

Теоретические и экспериментальные исследования фотонных кристаллов, изготовленных технологией 3D-печати, в X-диапазоне

И.В. Хайрушев, Е.А. Рябов, С.А. Сергеев

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: В данной работе демонстрируются результаты изготовления фотонных кристаллов технологией 3D-печати для прямоугольного волновода X-диапазона и сравнение характеристик отражения с результатами численного моделирования в программном пакете OpenEMS. Положение пиков и полос пропускания в результатах моделирования и экспериментов хорошо согласуется, что говорит о перспективе технологии 3D-печати в изготовлении фотонных кристаллов.

Ключевые слова: фотонный кристалл, 3D-печать, прямоугольный волновод, СВЧ излучение, FDTD, OpenEMS

Введение

Исследование электромагнитных свойств фотонных кристаллов и проектирование приборов на их основе представляют как фундаментальный интерес, так и открывают широкие прикладные возможности создания приборов для управления электромагнитным полем, включая новые типы электромагнитных сенсоров, малогабаритные антенны, линзы с субволновым разрешением, «невидимые» объекты в определенном диапазоне частот, согласованных нагрузок, различного типа фильтров и другие [1–2]. Добавление в периодическую структуру дефекта влияет на электромагнитные свойства фотонного кристалла, изменение формы дефекта дает возможность управления электромагнитными свойствами кристалла.

Развитие технологии 3D-печати дает новые конструктивные возможности, в частности, для создания фотонных кристаллов благодаря низкой стоимости, доступности и простоте печати. Ведутся исследования структур с использованием технологии 3D-печати, например, в создании метаматериалов и других структур в микроволновом диапазоне [3–5] со встроенной геометрической оптикой (MEGO) [6].

В работе приведены результаты экспериментального и теоретического исследования фотонных кристаллов, изготовленных технологией 3D-печати, для прямоугольного волновода WR-90 в X-диапазоне.

1. Описание конструкции

3D-печать является аддитивной технологией, основанной на поэтапном наращивании слоев материала, существуют различные способы изготовления конструкций объектов. В данной работе применяется технология физического моделирования методом послойного наплавления (англ. – fused deposition modeling, FDM), при которой проводится плавление нити пластика и последующее нанесение каждого очередного слоя. Для 3D-принтеров производятся нити диаметрами 1,75 мм или 2,85 мм, изготовленные, например, из пластиков типа PLA (полимолочная кислота) или ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) и намотанные на катушки. Они представлены на рынке в разных цветах, что обеспечивает дополнительное удобство восприятия изготавливаемых объектов. В данной работе при изготовлении конструкций фотонных кристаллов на 3D-принтере с кинематикой CoreXY и диаметром сопла 0,4 мм использовались нити на основе пластика PETG (полиэтилентерефталат-гликоль) диаметром 1,75 мм и относительной

диэлектрической проницаемостью $\epsilon' \approx 2,5$ в X-диапазоне [7].

Фотонные кристаллы были предварительно спроектированы в программном пакете OpenSCAD и в дальнейшем импортированы для численного анализа в OpenEMS и для изготовления на 3D-принтере. Фотонные кристаллы, имеющие форму прямоугольных параллелепипедов, проектировались для прямоугольного волновода WR-90 сечением $22,86 \times 10,16$ мм² в X-диапазоне, в которых вдоль оси волновода периодически расположены два поперечных воздушных отверстия прямоугольной формы сечения и дополнительно в центре структуры расположен дефект, представляющий собой отверстие различной формы (ромб, круг и квадрат). На рисунке 1 представлены двумерная форма фотонных кристаллов их обозначения. Отличительной особенностью спроектированных, изготовленных и исследованных в данной работе фотонных кристаллов является форма дефекта (таблица 1).

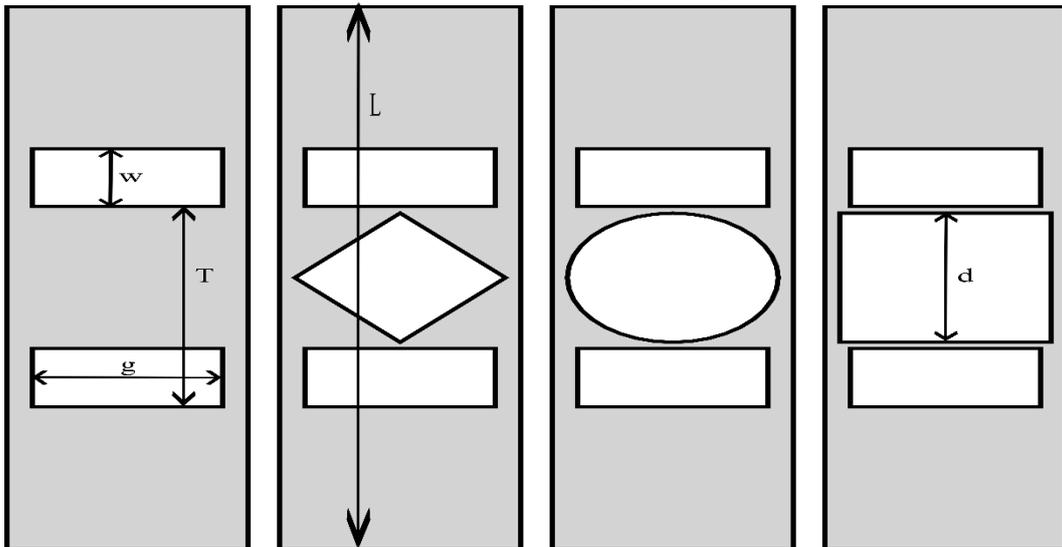


Рисунок 1. Фотонные кристаллы с двумя отверстиями.

Таблица 1. Характерные особенности и наиболее важные размеры элементов фотонного кристалла

Форма отверстий	Размер отверстия вдоль волновода (w), мм	Размер отверстия вдоль широкой стенки волновода (g), мм	Период следования отверстий (T), мм	Количество отверстий (i)	Длина (L), мм	Форма отверстия в середине структуры	Размер отверстия (d), мм
прямоугольная	9	18	31	2	84	без	×
						ромб	диагональ
						круг	диаметр
						квадрат	сторона
							20

2. Подготовка OpenEMS

Перед изготовлением спроектированных фотонных кристаллов было проведено численное моделирование их характеристик с использованием программного пакета OpenEMS [8]. В этом программном пакете при численном решении электродинамических задач используется метод FDTD – метод конечных разностей во временной области, а для взаимодействия с OpenEMS используется скриптовый язык Matlab/Octave. Для проведения численного моделирования в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц в центр прямоугольного волновода WR-90 сечением $22,86 \times 10,16$ мм²

помещался фотонный кристалл, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$.

3. Экспериментальные результаты и моделирования

В ходе моделирования изменялся шаг сетки от 1,0 мм до 0,2 мм. Слева на рисунке 2 представлены зависимости коэффициента отражения различных фотонных кристаллов при различных шагах сетки. Из-за неточности определения геометрии фотонного кристалла появляются смещения минимумов и меняется ширина полосы пропускания.

Экспериментальные исследования характеристик отражения изготовленных фотонных кристаллов проводились с использованием установки, состоящей из панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61, подключенного через плату Arduino Mega [9-14]. Справа на рисунке 2 представлены зависимости коэффициента отражения фотонных кристаллов с дефектами разной формы, полученных экспериментальным путем и в результате численного моделирования при шаге сетки $h = 0,2$ мм. Видно, что результаты моделирования и экспериментальные данные показали очень хорошее совпадение положения пиков и полос пропускания во всех исследованных вариантах конструкций, что указывает на хороший контроль топологии и размеров в использованном варианте технологии FDM 3D-печати.

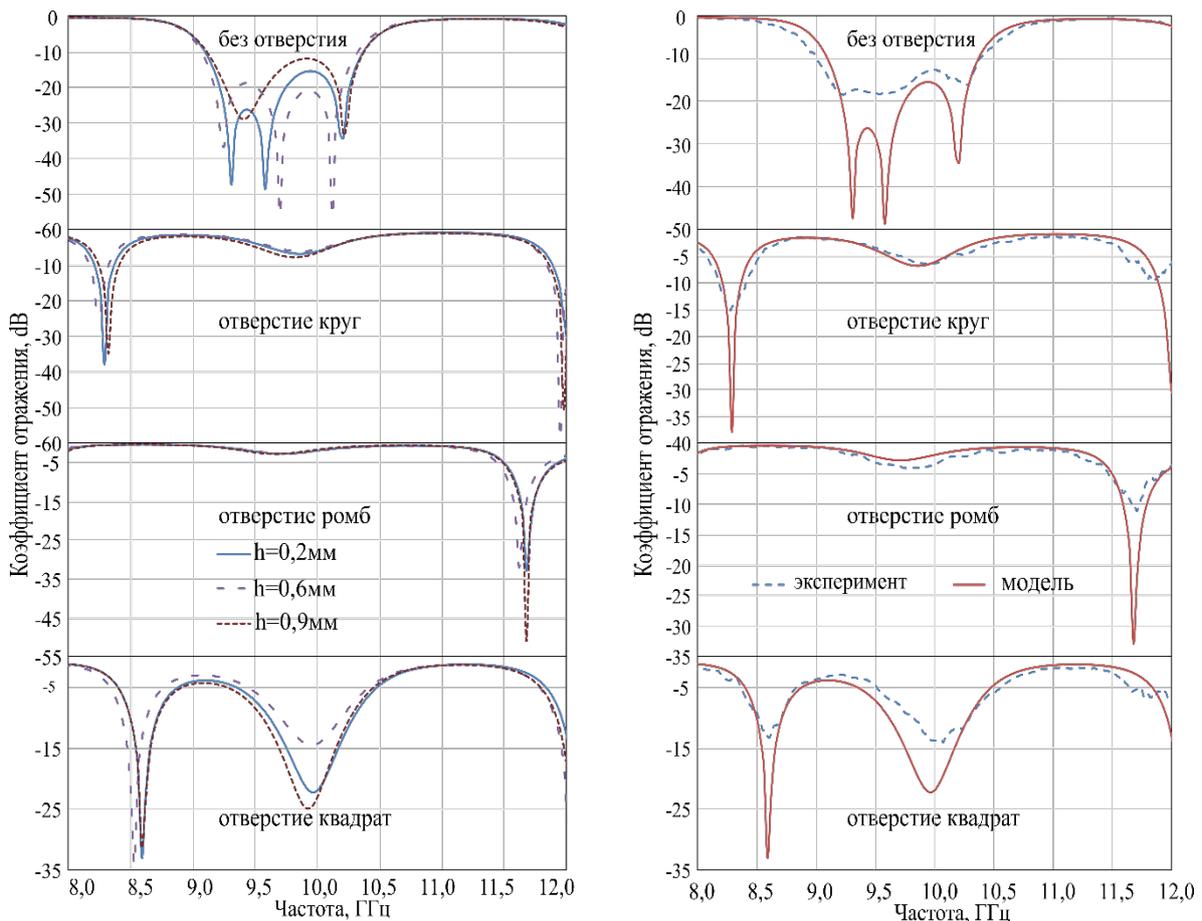


Рисунок 2. Частотные зависимости коэффициента отражения фотонных кристаллов без дефекта и с дефектами: круг, ромб, квадрат. Слева: результаты моделирования из OpenEMS при различных шагах сетки. Справа: зависимости, полученные экспериментальным путем и в результате численного моделирования при шаге сетки $h = 0,2$ мм.

Заключение

Таким образом, изготовление фотонных кристаллов с использованием 3D-печати дает возможность проектирования сложных форм. В данной работе продемонстрирована возможность эффективного использования технологии 3D-печати при создании фотонных кристаллов для управления характеристиками электромагнитного излучения X-диапазона в прямоугольном волноводе сечением $22,86 \times 10,16$ мм². Было проведено моделирование в OpenEMS характеристик отражений фотонных кристаллов с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$, соответствующей пластику PETG. При изменении шага сетки h от 0,2 до 1,0 мм наблюдается смещение минимумов коэффициентов отражения. Для бездефектного фотонного кристалла данное смещение минимумов сильно влияет на форму полосы пропускания.

Точность контроля размеров спроектированных и изготовленных фотонных кристаллов, обеспечиваемая выбранным для анализа вариантом технологии 3D-печати с использованием общедоступного и дешевого оборудования, дает основания рассчитывать на перспективы создания эффективных и дешевых прототипов устройств для управления электромагнитным излучением в X-диапазоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке **РФФИ (проект № 20-07-00603 А)**.

Список литературы

1. Нелин Е. А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 3. – С. 18-25.
2. Fan S. et al. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals // Physical review letters. – 1997. – V. 78. – № 17. – P. 3294.
3. Garcia C. R. et al. 3D printing of anisotropic metamaterials // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2012. – V. 34. – P. 75-82.
4. Михайлов А. И. и др. Применение технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур // III научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2019. – 2019. – С. 222-224.
5. Рябов Е. А. и др. Использование технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур // НННФ. – 2020. – С. 223-224.
6. Sadeqi A. et al. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO) // Microsystems & nanoengineering. – 2019. – V. 5. – № 1. – P. 1-10.
7. Zechmeister J., Lacik J. Complex Relative Permittivity Measurement of Selected 3D-Printed Materials up to 10 GHz // 2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE). – 2019. – P. 1-4.
8. Liebig T. et al. openEMS—A free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications // Intern. J. of Numer. Model.: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2013. – V. 26. – № 6. – P. 680-696.
9. Сергеев С. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 439-444.
10. Рябов Е. А. и др. Установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // НННФ. – Саратов: Техно-Декор, 2019. – С. 214.
11. Рябов Е. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания коллоидов микро- и наночастиц // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. – Саратов: Саратов. источник, 2019. – С. 188-191
12. Рябов Е. А. и др. Модифицированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 586-589.
13. Сергеев С. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 439-444.
14. Михайлов А. И. и др. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2007. – 164 с.