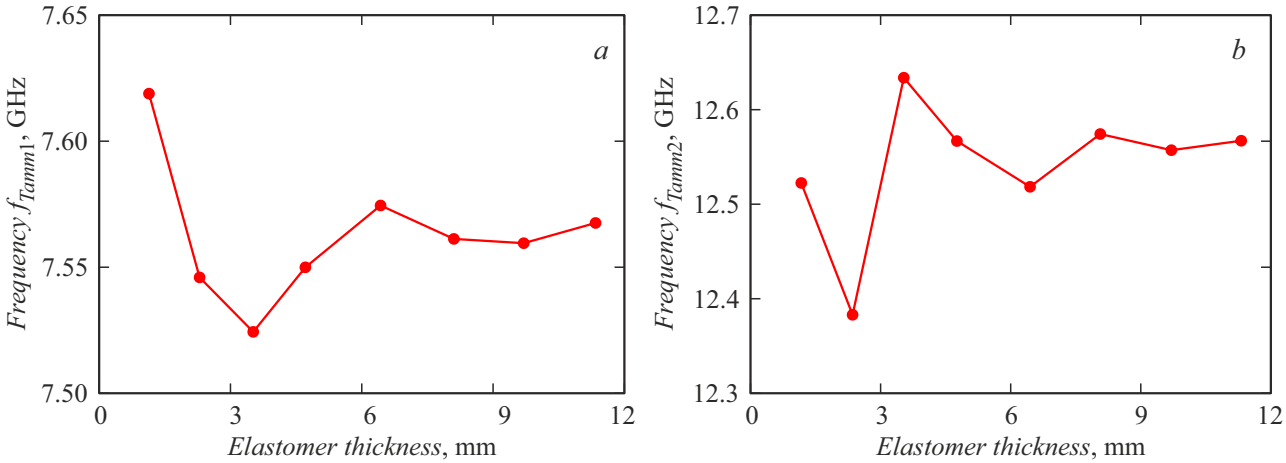


Рис. 8. Зависимости частоты ТР f_{Tamm1} (a) и f_{Tamm2} (b) от толщины h слоя ФЭ. $L = 0.0$ mm.

зазора 5.25 mm (кривая *2* на рис. 7, a). Коэффициент прохождения в первой запрещенной зоне $S_{21Tamm1}$ на частоте ТР характеризуется слабо выраженной немонотонной зависимостью (кривая *1* на рис. 7, b) от величины зазора L, а коэффициент прохождения $S_{21Tamm2}$ на частоте ТР (кривая |it 2 на рис. 7, b) минимален при $L = 2.25$ mm. При этом зазоре $S_{11Tamm2}$ достигает максимального значения (кривая *2* на рис. 7, a). Следовательно, при фиксированной толщине h слоя ФЭ амплитуды ТР могут регулироваться с помощью изменения величины L воздушного зазора.

Результаты расчета частоты и амплитуды ТР при использовании в качестве интерфейса слоя ФЭ, содержащего воздушные включения диаметром $d = 2.0$ mm, от величины зазора между слоем ФЭ и ФК представлены на рис. 6 (кривые *1*, *2*) и рис. 7 (кривые *3*, *4*) соответственно. Как и в случае сплошного ФЭ, наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов, при этом кривизна кривых $f(L)$ изменяется и значения частоты таммовских резонансов сдвигаются в высокочастотную область. Немонотонность зависимостей амплитуды S_{11Tamm} и S_{21Tamm} ТР от величины воздушного зазора L сохраняется. Однако частоты резонансных особенностей этих кривых изменяются: резонанс амплитуды S_{11Tamm} в первой запрещенной зоне сдвигается в область меньших значений зазора, а во второй зоне — в область больших значений зазора и наблюдается при $L = 6.25$ mm.

При этом минимум резонанса коэффициента прохождения, соответствующий максимуму коэффициента отражения, сдвигается в область больших значений зазора.

Расчет, выполненный при увеличенных значениях толщины образца ФЭ, свидетельствует, что при увеличении толщины ФЭ наблюдается сдвиг частоты ТР в низкочастотную область, и частоты, соответствующие резонансным особенностям S_{11Tamm} и S_{21Tamm}, реализуются при меньших значениях зазора как в первой, так и во второй запрещенных зонах.

Можно сделать вывод, что в определенной мере свойства слоя ФЭ, как интерфейса СВЧ ФК, определяются его эффективной толщиной, зависящей от геометрической толщины и эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей, и структурой интерфейса.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Характеристики экспериментально исследованного макета одномерного ФК соответствовали расчетной модели. Измерения были выполнены с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A в диапазоне частот 7–13 GHz.

Экспериментально исследовались характеристики ТР при различных значениях толщины слоя ФЭ (рис. 8 и 9).

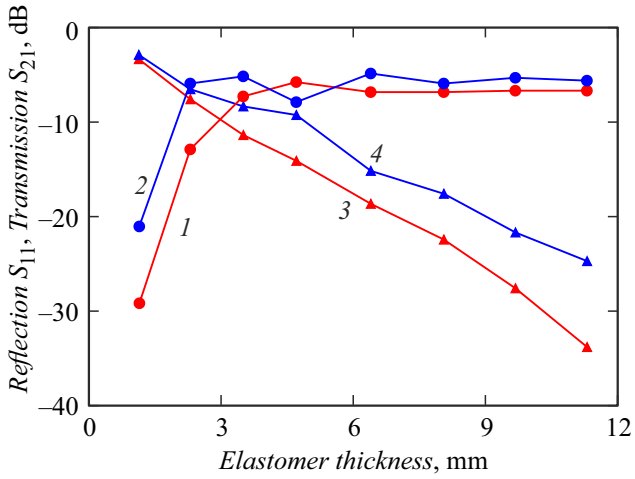


Рис. 9. Зависимости амплитуд ТР $S_{11Tamm1}$ (кривая *1*) в первой и $S_{11Tamm2}$ (кривая *2*) во второй запрещенных зонах и амплитуд ТР $S_{21Tamm1}$ (кривая *3*) в первой и $S_{21Tamm2}$ (кривая *4*) от толщины h слоя ФЭ. $L = 0.0$ mm.

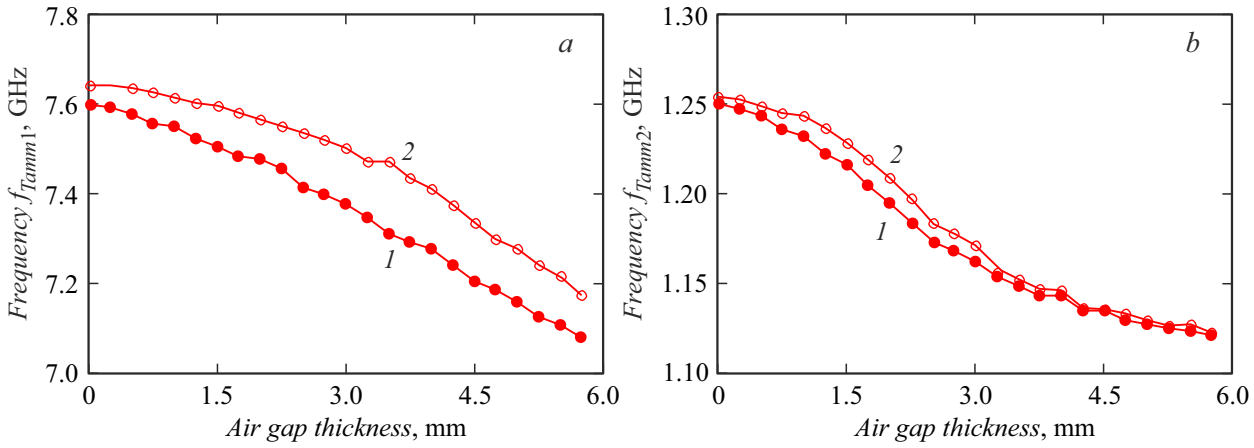


Рис. 10. Экспериментальные зависимости f_{Tamm1} (a) и f_{Tamm2} (b) от величины зазора. *1* — сплошной образец, *2* — образец с воздушными включениями.

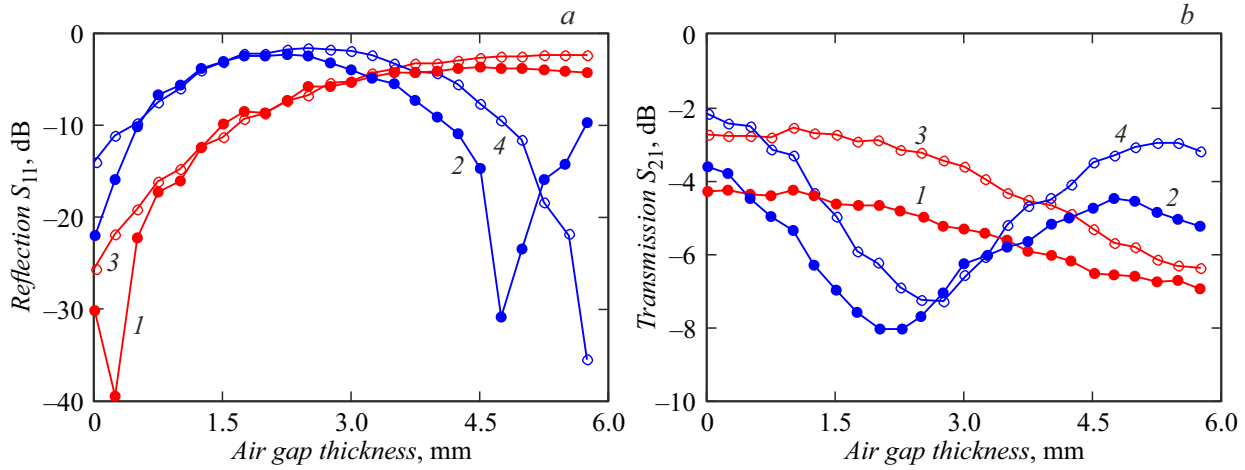


Рис. 11. Зависимости амплитуды ТР S_{11} (a) и S_{21} (b) в первой (кривые *1*, *3*) и во второй (кривые *2*, *4*) запрещенных зонах от величины зазора для сплошного ФЭ (сплошные кружки) и с воздушными включениями (окружности).

Увеличение толщины слоя ФЭ приводит к затухающим осцилляциям частоты ТР f_{Tamm1} в первой (рис. 8, *a*) и f_{Tamm2} во второй (рис. 8, *b*) запрещенных зонах, что соответствует результатам компьютерного моделирования.

Экспериментальные частотные зависимости S_{11} (кривые *1*, *2*) и S_{21} (кривые *3*, *4*) на частоте ТР в первой (кривые *1*, *3*) и второй (кривые *2*, *4*) запрещенных зонах при использовании в качестве интерфейса слоя ФЭ при различных значениях толщины h и величине зазора $L = 0.0$ mm представлены на рис. 9.

Создание воздушного зазора между ФК и слоем ФЭ приводило к изменению частоты и амплитуды ТР. Величина зазора фиксировалась с помощью тонких металлических диафрагм разной толщины с отверстием 23×10 mm.

Для исследования влияния изменения диэлектрических и магнитных характеристик (радиопоглощающих свойств) интерфейсного слоя на спектральные характеристики СВЧ ФК были использованы рассмотренные выше образцы ФЭ с воздушными включениями в виде сквозных круглых отверстий.

Экспериментальные зависимости частоты ТР при использовании в качестве интерфейса сплошного слоя ФЭ толщиной $h = 1.2$ mm (кривые *1*) и слоя ФЭ, содержащего воздушные включения диаметром 2.0 mm (кривые *2*), от величины воздушного зазора между слоем ФЭ и ФК представлены на рис. 10.

При использовании ФЭ с воздушными включениями наблюдается монотонное уменьшение частоты таммовских резонансов с увеличением воздушного зазора, однако кривизна кривых $f(L)$ по сравнению со сплошным ФЭ изменяется. Создание воздушных включений сильнее сказывается на зависимости $f(L)$ в первой запрещнной зоне (рис. 10, *a*), что соответствует результатам компьютерного моделирования.

Для обоих типов ФЭ наблюдается немонотонность зависимостей амплитуды коэффициентов отражения

S_{11Tamm} и прохождения S_{21Tamm} ТР от величины воздушного зазора L (рис. 11).

На зависимости $S_{11Tamm1}(L)$ в случае сплошного ФЭ наблюдается резонанс при $L = 0.25\,\text{mm}$ (кривая *1* на рис. 11, *a*), а на зависимости $S_{11Tamm2}(L)$ при $L = 4.75\,\text{mm}$ (кривая *2* на рис. 11, *a*).

При использовании эластомера с воздушными включениями зависимость $S_{11Tamm1}(L)$ сдвигается в сторону меньших величин зазоров, а зависимость $S_{11Tamm2}(L)$ сдвигается в сторону больших величин зазоров. Это соответствует результатам компьютерного моделирования. Вследствие этого на зависимости $S_{11Tamm1}(L)$ резонанс при малой величине зазора не наблюдается (кривая *3* на рис. 11, *a*), а на зависимости $S_{11Tamm2}(L)$ он реализуется при $L = 5.75\,\text{mm}$ (кривая *4* на рис. 11, *a*).

Следовательно, можно сделать вывод о соответствии применяемой математической модели с использованием эффективных диэлектрических и магнитных проницаемостей ФЭ для описания ФК с интерфейсом в виде ФЭ, радиопоглощающие свойства которого могут быть модифицированы введением воздушных включений. Степень выраженности ТР определяется толщиной и эффективными диэлектрическими и магнитными проницаемостями эластомера, и расположением ФЭ относительно ФК.

Заключение

В работе рассмотрены характеристики ФК с интерфейсом из ФЭ, обладающим свойствами поглотителя СВЧ-энергии.

Анализ амплитудно-частотных характеристик ФК выполнен с использованием волновых матриц передачи с учетом частотных зависимостей комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей ФЭ.

Показано, что амплитуда и частота ТР регулируется толщиной слоя эластомера и толщиной воздушного зазора между фотонным кристаллом и слоем эластомера.

При увеличении толщины слоя ФЭ наблюдаются затухающие осцилляции частот и амплитуд коэффициентов отражения ТР и монотонное уменьшение амплитуд коэффициентов прохождения ТР.

В то же время частотное положение таммовских резонансов в запрещенных зонах, определяемое расположением ФЭ относительно ФК, характеризуется монотонным уменьшением частоты таммовских резонансов в первой и второй запрещенных зонах с увеличением воздушного зазора между слоем ФЭ и ФК.

Установлено, что при фиксированных параметрах ФЭ управление амплитудой коэффициентов отражения и прохождения ТР может быть обеспечено изменением структуры интерфейса, а именно изменением величины воздушного зазора между слоем ФЭ и ФК.

При реализации ФК с интерфейсом в виде ФЭ, радиопоглощающие свойства которого регулируются введением воздушных включений, равномерно распределенных по его сечению, характеристики ТР были учтены использованием экспериментально измеренных частотных зависимостей эффективных диэлектрических и магнитных проницаемостей ФЭ.

Показано, что наличие воздушных включений приводит к увеличению периода осцилляций частоты от толщины слоя эластомера как в первой, так и во второй запрещенных зонах. При этом наблюдается возрастание амплитуды осцилляций частоты в первой и, более сильное, во второй запрещенных зонах.

Экспериментальные данные подтверждают эффект возникновения фотонных ТР при использовании в качестве интерфейса ФЭ, радиопоглощающие свойства которого регулируются введением воздушных включений, равномерно распределенных по его сечению.

Полученная информация о характеристиках таммовских резонансов может быть применена для верификации свойств поглотителей СВЧ-энергии на основе композитных материалов, состоящих из полимерной матрицы с диспергированными ферромагнитными нано- или микрочастицами.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00199).

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/UFNr.2019.03.038543 [M.V. Rybin, M.F. Limonov. Phys. Usp., **62** (8), 823 (2019). DOI: 10.3367/UFNe.2019.03.038543]

[2] C. Sibilia, T.M. Benson, M. Marciniak, T. Szoplik. *Photonic crystals: physics and technology* (Springer-Verlag Italia, Milano, 2008), DOI: 10.1007/978-88-470-0844-1

[3] D.A. Usanov, S.A. Nikitov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev. *One-dimensional microwave photonic crystals: new applications* (CRC Press, Boca Raton, USA, 2019), DOI: 10.1201/9780429276231

[4] Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, В.Ф. Шабанов. ДАН, **467** (4), 400 (2016). DOI: 10.7868/S086956521610008X [B.A. Belyaev, S.A. Khodenkov, V.F. Shabanov. Doklady Physics, **61** (4), 155 (2016). DOI: 10.1134/S1028335816040017]

[5] E. Ozbay, B. Temelkuran, M. Bayindir. PIER, **41**, 185 (2003). DOI: 10.2528/PIER02010808

[6] H.C.C. Fernandes, J.L.G. Medeiros, I.M.A. Junior, D.B. Brito. PIERS Online, **3** (5), 689 (2007). DOI: 10.2529/PIERS060901105337

[7] Y. Wang, D. Zhang, S. Xu, B. Xu, Z. Dong, Q. Xue. IEEE Photon. J., **10** (3), 1 (2017). DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2783341

[8] Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, С.Г. Евтеев, Д.В. Пономарёв. Радиотехника и электроника, **64** (4), 375 (2019). DOI: 10.1134/S0033849419040107 [D.A. Usanov, S.A. Nikitov, A.V. Skripal, M.K. Merdanov, S.G. Evteev, D.V. Ponomarev. J. Commun. Technol. Electron., **64** (4), 399 (2019). DOI: 10.1134/S1064226919040107]

[9] Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang, Hai Xiao, Jun Fan. Appl. Phys. Lett., **99** (11), 113517 (2011). DOI: 10.1063/1.3636406

[10] Jie Huang, Tao Wei, Xinwei Lan, Jun Fan, 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

[11] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев. ЖТФ, **80** (8), 143 (2010). [D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.V. Abramov, A.S. Bogolyubov, M.Yu. Kulikov, D.V. Ponomarev. Tech. Phys., **55** (8), 1216 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210080220]

[12] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Романов. ЖТФ, **81** (1), 106 (2011). [D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.V. Romanov. Tech. Phys., **56** (1), 102 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211010257].

[13] F. Grine, H. Ammari, M.T. Benhabiles, M.L. Riabi, T. Djerafi. IEEE Sensors J., **21** (17), 18443 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3090327

[14] А.П. Виноградов, А.В. Дорофеенко, А.М. Мерзликин, А.А. Лисянский. УФН, **180** (3), 249 (2010). DOI: 10.3367/UFNr.0180.201003b.0249 [A.P. Vinogradov, A.V. Dorofeenko, A.M. Merzlikin, A.A. Lisyansky. Phys. Usp., **53** (3), 243 (2010). DOI: 10.3367/UFNe.0180.201003b.0249]

[15] A.V. Kavokin, I.A. Shelykh, G. Malpuech. Phys. Rev. B, **72** (23), 233102 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.233102

[16] Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.С. Рязанов. ЖТФ, **88** (7), 1046 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46175.2561 [D.A. Usanov, S.A. Nikitov, A.V. Skripal, D.S. Ryazanov. Tech. Phys., **63** (7), 1046 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218070307].

[17] M. Kaliteevski, I. Iorsh, S. Brand, R.A. Abram, J.M. Chamberlain, A.V. Kavokin, I.A. Shelykh. Phys. Rev. B, **76** (16), 165415 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevB.76.165415

[18] R.G. Bikbaev, S.Ya. Vetrov, I.V. Timofeev. J. Opt., **19** (1), 015104 (2017). DOI: 10.1088/2040-8986/19/1/015104

[19] T. Goto, A.V. Dorofeenko, A.M. Merzlikin, A.V. Baryshev, A.P. Vinogradov, M. Inoue, A.A. Lisyansky, A.B. Granovsky. Phys. Rev. Lett., **101** (11), 113902 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.113902

[20] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **47** (11), 2075 (1999). DOI: 10.1109/22.798002

[21] S. O'Brien, J.B. Pendry. J. Phys.: Condensed Matter, **14** (15), 4035 (2002). DOI: 10.1088/0953-8984/14/15/317

[22] W. Rotman. IRE Trans. Ant. Propagat, **10** (1), 82 (1962). DOI: 10.1109/tap.1962.1137809

[23] M. Hudlička, J. Machač, I.S. Nefedov. PIER, **65**, 233 (2006). DOI: 10.2528/PIER06102703

[24] И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, М.С. Гашинова. Письма в ЖТФ, **32** (10), 30 (2006). [I.B. Vendik, O.G. Vendik, M.S. Gashinova. Tech. Phys. Lett., **32** (5), 429 (2006). DOI: 10.1134/S106378500605018X].

[25] A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, A.A. Komarov. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **68** (12), 5115 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.3021412

[26] J. Wen, Q. Zhao, R. Peng, H. Yao, Y. Qing, J. Yin, Q. Ren. Opt. Mater. Express, **12** (4), 1461 (2022). DOI: 10.1364/OME.455723

[27] Y.J. Yoo, S. Ju, S.Y. Park, Y.Ju Kim, J. Bong, T. Lim, K.W. Kim, J.Y. Rhee, Y. Lee. Scientific Reports, **5** (1), 14018 (2015). DOI: 10.1038/srep14018

[28] А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, М.А. Волшаник. Письма в ЖТФ, **51** (22), 13 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.22.61577.20348

[29] F. Qin, M. Peng, D. Estevez, C. Brosseau. J. Appl. Phys., **132** (10), 101101 (2022). DOI: 10.1063/5.0099072

[30] Д.М. Сазонов. *Антенны и устройства СВЧ*: учеб. для радиотехнич. спец. вузов (Высшая школа, М., 1988).

[31] А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. *Справочник по элементам волноводной техники* (Советское радио, М., 1967), 2-е изд., перераб. и доп.

[32] 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]

[33] И.В. Лебедев. *Техника и приборы СВЧ* (Высшая школа, М., 1970)

[34] Agilent 85071E Materials Measurement Software. Technical Overview. Available at: https://hibp.ecse.rpi.edu/~connor/RF/Antenna%20Disk%20from%20Electrorent/Materials%20Measurements/85071E%20overview%205988-9472EN.pdf (accessed December 24, 2025)

[35] С.Н. Старостенко, К.Н. Розанов, А.Н. Лагарьков. Физика металлов и металловедение, **122** (4), 347 (2021). DOI: 10.31857/S0015323021040100 [S.N. Starostenko, K.N. Rozanov, A.N. Lagar'kov. Phys. Metals and Metallography, **122** (4), 323 (2021). DOI: 10.1134/S0031918X21040104]