
РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 621.372.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КООКСИАЛЬНОЙ БРЭГГОВСКОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

© 2020 г. **Д. А. Усанов^а, С. А. Никитов^б, А. В. Скрипаль^{а, *},
Д. В. Пономарев^а, О. М. Рузанов^а, И. О. Тимофеев^а**

^аСаратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Российская Федерация

^бИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: skripala_v@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 24.04.2019 г.

После доработки 25.05.2019 г.

Принята к публикации 30.05.2019 г.

Предложена и реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков с использованием СВЧ коаксиального фотонного кристалла. В основу метода измерения положено решение обратной задачи, основанное на минимизации разности экспериментальных и расчетных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне фотонного СВЧ-кристалла, содержащего структуру с искомыми параметрами. Установлено, что для обеспечения однозначного решения обратной задачи следует выбирать дефектную моду в запрещенной зоне, на частоте которой в области расположения измеряемой структуры наблюдается максимум стоячей волны.

DOI: 10.31857/S0033849420040099

ВВЕДЕНИЕ

Периодические СВЧ-структуры, называемые брэгговскими СВЧ-структурами или фотонными СВЧ-кристаллами, привлекают интерес исследователей в связи с перспективой создания устройств с уникальными характеристиками в СВЧ-диапазоне: измерительных устройств, согласованных нагрузок, различного типа фильтров и других [1]. К настоящему времени такие структуры созданы на основе прямоугольных волноводов, микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линий передачи [2–8]. Однако наиболее распространенными типами волноведущих систем, используемых в технике СВЧ, являются коаксиальные кабели.

Коаксиальные брэгговские структуры могут быть использованы для работы как в СВЧ-, так и ВЧ-диапазонах. Для создания коаксиальных брэгговских структур, работающих в ВЧ-диапазоне и в низкочастотной части сантиметрового диапазона, могут быть использованы как серийные коаксиальные коннекторы (соединители в виде “тройников” и “бочек”) [9], так и длинные отрезки коаксиального кабеля с различным характеристическим сопротивлением [10].

В настоящее время для реализации СВЧ коаксиальной брэгговской структуры периодическая модуляция постоянной распространения электромагнитной волны вдоль длины отрезка СВЧ-коаксиала в ряде случаев осуществляется посредством создания отверстий [11–14] или поперечных разрывов [15] в диэлектрическом заполнении и металлической оболочке коаксиала.

Такие коаксиальные брэгговские структуры используются в качестве сенсоров физических величин и параметров материальных сред.

Авторами [11, 12] рассмотрены коаксиальные брэгговские структуры, изготовленные путем сверления отверстий в кабеле на равных расстояниях друг от друга вдоль осевого направления. При этом размер отверстий был существенно меньше расстояния между ними, что приводило к возникновению резонансных пиков на дискретных частотах в спектрах отражения и пропускания коаксиальных структур. На основе брэгговских структур были созданы датчики деформаций.

Авторы [13, 14] использовали отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями во внешнем проводнике для измерения диэлектрической проницаемости исследуемых веществ, заполняющих отверстия коаксиаль-

ного кабеля, и температуры при использовании специальных типов коаксиальных решеток, изготовленных из материалов с известными температурными и диэлектрическими свойствами.

В работе [15] были успешно реализованы длиннопериодные брэгговские решетки в коаксиальных линиях передачи, посредством удаления коротких участков диэлектрического заполнения и металлической оболочки коаксиала, что позволило создавать сенсоры, чувствительные к механическим напряжениям в широком диапазоне значений.

Для расчета коэффициентов прохождения и отражения брэгговских структур одним из наиболее часто применяемых методов является метод матриц передачи, при использовании которого брэгговская структура представляется в виде последовательно чередующихся участков с различными значениями волновых сопротивлений и постоянных распространения электромагнитной волны. Такой подход к описанию характеристик брэгговских структур обеспечивает возможность реализации методов многопараметровых измерений характеристик материалов и структур, в том числе нанометровых размеров, с использованием одномерных фотонных кристаллов (ФК) [1, 16, 17]. При этом в основу методов измерения характеристик материалов и структур может быть положено решение обратной задачи, основанное на минимизации разности экспериментальных и расчетных спектров отражения и пропускания СВЧ фотонных кристаллов, включающих структуры с искомыми параметрами.

Для успешной реализации такого способа измерений необходимо решение “прямой” задачи, обеспечивающее как можно более высокоточное согласование теории с экспериментом. Возможность использования достаточно простых, но строгих моделей для описания элементов ФК резко сокращает время, требуемое для реализации прямой задачи. В противном случае этап нахождения искомых измеряемых параметров при решении обратной задачи может быть практически не реализуем из-за погрешностей при расчете или требования нереально высоких затрат машинного времени.

Отметим, что для описания структур, создаваемых с использованием отрезков с нарушениями в диэлектрическом заполнении и металлической оболочке коаксиала, необходимо получить матрицу передачи, описывающую данный элемент как четырехполюсник с известными характеристиками. Однако это невозможно сделать без привлечения методов трехмерного электродинамического моделирования [11, 12, 15].

Отметим, что поскольку коаксиальная линия широко используется при создании твердотельных СВЧ-устройств, то измерения параметров материалов и структур, которые предполагается

применять совместно с коаксиальной линией, полезно производить с использованием коаксиальных трактов.

В данной работе в качестве СВЧ коаксиальной брэгговской структуры, применение которой в качестве сенсора обеспечивает реализацию методики измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов и структур, рассмотрена измерительная секция в виде разборного отрезка коаксиальной линии передачи, внутри которого формируется коаксиальный фотонный кристалл (КФК) в виде периодически изменяющейся диэлектрической проницаемости диэлектрического наполнения. При этом измеряемый образец выполняет роль нарушения периодичности брэгговской структуры, что приводит к возникновению дефектной моды в запрещенной зоне на его амплитудно-частотной характеристике.

Использование предлагаемой брэгговской структуры в качестве сенсора позволяет получить аналитическое описание электродинамических характеристик измеряемой структуры и определить параметры измеряемого образца на основе строгого решения обратной задачи без привлечения методов трехмерного электродинамического моделирования. Поскольку при таком подходе резко упрощается расчет спектров отражения и пропускания СВЧ ФК, содержащих измеряемые образцы, то становится возможным использование брэгговских сенсорных структур, образованных элементами, параметрами которых могут варьироваться в широком диапазоне значений в зависимости от типа измеряемых образцов.

Отметим, что в известных публикациях исследования, как правило, проводились для длинноволновой части СВЧ-диапазона. В данной работе поставленная задача решалась для наиболее часто используемого на практике трехсантиметрового диапазона длин волн.

1. МОДЕЛЬ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

В качестве КФК был выбран отрезок коаксиала со структурой, представляющей собой периодически чередующиеся слои двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости.

Были рассмотрены одномерные КФК (рис. 1), составленные из 11 слоев, в диапазоне частот 1...12 ГГц. Нечетные слои ФК представляли собой отрезки с диэлектрическим заполнением из тефлона ($\epsilon = 2.1$), четные – отрезки с воздушным заполнением ($\epsilon = 1$). Длина нечетных отрезков 8 мм, четных 22.56 мм. У внешнего проводника $d_{\text{внеш}}$ внутренний диаметр составлял 7 мм, у внутреннего проводника $d_{\text{внутр}}$ внешний диаметр равен 3 мм.

Для расчета коэффициента прохождения и отражения электромагнитной волны в КФК использовалась матрица передачи $\mathbf{T}$ четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T[1,1] & T[1,2] \\ T[2,1] & T[2,2] \end{pmatrix} = \mathbf{T}'_N \times \prod_{i=1}^{N-1} (\mathbf{T}''_{i,i+1} \times \mathbf{T}'_i), \quad (1)$$

где $\mathbf{T}'_i$ и $\mathbf{T}''_{i,i+1}$ — матрицы передачи четырехполюсников, описывающих соответственно i -й отрезок и прямое соединение i -го и $(i+1)$ -го отрезков коаксиальной линии передачи.

Выражения для матриц передачи $\mathbf{T}'_i$ и $\mathbf{T}''_{i,i+1}$ соответствующих элементарных четырехполюсников имеют вид [18, 19]

$$\mathbf{T}'_i = \begin{pmatrix} \exp(\gamma_i l_i) & 0 \\ 0 & \exp(-\gamma_i l_i) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T}''_{i,i+1} = \begin{pmatrix} \frac{r_{i,i+1} + 1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} & \frac{r_{i,i+1} - 1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} \\ \frac{r_{i,i+1} - 1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} & \frac{r_{i,i+1} + 1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь l_i — длина i -го отрезка, γ_i — постоянная распространения электромагнитной волны в i -м отрезке, $r_{i,i+1} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$, где ρ_i — волновое сопротивление i -го отрезка коаксиальной линии передачи с диэлектрической проницаемостью заполнения ϵ , рассчитываемое по формуле

$$\rho = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \left(\frac{d_{\text{внеш}}}{d_{\text{внутр}}} \right). \quad (4)$$

Постоянная распространения γ_i имеет вид

$$\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i, \quad (5)$$

где $\alpha_i = \alpha_{mi} + \alpha_{di}$ — постоянная затухания i -го отрезка коаксиальной линии [18], равная сумме постоянных затухания в металлических проводниках α_{mi} и в диэлектрическом наполнении α_{di} ; $\beta_i = 2\pi/\lambda_i$ — фазовая постоянная, где λ_i — длина электромагнитной волны в i -м отрезке коаксиальной линии.

Постоянные затухания α_{mi} , α_{di} имеют вид

$$\alpha_{mi} = \frac{0.023 R_s (d_{\text{внеш}} + d_{\text{внутр}}) \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}}{d_{\text{внеш}} d_{\text{внутр}} \ln \left(\frac{d_{\text{внеш}}}{d_{\text{внутр}}} \right)}, \quad (6)$$

$$\alpha_{di} = \frac{27.3 \text{tg} \delta \sqrt{\epsilon}}{\lambda}, \quad (7)$$

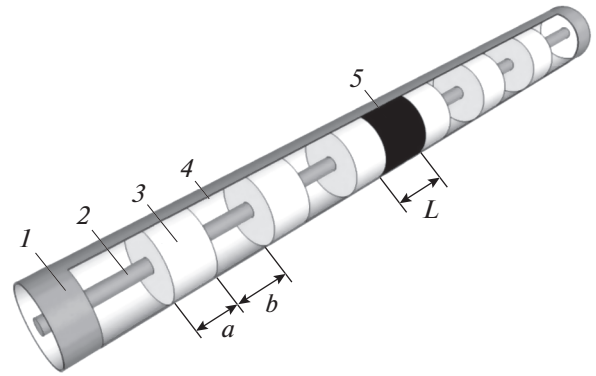


Рис. 1. Конструкция одномерного СВЧ КФК с нарушением периодичности: 1 и 2 — внешний и внутренний проводники, 3 и 4 — элементы, образующие периодическую структуру, 5 — нарушение; a , b , L — длины нечетных, четных отрезков КФК и отрезка с нарушением соответственно.

где μ — магнитная проницаемость диэлектрического наполнения, R_s — удельное поверхностное сопротивление проводника, $\text{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Коэффициенты прохождения и отражения СВЧ-мощности определяются через элементы матрицы передачи $\mathbf{T}$ по известным соотношениям [19]:

$$D = \frac{1}{|T[1,1]|^2}, \quad (8)$$

$$R = \frac{|T[2,1]|^2}{|T[1,1]|^2}. \quad (9)$$

Сопротивление нагрузки на входе и выходе фотонной структуры составляло 50 Ом.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения 11-слойного СВЧ КФК были рассчитаны для двух вариантов: без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) (см. рис. 1), с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне 0...12 ГГц. Результаты приведены на рис. 2.

Параметры структуры фотонного кристалла были выбраны таким образом, что электрические длины четных элементов, составляющих фотонный кристалл, оказывались кратными длинам нечетных элементов (кратность равна 2).

Как следует из результатов расчета, при выбранных параметрах структуры фотонного кристалла в диапазоне частот 0...12 ГГц на АЧХ наблюдались

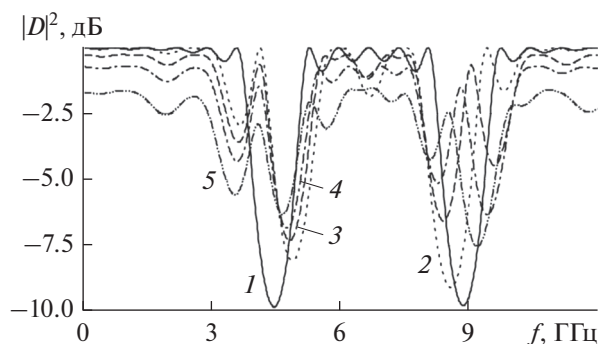


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ КФК без нарушения периодичности (1) и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости (отн. ед.): $\epsilon = 1$ (2), $1.5 - 0.02i$ (3), $2 - 0.06i$ (4), $3 - 0.17i$ (5); $L = 10$ мм.

две запрещенные зоны равной глубины, разделенные разрешенной зоной (см. кривая 1 на рис. 2).

При создании нарушения периодичности в виде измененной длины и диэлектрической проницаемости центрального, 6-го слоя, в первой и второй запрещенных зонах возникают дефектные моды, форма которых и частотное положение f_1 и f_2 зависят от значения диэлектрической проницаемости вносимого нарушения. При этом оказывается, что изменения резонансной частоты Δf_1 и Δf_2 дефектных мод при изменении диэлектрической проницаемости образца, выполняющего роль нарушения в центральном слое, различны. Для выяснения причин различной чувствительности дефектных мод к изменению диэлектрической проницаемости были выполнены расчеты распределения напряженности электрического поля $E(z)$ электромагнитной волны вдоль структуры ФК на резонансных частотах f_1 и f_2 дефектных мод с использованием программы трехмерного электродинамического моделирования HFSS. Результаты расчета распределения напряженности электрического поля $E(z)$ электромагнитной волны вдоль структуры одномерного СВЧ КФК представлены на рис. 3.

Как следует из результатов расчета, на частоте дефектной моды $f_1 = 4.113$ ГГц в области расположения дефекта наблюдается узел стоячей волны, а на частоте дефектной моды $f_2 = 9.382$ ГГц в области расположения дефекта наблюдается пучность стоячей волны. Данная ситуация обусловлена следующими двумя причинами.

1. Для рассматриваемой брэгговской структуры на частоте f_1 длина электромагнитной волны λ_1 значительно больше электрической длины нарушения $\epsilon^{1/2}L$, поэтому на длине нарушения не

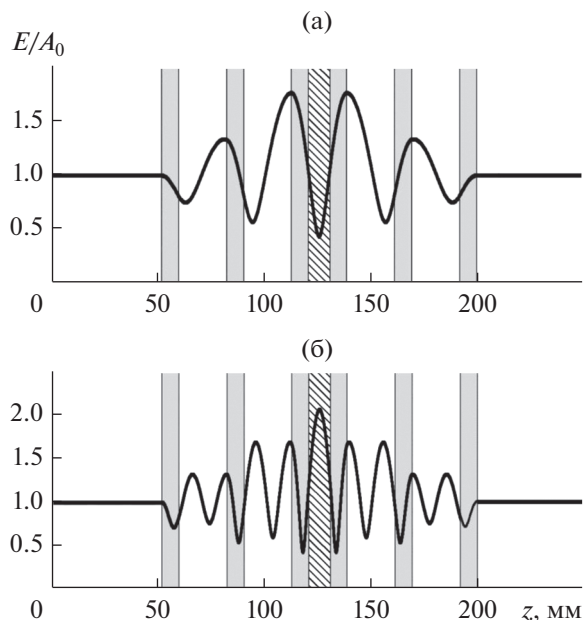


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля E электромагнитной волны вдоль структуры фотонного кристалла на резонансных частотах: $f_1 = 4.113$ ГГц (а) и $f_2 = 9.382$ ГГц (б) дефектных мод. Областям серого цвета соответствуют слои фторопласта, белым областям — воздушные слои; штрихованная область — область дефекта; A_0 — амплитуда падающей электромагнитной волны.

может уложиться ни одна полуволна, и в области нарушения наблюдается узел стоячей волны.

2. На частоте $f_2 > f_1$ длина электромагнитной волны $\lambda_2 < \lambda_1$ и в пределах неоднородности реализуется условие, необходимое для существования полуволнового резонанса, т.е. на длине неоднородности укладывается половина длины электромагнитной волны λ_2 на этой частоте, и в области нарушения наблюдается пучность стоячей волны.

Известно, что в ФК для повышения чувствительности, например полупроводникового детектора, добиваются возникновения пучности стоячей волны в области расположения детектора [20]. Анализируя распределение электрического поля на частотах дефектных мод f_1 и f_2 внутри ФК, можно сделать следующий вывод. Аналогично ситуации, описанной в [20], здесь также причиной слабой чувствительности дефектной моды в первой запрещенной зоне на частоте f_1 и высокой чувствительности дефектной моды во второй запрещенной зоне на частоте f_2 к изменению диэлектрической проницаемости вносимого нарушения является возникновение в области расположения дефекта на частоте f_1 узла стоячей волны и на частоте f_2 пучности стоячей волны.

В данной работе была реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ ряда диэлектриков по ча-

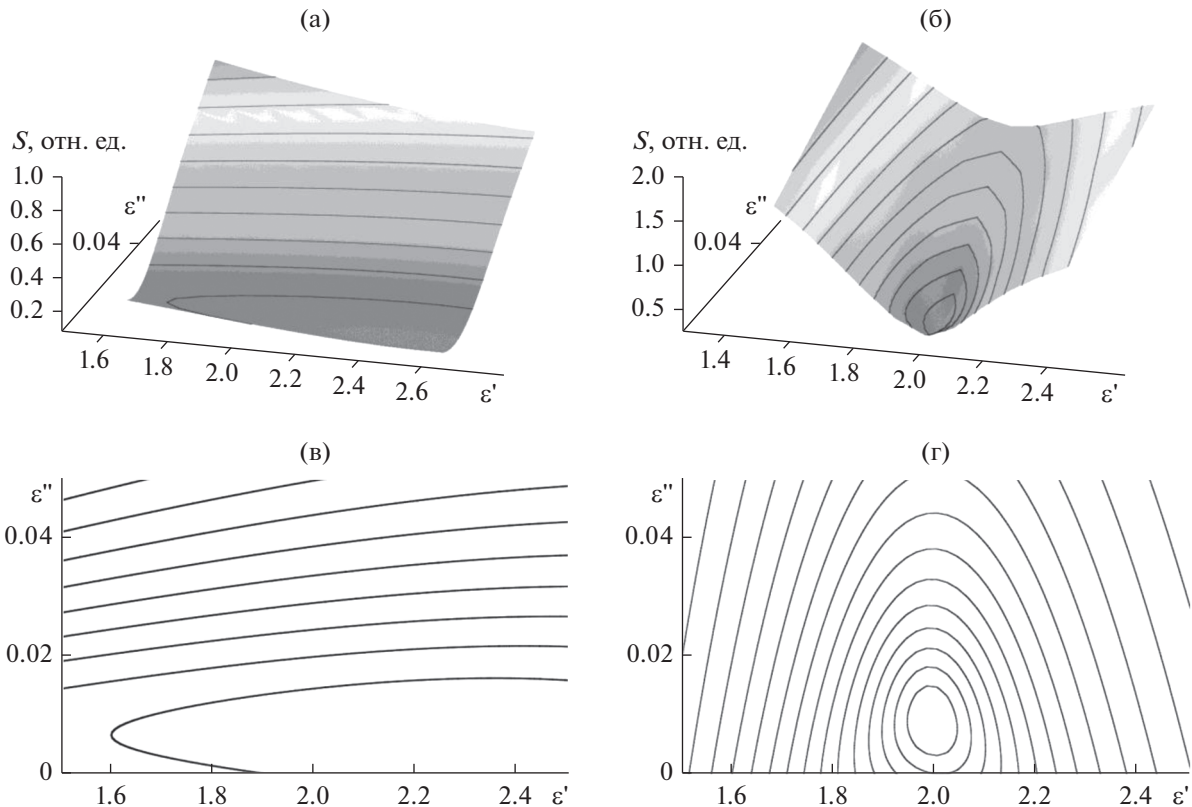


Рис. 4. Вид функции невязок $S(\epsilon', \epsilon'')$ в пространстве $(\epsilon', \epsilon'', S(\epsilon', \epsilon''))$ и контурные карты в плоскости искомых параметров (ϵ', ϵ'') для образца с комплексной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2 - 0.01i$ на частотах $f_1 = 4.094$ ГГц (а, в) и $f_2 = 8.786$ ГГц (б, г), соответствующих дефектным модам в первой и второй запрещенных зонах.

стотным зависимостям $D(\epsilon', \epsilon'', f)$ и $R(\epsilon', \epsilon'', f)$ с использованием метода наименьших квадратов. При реализации этого метода находится такое значение параметров $\epsilon'_{иск}$ и $\epsilon''_{иск}$, при котором сумма квадратов разностей $S(\epsilon', \epsilon'')$ расчетных $|D(\epsilon', \epsilon'', f)|^2$, $|R(\epsilon', \epsilon'', f)|^2$ и экспериментальных (исходных) $|D_{эксп}|^2$ и $|R_{эксп}|^2$ значений квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения

$$S(\epsilon', \epsilon'') = \sum_{i=1}^K \left[\left(|D(\epsilon', \epsilon'', f_{эксп_i})|^2 - |D_{эксп_i}|^2 \right)^2 + \left(|R(\epsilon', \epsilon'', f_{эксп_i})|^2 - |R_{эксп_i}|^2 \right)^2 \right] \quad (10)$$

становится минимальной. Здесь K — число измеренных значений коэффициентов прохождения и отражения.

Искомые значения параметров исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S(\epsilon', \epsilon'')}{\partial \epsilon'} = 0 \\ \frac{\partial S(\epsilon', \epsilon'')}{\partial \epsilon''} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Для отработки метода измерений решалась следующая тестовая задача: задавались действительная ϵ' и мнимая ϵ'' части комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрика и рассчитывались частотные зависимости коэффициентов пропускания и отражения исследуемой структуры с использованием выражений (8) и (9), т.е. решалась прямая задача. Эти частотные зависимости с погрешностью $\pm 5\%$ выбирались в качестве исходных при решении обратной задачи по нахождению комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрика, считающейся в этом случае неизвестной величиной, подлежащей определению. Сравнение результатов решения обратной задачи с исходными значениями комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрика позволяет оценить погрешность предложенного метода измерений.

Как следует из результатов расчета, функции невязок $S(\epsilon', \epsilon'', f)$, определяемые выражением (10) и представленные на рис. 4а, 4б на резонансных частотах $f_1 = 4.094$ ГГц и $f_2 = 8.786$ ГГц, соответствующих дефектным модам в первой и второй запрещенных зонах, для образца длиной $L = 10$ мм с комплексной диэлектрической проницаемо-

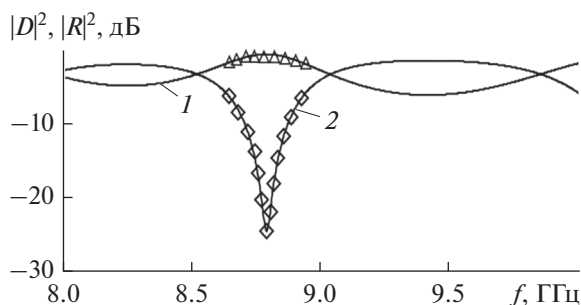


Рис. 5. Исходные тестовые (точки) и рассчитанные (кривые) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости $|D|^2$ (кривая 1) и $|R|^2$ (кривая 2) на резонансной частоте $f_2 = 8.786$ ГГц, соответствующей дефектной моде во второй запрещенной зоне.

стью $\epsilon = 2 - 0.01i$, обладают глобальным минимумом в пространстве координат $(\epsilon', \epsilon'', S(\epsilon', \epsilon''))$, а контурные карты (рис. 4в, 4г) характеризуются наличием замкнутых траекторий вблизи минимума. Это подтверждает возможность однозначно определять действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости из решения системы уравнений (11). Из результатов расчета также следует, что градиент функции невязок в направлении координаты ϵ' на резонансной частоте дефектной моды во второй разрешенной зоне на порядок превышает градиент функции невязок на резонансной частоте дефектной моды в первой разрешенной зоне. При этом в направлении координаты ϵ'' градиенты функции невязок на резонансных частотах дефектной моды в первой и второй разрешенных зонах примерно одинаковы.

Значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, определенные из решения обратной задачи с использованием системы уравнений (11), составили $\epsilon = 1.896 - 0.014i$ и $\epsilon = 1.994 - 0.012i$ на резонансной частоте дефектной моды соответственно в первой и второй разрешенных зонах.

На рис. 5 представлены тестовые (исходные) и рассчитанные с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости квадратов коэффициентов отражения и прохождения на резонансных частотах дефектной моды в первой и второй разрешенных зонах.

Относительная погрешность определения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости на резонансной частоте дефектной моды в первой разрешенной зоне составила 10.1 и 0.7% на резонансной частоте дефектной моды во второй разрешенной зоне. При этом относительные погрешности определения

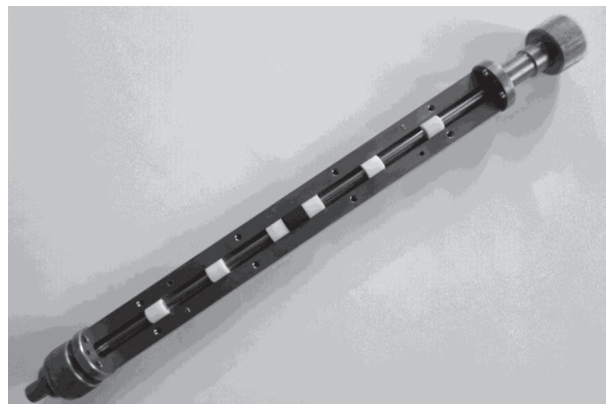


Рис. 6. Секция СВЧ КФК с измеряемым образцом в центральном слое.

мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости на резонансных частотах дефектной моды в первой и второй разрешенных зонах примерно одинаковы и составляют 40 и 20%, соответственно.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований была создана измерительная секция в виде разборного отрезка коаксиальной линии передачи, внутри которого формируется КФК, и двух коаксиальных разъемов для подключения к внешним коаксиальным линиям передачи (рис. 6). Длина разборной части измерительной секции составляла 200 мм, внутренний диаметр внешнего проводника коаксиальной линии 7 мм, внешний диаметр внутреннего проводника 3 мм. Измерительную секцию, содержащую исследуемые КФК, подключали к векторному анализатору цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A с помощью 50-омной коаксиальной линии передачи.

Измеряли амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с 11-слойным КФК, нечетные слои которого были выполнены из коаксиальных отрезков с диэлектрическим заполнением (фторопласт, длина 8 мм), а четные — коаксиальных отрезков с воздушным заполнением (длина 22.56 мм). Результаты измерений демонстрируют наличие на АЧХ КФК двух запрещенных зон равной глубины, разделенных разрешенной зоной в диапазоне частот 0...12 ГГц (кривая 1 на рис. 7).

Исследуемые диэлектрические образцы, выполненные в виде цилиндрических втулок (внешний диаметр 7 мм, внутренний диаметр 3 мм), помещали в КФК в качестве центрального (шестого) слоя. Исследуемые образцы были выполнены из

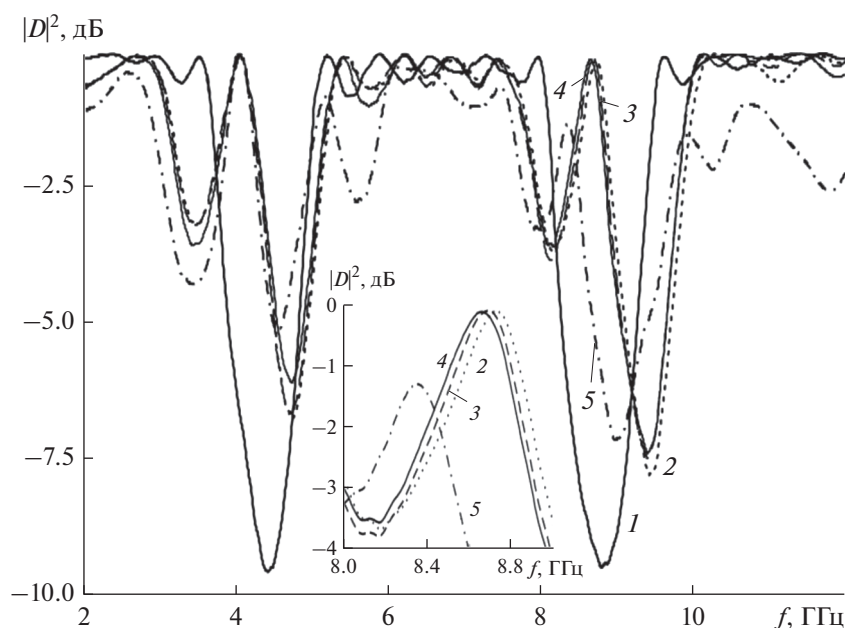


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициентов прохождения СВЧ КФК без нарушения периодичности (1) и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости: 2 – фторопласт; 3 – капролон; 4 – эбонит; 5 – текстолит; $L = 10$ мм. На вставке – АЧХ КФК в окрестности дефектной моды.

фторопласта (длина 10.47 мм), капролона (10.65 мм), эбонита (10.16 мм) и текстолита (10.25 мм).

Из результатов эксперимента, представленных на рис. 7, следует, что дефектные моды в первой и второй запрещенных зонах КФК появляются соответственно на частотах 4.066 и 8.716 ГГц (фторопласт), 4.049 и 8.677 ГГц (капролон), 4.074 и 8.651 ГГц (эбонит), 4.016 8.378 ГГц (текстолит).

Полученные экспериментальные результаты подтверждают данные компьютерного моделирования: изменение резонансной частоты f_1 дефектной моды в первой запрещенной зоне при изменении действительной части комплексной диэлектрической проницаемости нарушенного слоя является незначительным по сравнению с изменением дефектной моды во второй запрещенной зоне. В связи с этим для реализации описанного выше метода измерения диэлектрической проницаемости исследуемых в эксперименте диэлектриков была выбрана дефектная мода во второй запрещенной зоне.

С использованием приведенной выше методики измерений на основе решения обратной задачи были определены значения мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости образцов из фторопласта, капролона, эбонита и текстолита (табл. 1).

На рис. 8 представлены АЧХ коэффициентов прохождения и отражения, измеренные и рассчитанные с использованием соотношений (8) и (9)

при значениях ϵ' и ϵ'' , приведенных в табл. 1 для образца из текстолита, которые были определены при решении обратной задачи из системы уравнений (11) на частоте, соответствующей дефектной моде во второй фотонной запрещенной зоне. Сравнение результатов теоретического расчета и эксперимента демонстрирует их качественное и количественное совпадение. На рис. 9 представлена функция невязок $S(\epsilon', \epsilon'')$, определяемая выражением (10), и ее контурная карта для случая измерения образца, выполненного из текстолита, со значениями действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon' = 3.682$ и $\epsilon'' = 0.08$. Функция невязок обладает ярко выраженным глобальным минимумом в пространстве координат (ϵ', ϵ'') , а контурная карта характеризуется наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность однозначно определять действитель-

Таблица 1. Результаты измерений

Материал	ϵ'	ϵ''	$f_{\text{эксп}}, \text{ ГГц}$
Фторопласт	2.034	$< 10^{-4}$	8.716
Капролон	2.053	0.0035	8.677
Эбонит	2.326	0.01	8.651
Текстолит	3.682	0.08	8.378

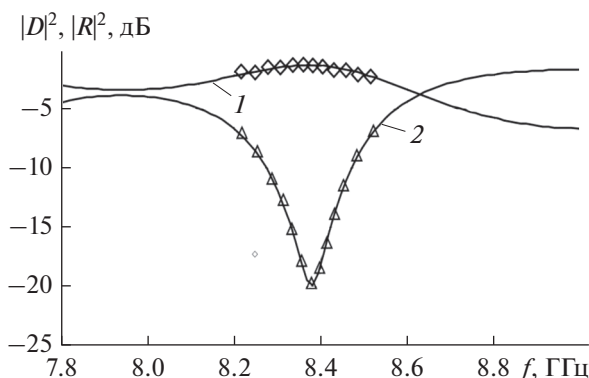


Рис. 8. Экспериментальные (точки) и рассчитанные (кривые) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости $|D|^2$ (кривая 1) и $|R|^2$ (кривая 2) для образца из текстолита на резонансной частоте $f_2 = 8.378$ ГГц во второй запрещенной зоне.

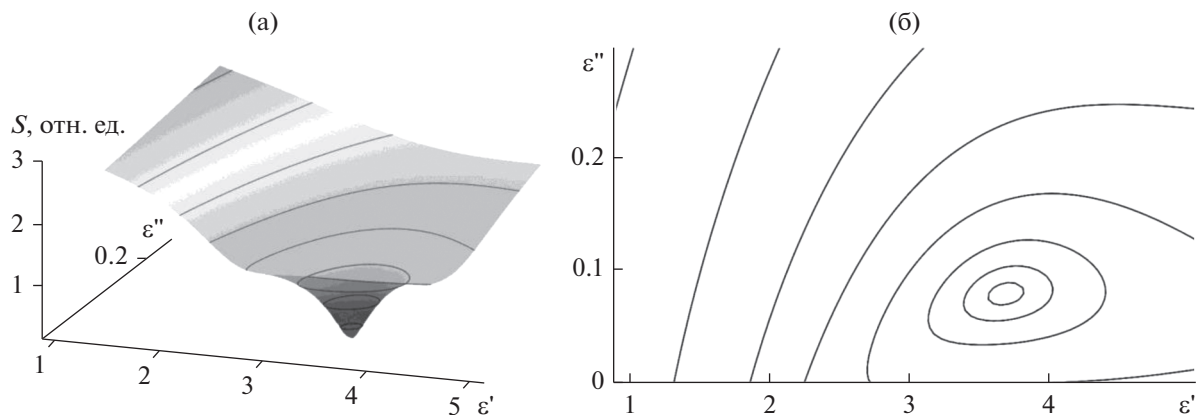


Рис. 9. Вид функции невязок $S(\epsilon', \epsilon'')$ в пространстве $(\epsilon', \epsilon'', S(\epsilon', \epsilon''))$ (а) и контурные карты в плоскости искомых параметров (ϵ', ϵ'') (б) для образца из текстолита на резонансной частоте $f_2 = 8.378$ ГГц, соответствующей дефектной моде во второй запрещенной зоне.

ную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого образца из решения системы уравнений (11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложена и реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков с использованием КФК, основанная на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне. Обоснована методика выбора запрещенной зоны с дефектной модой, обеспечивающей однозначное решение обратной задачи. Показано, что в качестве запрещенной зоны с дефектной модой при решении обратной задачи следует выбирать дефектную моду, на частоте ко-

торой в области расположения дефекта наблюдается максимум стоячей волны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. М.: Физматлит, 2018.
2. Беляев Б.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф. // ДАН. 2016. Т. 467. № 4. С. 400.
3. Gomez A., Vegas A., Solano M.A., Lakhtakia A. // Electromagnetics. 2005. V. 25. № 5. P. 437.
4. Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов В.С. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 20. С. 70.

5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 8. С. 143.
6. Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А.Б. и др. // ЖТФ. 2016, Т. 86. № 6. С. 115.
7. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. // РЭ. 2016. Т. 61. № 4. С. 321.
8. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В. и др. // РЭ. 2018. № 1. С. 65.
9. Pradhan R.D., Watson G.H. // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. № 4. P. 2410.
10. Schneider G.J., Hanna S., Davis J.L., Watson G.H. // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. № 6. P. 2642.
11. Wei Tao, Wu Songping, Huang Jie et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. № 11. P. 113517.
12. Huang Jie // Proc. Conf. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, San Diego, California, 11–15 March 2012. Bellingham: SPIE Press, 2012. V. 8345. P. 83452Z-1.
13. Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Севастьянов А.А. // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 3. С. 1. <http://jre.cplire.ru/jre/contents.html>.
14. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р. и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65.
15. Stevan S.L., Jr., Mendes J.J.A., Jr., Janzen F.C. et al. // J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2015. V. 14. № 1. P. 28.
16. Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А. и др. // ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 35.
17. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В. и др. // РЭ. 2016. Т. 61. № 1. С. 45.
18. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнич. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1988.
19. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. 2-е изд. М: Сов. радио, 1967.
20. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. // Progress in Electromagnetics Research. 2003. V. 41. P. 185.