

09.4

Дефектная мода в низкоразмерном волноводном СВЧ фотонном кристалле

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, В.Н. Посадский, В.С. Тяжлов,
А.В. Байкин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 2 ноября 2015 г.

Показано, что в низкоразмерном волноводном фотонном кристалле, в котором в качестве образующих его периодически расположенных элементов структуры используются диэлектрические слои и прилегающие к ним тонкие металлические пластины, частично перекрывающие сечение волновода и образующие емкостный зазор между пластиной и широкой стенкой волновода, нарушение периодичности приводит к появлению дефектной (примесной) моды. Установлено, что положение дефектной моды по шкале частот существенным образом зависит не только от толщины „нарушенного“ диэлектрического слоя, но и от величины емкостного зазора диафрагм.

Интерес к исследованию СВЧ фотонных кристаллов связан с возможностью их практического использования при создании фильтров, резонаторов, отражающих поверхностей, замедляющих систем, антенн [1–4]. Отмечают также возможность использования закономерностей, характерных для СВЧ фотонных кристаллов, при создании аналогичных устройств оптического диапазона, в которых могут играть существенную роль трудно учитываемые технологические факторы.

Низкоразмерный волноводный фотонный кристалл (ФК) можно создать, используя в качестве образующих его периодически расположенных элементов структуры из диэлектрических слоев и прилегающих к ним тонких металлических пластин, частично перекрывающих сечение волновода и образующих емкостный зазор между пластиной и широкой стенкой волновода. Емкостный зазор является источником волн высших типов. Если вблизи от него разместить металлический отражатель, то в такой системе возможно возникновение резонанса на высших типах волн [5]. Возникающие вблизи отверстия в диафрагме волны высших типов образуют так называемое ближнее поле. Резонансные характеристики такого элемента диафрагма — металлический отражатель обладают

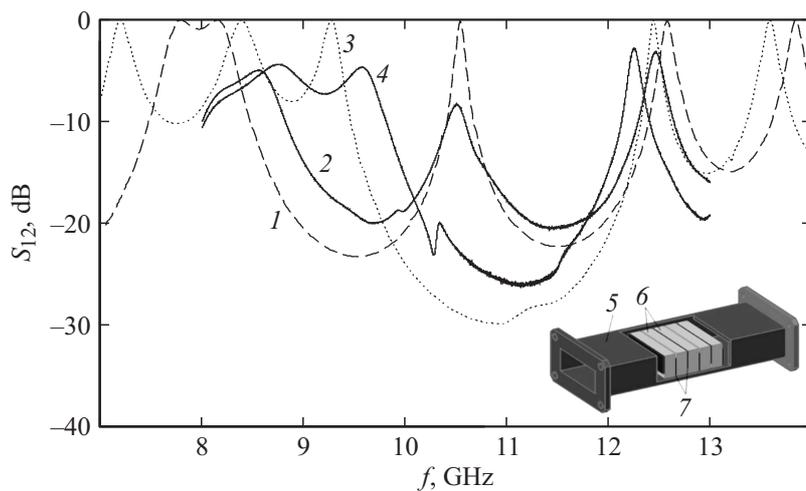


Рис. 1. Расчетные (штриховая и пунктирная кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) АЧХ коэффициента пропускания S_{12} одиннадцатислойного низкоразмерного ФК: кривые 1, 2 — с „нарушенным“ шестым центральным слоем фторопласта толщиной 1 mm; кривые 3, 4 — без нарушения периодичности структуры. На вставке: модель фотонного кристалла: 5 — отрезок прямоугольного волновода, 6 — слой диэлектрика, 7 — емкостные диафрагмы.

высокой чувствительностью к изменению размеров емкостного зазора и расстояния до отражателя. Исследование такого рода устройств может представлять интерес для улучшения характеристик ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов [6].

Низкоразмерный ФК можно формировать таким образом, чтобы у каждого последующего элемента зазор был расположен у противоположной широкой стенки волновода [7]. Расстояние от диафрагмы до отражателя выбирается столь малым, чтобы происходило резонансное взаимодействие с металлической пластиной соседнего элемента. В условии Брэгга

$$\beta a = \pi,$$

где a — период структуры с фотонной запрещенной зоной, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon}$ — фазовая постоянная, λ — центральная длина волны запрещенной зоны, ε — диэлектрическая проницаемость, в этой связи должна фигурировать длина волны высшего типа, которая намного меньше основного.

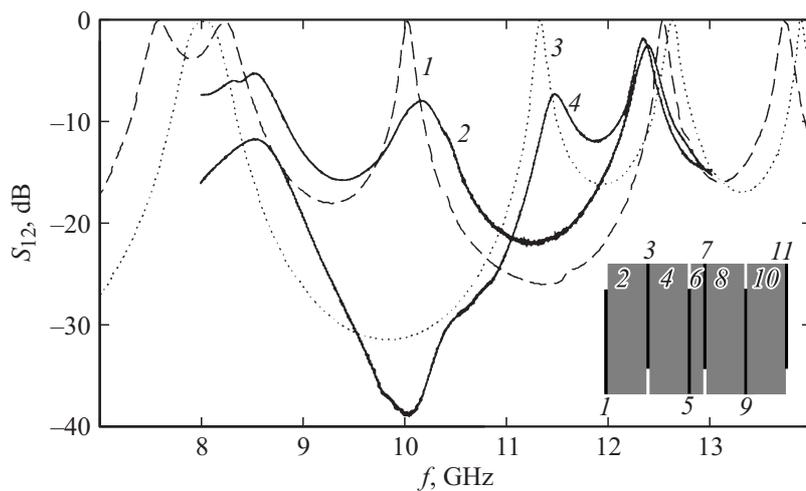


Рис. 2. Расчетные (штриховая и пунктирная линии) и экспериментальные (сплошные линии) АЧХ коэффициента пропускания S_{12} ФК с нарушением в виде центрального слоя диэлектрика разной толщины: кривые 1, 2 — толщина центрального слоя (слой 6) равна 1.5 мм; кривые 3, 4 — толщина центрального слоя (слой 6) равна 0.5 мм. На вставке: схема фотонного кристалла с „нарушенным“ центральным слоем с номерами слоев.

Нарушение периодичности в таком низкоразмерном ФК должно приводить к появлению дефектной (примесной) моды. Теоретическое определение условий ее появления и экспериментальная реализация этих условий составляли цель данной работы.

Для получения „запрещенной“ зоны на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ФК в качестве крайних элементов структуры ФК использовались емкостные диафрагмы. Нарушением периодичности ФК может служить отличный от других размер центрального диэлектрического слоя или измененный размер емкостного зазора диафрагмы, прилегающей к нарушенному слою.

Исследовались ФК, состоящие из описанных выше элементов, размещенных в отрезке волновода сечением 23×10 мм (вставка к рис. 1). Схема расположения слоев ФК показана на вставке к рис. 2.

В ходе численного моделирования с использованием программного обеспечения для трехмерного моделирования электромагнитных полей

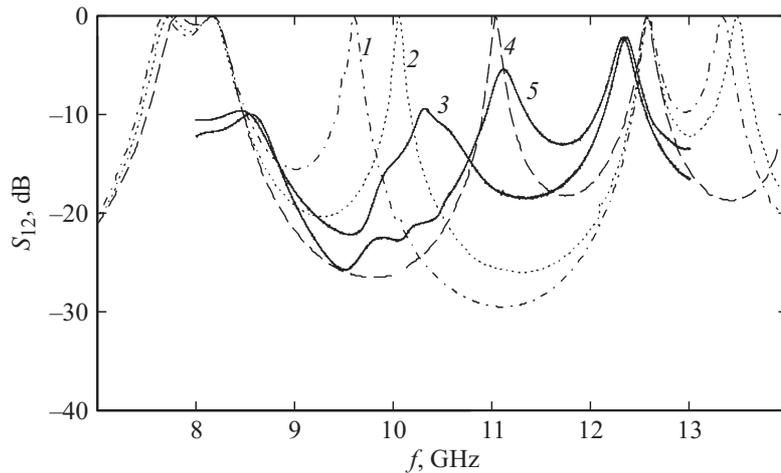


Рис. 3. Расчетные (штриховая, пунктирная и штрихпунктирная линии) и экспериментальные (сплошные линии) АЧХ коэффициента пропускания S_{12} ФК с нарушением в виде центрального слоя толщиной 1 mm. Кривая 1 — величина емкостных зазоров прилегающих к нарушенному слою левой и правой металлических диафрагм (слои 5, 7 на вставке к рис. 2) равна 0.5 mm; кривые 2, 3 — величина емкостного зазора правой диафрагмы (слой 7 на вставке к рис. 2) равна 0.5 mm; кривые 4, 5 — величина емкостного зазора левой диафрагмы (слой 5 на вставке к рис. 2) равна 2.0 mm.

методом конечных элементов ANSYS HFSS исследовалось влияние изменения параметров структуры рассматриваемых ФК на его АЧХ при нарушении периодичности. На рис. 1 представлены результаты расчета и измерения коэффициента прохождения S_{12} одиннадцатислойного ФК без нарушения периодичности (кривые 3, 4) и с нарушением периодичности (кривые 1, 2) в виде центрального слоя диэлектрика (фторопласта, $\varepsilon = 2.1$) меньшей толщины, равной 1.0 mm, при фиксированной величине емкостного зазора, равной 1.0 mm.

Диафрагмы толщиной $50 \mu\text{m}$ изготавливались из алюминия. Толщина каждого слоя диэлектрика в ФК без „нарушений“ составляла 3 mm. Таким образом, общий продольный размер кристалла без нарушения периодичности равен ~ 15 mm.

Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A. Сопоставление ре-

зультатов расчетов и измерений свидетельствует об их качественном соответствии. Имеющееся отличие может быть связано с учетом затухания в стенках волновода, что для высших типов волн существенно.

Как следует из приведенных на рис. 1 результатов, введение нарушения в виде измененного размера центрального диэлектрического слоя приводило к появлению дефектной моды и существенному изменению ширины и глубины „запрещенной“ зоны.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета и измерения АЧХ коэффициента прохождения S_{12} одиннадцатислойного ФК с нарушением периодичности при различных значениях толщины центрального слоя диэлектрика (фторопласта) и величины емкостного зазора прилегающих к „нарушенному“ слою металлических диафрагм.

Из приведенных на рис. 2 и 3 результатов следует, что положение дефектной моды по шкале частот существенным образом зависит не только от толщины „нарушенного“ диэлектрического слоя, но и от величины емкостного зазора диафрагм.

Таким образом, показано, что в низкоразмерном волноводном СВЧ фотонном кристалле возможно возникновение дефектной моды. Высокая чувствительность к изменению параметров ФК может быть использована для создания малогабаритных СВЧ-устройств с электрически управляемыми характеристиками и устройств для измерения параметров материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

Список литературы

- [1] *Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M.* // Progress in Electromagnetics Research. 2003. V. 41. P. 185–209.
- [2] *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 1. С. 3–28.
- [3] *Силин Р.А., Сазонов В.П.* Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.
- [4] *Mollah Md. Nurunnabi, Kartakar Nemaï C., Fu Jeffrey S.* // Int. J. Electron. Commun. (AEU). 2008. V. 62. P. 717–724.
- [5] *Усанов Д.А., Горбатов С.С., Вениг С.Б.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 18. С. 47–49.
- [6] *Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Фролов А.П.* // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 12. С. 1071–1078.
- [7] *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Посадский В.Н., Тяжлов В.С., Байкин А.В.* // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458. № 4. С. 406–409.