

# Использование дефектных мод фотонных кристаллов для измерения параметров поглотителей

А.В. Скрипаль<sup>1</sup>, В.С. Тяжлов<sup>1,2</sup>, Д.В. Пономарев<sup>1</sup>, В.Е. Шаронов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>АО НПП «Алмаз»

**Аннотация:** теоретически и экспериментально исследованы резонансные характеристики фотонных кристаллов, обусловленные объемным нарушением периодичности структуры в виде образца из радиопоглощающего материала, и показана возможность использования частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды для измерения его параметров в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

**Ключевые слова:** радиопоглотитель, фотонный кристалл, дефектная мода, диэлектрическая проницаемость

## 1. Введение

Брэгговские структуры СВЧ-диапазона, часто называемые фотонными кристаллами, являются основой для создания перспективных высокочувствительных измерительных систем [1]. Фотонные кристаллы могут выступать в роли как внешнего по отношению к измеряемому объекту датчика, контролирующего, например, механические напряжения, так и перестраиваемого измерительного резонатора, внутрь которого помещаются исследуемые образцы, становящиеся фактически неотъемлемой частью самого фотонного кристалла. Номенклатура измеряемых с использованием фотонных кристаллов объектов достаточно широка: диэлектрические и полупроводниковые материалы, различные композиты, нанометровые металлические пленки, магнитные материалы, а также слоистые структуры и искусственно созданные материалы со сложным пространственным распределением электрофизических свойств, измерение которых посредством стандартных методик или невозможно, или крайне затруднено.

В основе методов измерения электрофизических параметров материалов и структур с использованием фотонных кристаллов лежит высокая чувствительность отдельных резонансных состояний, возникающих в фотонной запрещенной зоне при помещении измеряемого объекта внутрь периодической структуры фотонного кристалла, к параметрам данного объекта. Нарушение периодичности, создаваемое на границе фотонного кристалла, приводит к возникновению интерфейсного состояния, сопровождающегося сильной локализацией поля электромагнитной волны в месте расположения образца и возникновением ярко выраженного резонансного состояния в фотонной запрещенной зоне [2]. Такое интерфейсное состояние успешно используется для измерения удельной электропроводности тонких полупроводниковых слоев и нанометровых металлических пленок. Однако, для различных диапазонов толщин и удельных электропроводностей проводящих слоев реализация ярко выраженного резонансного состояния требует изменения параметров фотонного кристалла или создание дополнительного буферного слоя, толщину которого необходимо прецизионно контролировать [3]. Альтернативой интерфейсным состояниям могут быть дефектные моды, возникающие в фотонной запрещенной зоне вследствие размещения исследуемого образца внутри периодической структуры фотонного кристалла, в частности, в его центральном слое [4]. Основной сложностью при измерении образцов, обладающих высокой удельной электропроводностью и/или

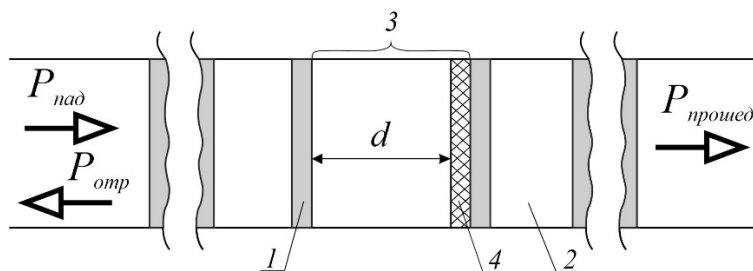
тангенсом угла потерь, становится исчезновении дефектной моды уже при достаточно низких значениях указанных параметров вследствие высокого отражения.

В настоящей работе исследуются резонансные характеристики фотонных кристаллов, обусловленные объемным нарушением периодичности структуры в виде образца из радиопоглощающего материала, и возможность использования частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды для измерения его параметров в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

## 2. Компьютерное моделирование

В диапазоне частот 7–13 ГГц исследован СВЧ фотонный кристалл на основе прямоугольного волновода с диэлектрическим заполнением в виде периодически чередующихся слоев керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\epsilon=9,6$ , толщина 1,0 мм) и тефлона ( $\epsilon=9,6$ , толщина 9 мм). Фотонный кристалл состоял из 11 слоев.

Нарушение периодичности создавалось посредством изменения длины центрального слоя фотонного кристалла до 16,48 мм. Слой поглотителя помещался в центральный слой фотонного кристалла, частично заполняя его вдоль направления распространения электромагнитной волны и полностью заполняя по поперечному сечению (см. рисунок 1).

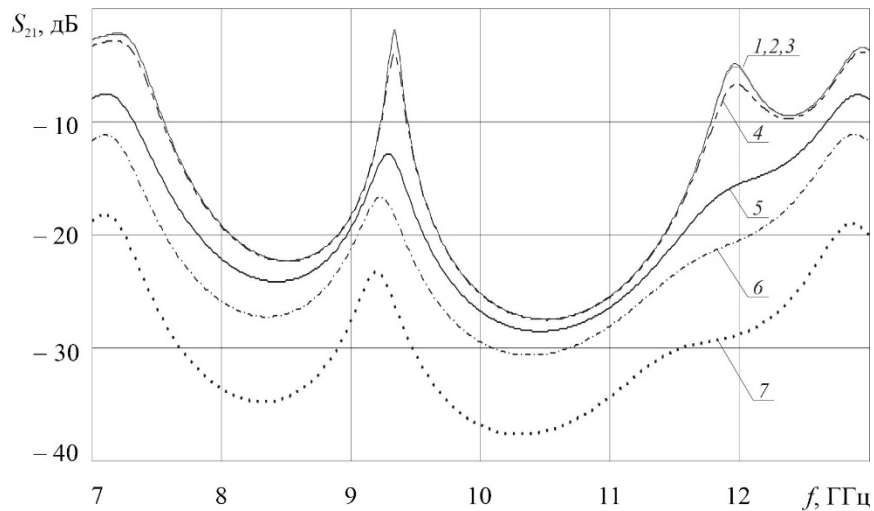


**Рисунок 1.** Схема расположения исследуемого образца в фотонном кристалле: 1 – слой поликора  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2 – слой фторопласта, 3 – центральный нарушенный слой, 4 – слой поглотителя.

Расчет частотных зависимостей коэффициентов отражения  $S_{11}(f)$  и пропускания  $S_{21}(f)$  электромагнитной волны проводился по методу матрицы передачи слоистой структуры при учете распространения в волноводе только волны основного типа  $\text{H}_{10}$ .

Результаты расчетов спектров прохождения и отражения электромагнитной волны, взаимодействующей с фотонным кристаллом, нарушенный центральный слой которого содержит поглотитель, представлены на рисунке 2. Диэлектрическая проницаемость поглотителя составляла 20, тангенс угла потерь изменялся в диапазоне от 0,0005 до 30, толщина поглотителя 1,18 мм. В запрещенной зоне фотонного кристалла наблюдается появление дефектной моды, характеризующейся низкочастотным сдвигом и уменьшением амплитуды с ростом величины тангенса угла потерь. Из приведённых результатов следует, что в области малых значений тангенса угла потерь (менее 0,5) спектры отражения и прохождения практически не изменяются, при этом в области высоких значений наблюдается увеличение чувствительности амплитуды дефектной моды к изменению тангенса угла потерь. Необходимо отметить, что при этом коэффициент отражения демонстрирует изменение на десятые доли децибела, что означает увеличение роли механизма поглощения энергии электромагнитной волны и уменьшение роли механизма отражения при взаимодействии электромагнитной волны с поглотителем в нарушенном слое фотонного кристалла. Таким образом, посредством выбора параметров нарушения фотонного кристалла слоя становится возможным реализовать существование дефектной моды, параметры которой демонстрируют высокую

чувствительность к величине потерь в поглощающем материале.



**Рисунок 2.** Спектры прохождения для фотонного кристалла, содержащего в центральном нарушенном слое слой поглотителя при различных значениях тангенса угла потерь: 1 – 0.0005, 2 – 0.005, 3 – 0.05, 4 – 0.5, 5 – 6, 6 – 12, 7 – 30

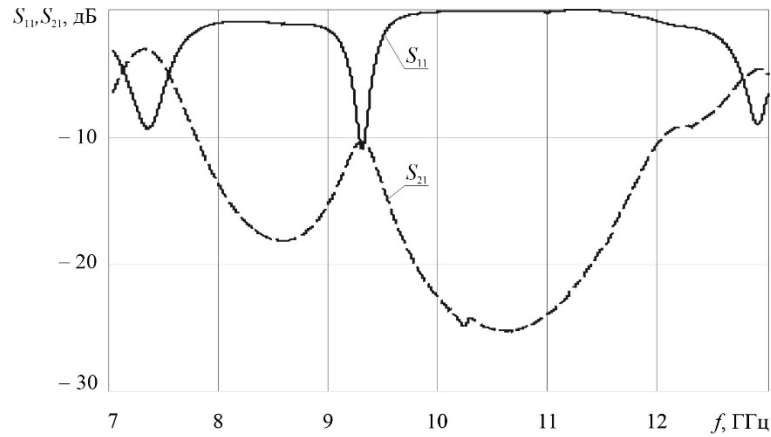
### 3. Экспериментальные результаты

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

Для экспериментального наблюдения дефектной моды использовался поглотитель толщиной 1.18 мм, размещенный в центральном (шестом) слое фотонного кристалла и непосредственно примыкавший к следующему за ним (седьмому) слою из поликора  $Al_2O_3$ .

Результаты измерений спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения для фотонного кристалла со слоем поглотителя, выполненные с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A в диапазоне частот 7–13 ГГц, представлены на рисунке 3.

Для одновременного определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь поглотителя был реализован метод измерения, основанный на использовании спектров отражения  $S_{11}(\epsilon, \text{tg}\delta, f)$  и прохождения  $S_{21}(\epsilon, \text{tg}\delta, f)$  СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, содержащим исследуемый поглотитель, на частоте дефектной моды. Предложенный метод основан на минимизации функционала, характеризующего разность между экспериментальными и теоретически рассчитанными в окрестности дефектной моды спектрами отражения и прохождения СВЧ-излучения, с использованием метода наименьших квадратов.



**Рисунок 3.** Экспериментальные спектры отражения и прохождения

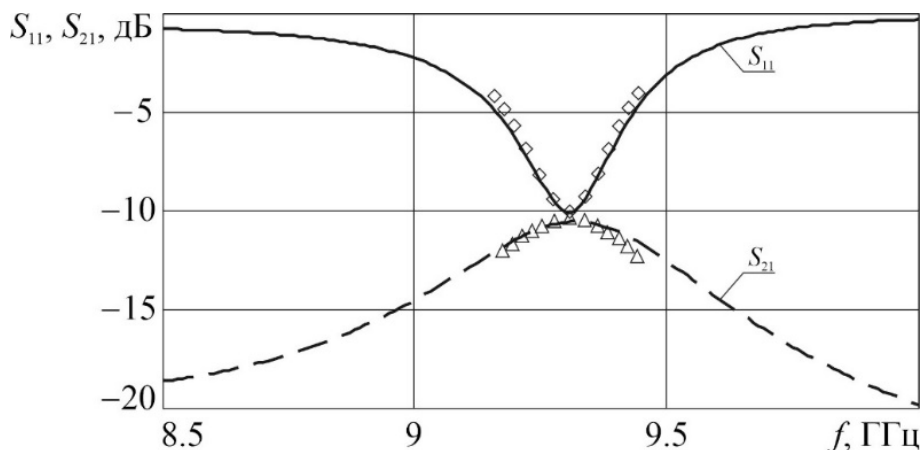
При реализации этого метода находится такое значение диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь поглотителя, при котором сумма квадратов разностей экспериментальных и теоретически рассчитанных спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения в окрестностях дефектной моды

$$F(\sigma) = \sum_{i=1}^K \left[ \left( |S_{21}(\varepsilon, tg\delta, f_{exp_i})|^2 - |S_{21exp_i}|^2 \right)^2 + \left( |S_{11}(\varepsilon, tg\delta, f_{exp_i})|^2 - |S_{11exp_i}|^2 \right)^2 \right]$$

становится минимальной. Здесь  $K$  – число экспериментальных значений частоты, выбранных в окрестности дефектной моды.

Искомые значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь поглотителя определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(\varepsilon, tg\delta)}{\partial \varepsilon} = 0 \\ \frac{\partial F(\varepsilon, tg\delta)}{\partial tg\delta} = 0 \end{cases}$$



**Рисунок 4.** Экспериментальные ( $\Delta$  и  $\diamond$ ) и рассчитанные с использованием найденных значений диэлектрической проницаемости (20.66) и тангенса угла потерь (5.40) спектры отражения и прохождения

С использованием результатов измерений АЧХ коэффициентов прохождения и отражения на частоте дефектной моды 9.306 ГГц при толщине 1.18 мм слоя

поглотителя на основе решения обратной задачи были определены значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь 20.66 и 3.28, соответственно.

На рисунке 4 представлены АЧХ коэффициентов прохождения и отражения, измеренные и рассчитанные при значениях диэлектрической проницаемости 20.66 и тангенса угла потерь 3.28.

Сравнение результатов теоретического расчета и эксперимента демонстрирует их качественное и количественное совпадение, что подтверждает возможность однозначно определять диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь поглотителя с использованием дефектной моды.

#### 4. Заключение

В настоящей работе мы исследуем резонансные характеристики одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности, внутри которого располагается поглотитель энергии электромагнитной волны, выполненный в виде тонкой пластины.

Дефектная моды была использована для измерения параметров материала поглотителя. 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 исследуемый поглотитель.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Фонда содействия инновациям (проект 17308ГУ/2022 от 12.04.2022)**.

#### Список литературы

1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль Ал.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. 2-е изд., доп. и перераб. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2020.
2. Skripal A. V. et al. Tamm resonances in the structure 1-D microwave photonic crystal/conducting nanometer layer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – Т. 68. – №. 12. – С. 5115–5122.
3. Skripal Al. V. et al. Tamm resonances control in one-dimensional microwave photonic crystal for measuring parameters of heavily doped semiconductor layers. // Izvestiya of Saratov University. Physics. – 2022. – Т. 22. – №. 2. – С. 123–130.
4. Усанов Д.А. и др. Использование СВЧ коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – №. 5. – С. 495–503.