

СВЧ коаксиальные брэгговские структуры и их использование для измерения диэлектриков

Д.А. Усанов¹, С.А. Никитов², А.В. Скрипаль¹, Д.В. Пономарев¹, О.М. Рузанов¹, И.О. Тимофеев¹

¹СГУ им. Н.Г. Чернышевского

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Аннотация: реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков с использованием коаксиального фотонного кристалла, 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.

Ключевые слова: СВЧ брэгговские структуры, коаксиал, измерение, диэлектрическая проницаемость

1. Введение

СВЧ периодические структуры, называемые СВЧ брэгговскими структурами или СВЧ фотонными 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]. Такие структуры к настоящему времени созданы на основе прямоугольных волноводов, микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линий передачи [2–7]. Однако, наиболее распространенными типами волноведущих систем, используемых в технике СВЧ являются коаксиальные кабели.

В настоящее время коаксиальные брэгговские структуры используются в качестве сенсоров физических величин и параметров материальных сред [8–10].

В настоящей 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 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.

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

2. Результаты компьютерного моделирования

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

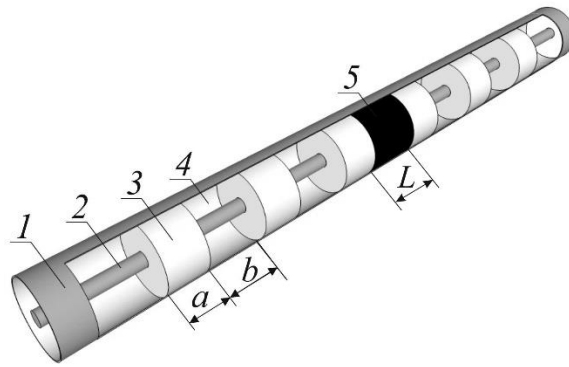


Рисунок 1. Конструкция одномерного коаксиального СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности: 1 и 2 – внешний и внутренний проводники, 3 и 4 – элементы, образующие периодическую структуру, 5 – нарушение

Рассматривались одномерные коаксиальные ФК (см. рис. 1), составленные из 11 слоёв, 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 ($\epsilon=1.0$). Длина нечетных и четных отрезков – 8.0 мм и 22.56 мм, соответственно. Внутренний диаметр внешнего проводника $d_{\text{внеш}}$ составлял 7 мм, внешний диаметр внутреннего проводника $d_{\text{внут}} = 3$ мм.

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

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

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

Результаты расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения 11-ти слойного СВЧ коаксиального ФК 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 приведены на рис. 2.

При создании нарушения периодичности в виде измененной длины и диэлектрической проницаемости центрального (6-го слоя) (см. рис. 1) в первой и второй запрещенных зонах возникают дефектные моды, частотное положение f_1 и f_2 и форма которых 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.

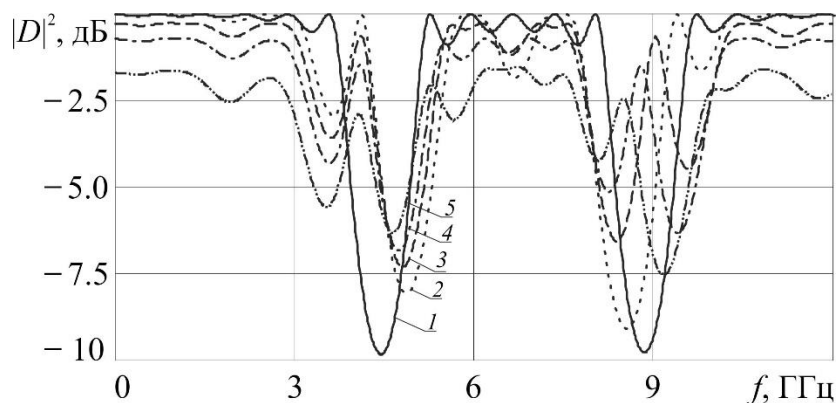


Рисунок 2. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ коаксиального ФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости. Кривая 1 – без нарушений. $L=10$ мм; ϵ , отн.ед.: 2 – 1.0; 3 – $1.5-0.02i$; 4 – $2.0-0.06i$; 5 – $3.0-0.17i$.

Для выяснения причин различной чувствительности дефектных мод к изменению диэлектрической проницаемости были выполнены расчеты распределения напряженности электрического поля $E(z)$ электромагнитной волны вдоль структуры фотонного кристалла на резонансных частотах f_1 и f_2 дефектных мод с использованием программы трехмерного электродинамического моделирования HFSS.

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.

Таким образом, 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 настоящей работе была реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon=\epsilon'-i\epsilon''$ ряда диэлектриков по частотным 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

$$S(\epsilon', \epsilon'') = \sum_{i=1}^K \left(\left(|D(\epsilon', \epsilon'', f)|^2 - |D_{i_{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|R(\epsilon', \epsilon'', f)|^2 - |R_{i_{эксп}}|^2 \right)^2 \right), \quad (2)$$

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(\varepsilon', \varepsilon'')}{\partial \varepsilon'} &= 0 \\ \frac{\partial S(\varepsilon', \varepsilon'')}{\partial \varepsilon''} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

3. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований была создана измерительная секция в виде разборного отрезка коаксиальной линии передачи, внутри которого формируется коаксиальный фотонный кристалл, 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 – 3мм. Измерительная секция, содержащая исследуемые коаксиальные фотонные кристаллы, подключалась к векторному анализатору цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A с помощью 50–омной коаксиальной линии передачи.

Как следует из результатов эксперимента, представленных на рис. 3, при измерении образцов, выполненных из фторопласта, капролона, эбонита и текстолита, в первой и второй запрещенных зонах коаксиального фотонного кристалла появляется дефектная мода на частотах 4.066 ГГц и 8.716 ГГц (фторопласт), 4.049 ГГц и 8.677 ГГц (капролон), 4.074 ГГц и 8.651 ГГц (эбонит), 4.016 ГГц 8.378 ГГц (текстолит), соответственно.

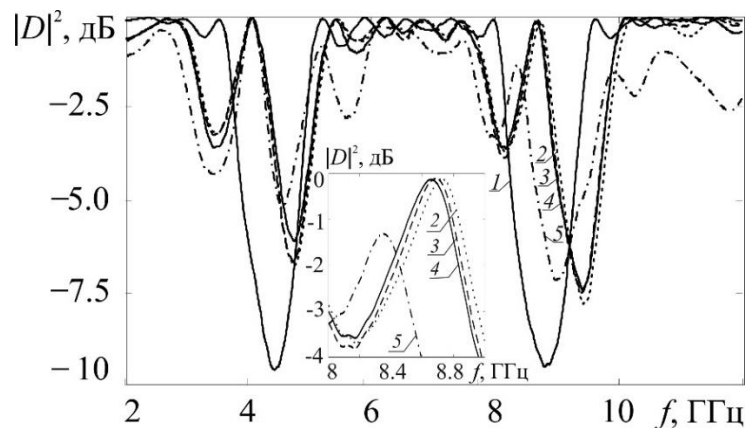


Рисунок 3. Частотные зависимости коэффициентов прохождения СВЧ коаксиального ФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости. $L=10$ мм. Кривая 1 – без нарушений, 2 – фторопласт; 3 – капролон; 4 – эбонит; 5 – текстолит.

Как следует из результатов эксперимента, представленных на рис. 3, при измерении образцов, выполненных из фторопласта, капролона, эбонита и текстолита, в первой и второй запрещенных зонах коаксиального фотонного кристалла появляется дефектная мода на частотах 4.066 ГГц и 8.716 ГГц (фторопласт), 4.049 ГГц и 8.677 ГГц (капролон), 4.074 ГГц и 8.651 ГГц (эбонит), 4.016 ГГц 8.378 ГГц (текстолит), соответственно.

На основе решения обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне были определены значения мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости образцов из фторопласта, капролона, эбонита и текстолита, которые приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры образцов

Материал	ϵ'	$\cdot\epsilon''$	$f_{\text{эксп}}$
капролон	2.053	0.00347	8.677 ГГц
эбонит	2.326	0.01	8.651 ГГц
текстолит	3.682	0.08	8.378 ГГц
фторопласт	2.034	$<10^{-4}$	8.716 ГГц

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков с использованием коаксиального фотонного кристалла, основанная на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне. Показано, что в качестве запрещенной зоны с дефектной модой при решении обратной задачи следует выбирать дефектную моду, на частоте которой в области расположения дефекта наблюдается максимум стоячей волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ) и стипендии Президента РФ (СП-3301.2018.3).

Список литературы

1. Усанов Д.А., Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 184 с.
2. Беляев Б.А., Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла / Б.А. Беляев, [и др.] // Доклады Академии наук — 2016. — Т. 467. — № 4. — С. 400–404.
3. Gomez A., On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies / A. Gomez, [at al.] // Electromagnetics — 2005.— Vol. 25. — № 5. — P. 437–460.
4. Мухортов В.М., Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой / В.М. Мухортов, [и др.] // Письма в ЖТФ — 2013. — Т. 39. — №20. — С. 70–76.
5. Никитин Ал.А., Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой / Ал.А. Никитин, [и др.] // Журнал технической физики — 2016. — Т. 86. — №6. — С.115–120
6. Усанов Д.А., Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-p$ -диодами характеристиками / Д.А. Усанов, [и др.] // Радиотехника и электроника — 2018. — № 1. — С. 65–71.
7. Усанов Д.А., Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями / Д.А. Усанов, [и др.] // Журнал технической физики — 2016. — Т. 86. — №2. — С. 65–70.
8. Tao Wei, Coaxial cable Bragg grating/ Wei Tao, [at al.] // Applied Physics Letters — 2011. — V.99. — №11. — P.113517(1–3)
9. Морозов, Г.А. Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах / Г.А. Морозов, [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2014. — Т.17. — №3. — С.65-70.
10. Sergio Luiz Stevan Jr. Long Period Bragg Grating in Coaxial Transmission Lines / Luiz Stevan Jr Sergio, [at al.] // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications — 2015. — V. 14 — № 1. — P. 28–39.