

мультиметра. Этап синтеза алгоритма заключается анализом полученных выражений. Инструментом анализа выбрано имитационное компьютерное моделирование. Для анализа используется прикладной математический пакет Simulink Matlab. Для анализа и исследования была проведена декомпозиция задачи на подзадачи. Сперва моделируется СВЧ блок с учетом переотражений между соседними датчиками, затем фильтруются случайные погрешности, наконец, из сигналов датчиков вычисляются промежуточные переменные и из промежуточных переменных вычисляются искомые значения проходящей мощности, модуля и фазы комплексного коэффициента отражения нагрузки.

Результатами исследования явились

1) верификация алгоритма, которая показала совпадение полученных результатов с теоретическими соотношениями;

2) разработка графической модели СВЧ блока для произвольного количества датчиков, ранее количество датчиков, учитываемых в модели, ограничивалось сложностью аналитических расчетов;

3) дальнейшее развитие способа решения системы алгебраических уравнений, которое осуществляется графически. Оно основано на представлении системы алгебраических уравнений ориентированными графами, таким образом, используется единый математический аппарат (ориентированные графы) как для описания СВЧ блока, так и для дальнейшей обработки сигналов, снимаемых с СВЧ блока;

4) синтез новой двухканальной структурной схемы для упрощенных вычислений параметров сигналов и

трактов СВЧ, в которой в одном канале рассчитывается мощность, во втором канале – коэффициент отражения.

В перспективе, пользуясь предложенной моделью, можно проанализировать ряд метрологических характеристик многозондового микроволнового мультиметра и получить их количественные оценки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Черных И.В. *Simulink инструмент моделирования динамических систем*. 2003. – 260 с.
2. Дьяконов В.П. *Simulink 5/6/7/Самоучитель*. – М: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
3. Рожкова Д.А. *Моделирование систем линейных алгебраических уравнений в Simulink*. // Труды V Международной научно-практической конференции «Молодежь. Наука. Инновации», 2012. – Ч. 1. С. 204-207.
4. Klychuk I.I., Miroshnik M.A., Tsekhmistro R.I., Warsza Z.L., Zaichenko O.B. *Modelling of influences of sensor reflections on the accuracy of a microwave reflectometer // Pomiry, automatyka, kontrola, vol.60, nr4/2014. – P.223 – 227.*
5. Зайченко О.Б., Ключник И.И., Мирошник М.А., Цехмистро Р.И. *Сравнительный анализ погрешности многозондовых микроволновых мультиметров с обработкой методами фильтра Калмана и наименьших квадратов, учитывающий переотражения зондов*. // Радиотехника. Всеукр.межвед.научн.-техн.сб. – 2014. – вып.176. – С. 247–252.
6. Измерение мощности на СВЧ / Билько М.И., Томашевский А.К. – М.: Радио и связь, 1976. – 250 с.
7. Пат. на корисну модель 60852 Україна, МКІ G 01 H 17/00. *Калібратор для багатозондового мікрохвильового мультиметра / О.Б.Зайченко (Україна)*. – №u201100049; Заявлено 04.01.2011; Опубл. 25.06.2011, Бюл. №12. – 3 с.

УДК 535.015

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДВУМЕРНОМ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Д.т.н. А.И. Филипенко, А.Н. Донсков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*В статье представлены результаты моделирования распространения поперечной составляющей электрического поля в двумерном фотонно-кристаллическом волноводе, а также в волноводе с изгибом 90°. Приведены результаты распределения поля в волноводе при различных значениях длин волн излучения.*

*В статті представлені результати моделювання поширення поперечної складової електромагнітного поля в двовірному фотонно-кристалічному хвилеводі, а також у хвилеводі зі згином 90°. Приведені результати розподілу поля у хвилеводі при різних значеннях довжин хвиль випромінювання.*

*The article presents the results of the electric field transverse component modeling in two-dimensional photonic crystal waveguide and in a waveguide with a 90° bend. The results of the field distribution in the waveguide for different values of wavelengths are shown.*

**Ключевые слова:** модовое поле, фотонно-кристаллический волновод, фотонная запрещенная зона.

#### Введение

Фотонные кристаллы - это периодические диэлектрические структуры чередующихся слоев материалов с разными показателями преломления, которые влияют на распространение электромагнитных (ЭМ) волн из-за феномена фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) (рисунок 1). Распространение электромагнитных волн через фотонный кристалл зависит от длины волны. Для частот в пределах ФЗЗ, распространение электромагнитных волн внутри фотонного кристалла подавляется. Существование фотонных запрещенных зон позволяет нам создавать эффективные диэлектрические отражатели с малыми потерями, которые могут ограничить электромагнитное излучение в каналах (волноводах) или локализованных дефектах (резонаторах) с размерами, сравнимыми с длиной волны излучения [1].

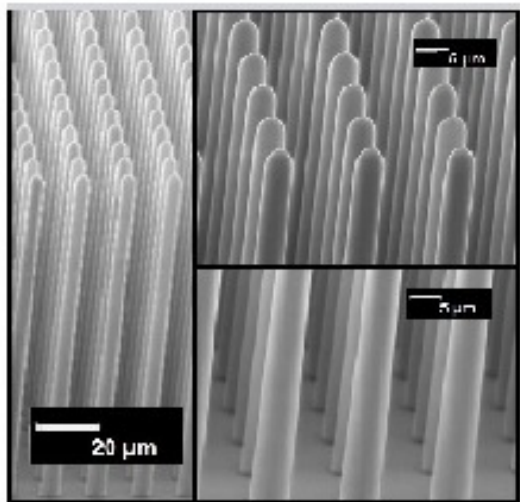


Рис 1. Пример структуры фотонного кристалла

Фотонно-кристаллический волновод (ФКВ) может быть создан путем удаления некоторых столбиков с структуре фотонного кристалла. Волноводы, которые созданы таким образом внутри фотонного кристалла могут обладать малыми потерями, а также в них возможно увеличение плотности электромагнитных волн в несколько порядков. В кристаллической структуре ФКВ расстояние между столбиками из диэлектрического материала обуславливает распространение света определенных длин волн. В зависимости от расстояния между столбиками и от диаметра столбиков, волны в определенном диапазоне частот отражаются и не распространяются через кристалл. Удалив некоторые из столбиков в кристаллической структуре, возможно создать волновод для частот в пределах ширины запрещенной зоны. Свет может распространяться вдоль созданной таким образом волноводной структуры [2, 3].

Типичное расстояние между столбиками из полупроводникового материала (шаг) в фотонных кристаллах сравним с длиной волны, распространяющегося света  $\lambda$  (рисунок 2).

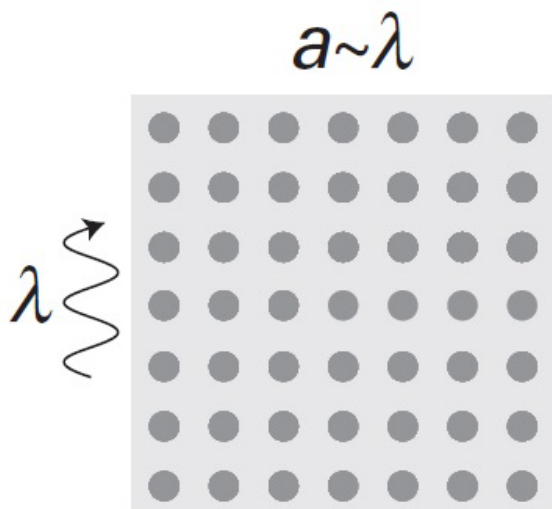


Рис 2. Режим распространения света в ФКВ

Более того, когда рассеиватели (столбики из диэлектрического материала) расположены в периодической матрице (отсюда и название фотонных кристаллов), возможно когерентное сложение рассеянных полей, что приводит к значительной гибкости в изменении дисперсии и распределении плотности электромагнитных состояний.

### Расчет распространения TE волн методом конечных элементов

Для моделирования распространения света через фотонно-кристаллическую структуру мы рассматриваем распространение высокочастотных TE волн. Формулы расчета для высокочастотных TE и TM волн могут быть получены из уравнений Максвелла в дифференциальной форме

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (\text{Faraday's law}) \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \frac{dD}{dt} + J \quad (\text{Maxwell-Ampere law}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{Gauss's law}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Gauss's law - magnetic}) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{d\rho}{dt} \quad (\text{Equation of continuity}) \quad (5)$$

Из этих уравнений выводится скалярное уравнение для поперечной составляющей электрического поля  $E_z$  [2]

$$-\nabla \cdot \nabla E_z - n^2 k_0^2 = 0,$$

где  $n$  – коэффициент преломления и  $k_0$  – волновое число в свободном пространстве.

В программе создается треугольная сетка конечных элементов, для которых и производится расчет. Для упрощения расчетов мы будем проводить моделирование в двумерном пространстве.

### Моделирование распространения TE волн в двумерном фотонно-кристаллическом волноводе

В данной работе мы рассмотрим распространение волн в фотонном кристалле, который состоит из периодической решетки GaAs столбиков.

Основными задачами моделирования являются:

- исследование распространения TE волн в ФКВ в зависимости от их длины волны;
- определение полосы пропускания исследуемого волновода.

Внутренняя структура исследуемого фотонного кристалла представляет собой треугольную решетку, состоящую из столбиков GaAs, окруженных воздухом. Диаметр столбиков исследуемого фотонного кристалла  $D = 125$  нм, а расстояние между центрами столбиков (шаг)  $\Lambda = 380$  нм. Геометрическая структура волновода представлена на рисунке 3.

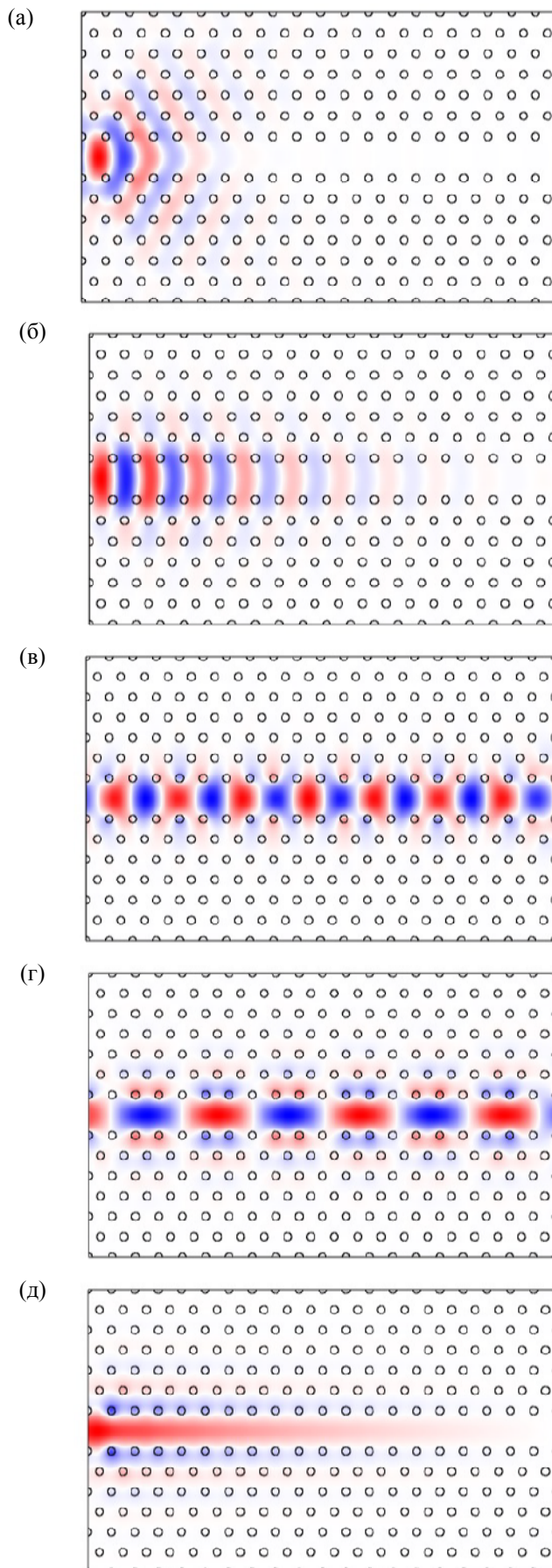


Рис 3. Распространение TE волн в волноводе

Для моделирования распространения света через исследуемый фотонно-кристаллический волновод плоская волна  $E_z = 1$  вводилась на левой границе и проводилось вычисление мощности  $P_{out}$  через правую границу для каждой длины волны. Мы рассчитывали исходящую мощность излучения в диапазоне длин волн от 0,7 до 1,2 мкм. Распространение TE волн приведено на рис. 3.

На рисунке 3 представлено распространение поперечной составляющей электрического поля при следующих длинах волн:

- а)  $\lambda=0,737$  мкм;
- б)  $\lambda=0,765$  мкм;
- в)  $\lambda=0,83$  мкм;
- г)  $\lambda=0,984$  мкм;
- д)  $\lambda=1,04$  мкм.

Полученные результаты показывают, что в рассмотренной структуре фотонно-кристаллического волновода возможно распространение света в строгом диапазоне длин волн. За пределами этого диапазона наблюдается запрещенная зона. Для определения полосы пропускания было проведено моделирование распространения света диапазоне длин волн от 0,7 до 1,2 мкм (300 значений). Результаты представлены на рисунке 4.

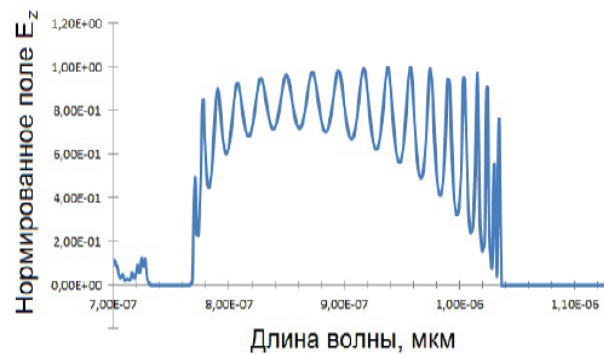


Рис 4. Полоса пропускания исследуемого волновода

Отметим, что на рисунке 4 представлена нормированные значения поперечной составляющей  $E_z$ . На краях полосы пропускания в волноводе наблюдаются значительные колебания величины проходящего электрического поля. Полученная зависимость показывает, что рассмотренный тип фотонно-кристаллического волновода может быть использован в качестве фильтра. Также, стоит отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами, представленными ранее [5]

### Моделирование распространения TE волн в двумерном фотонно-кристаллическом волноводе с изгибом 90°

Исследуемый волновод с изгибом представляет собой прямоугольную периодическую структуру состоящую из столбиков GaAs, окруженных воздухом. Диаметр столбиков (GaAs) фотонно-кристаллического волновода  $d=0,14$  мкм и расстояние между центрами столбов (шаг)  $\Lambda = 0,38$  мкм.



Основными задачами исследования являлись: расчет распределения поля и его интенсивности в исследуемом волноводном изгибе в зависимости от длины волны проходящего излучения. Поперечный профиль исследуемого волноводного изгиба, а также распределение поля в нем в зависимости от длины волны показаны на рисунке 5.

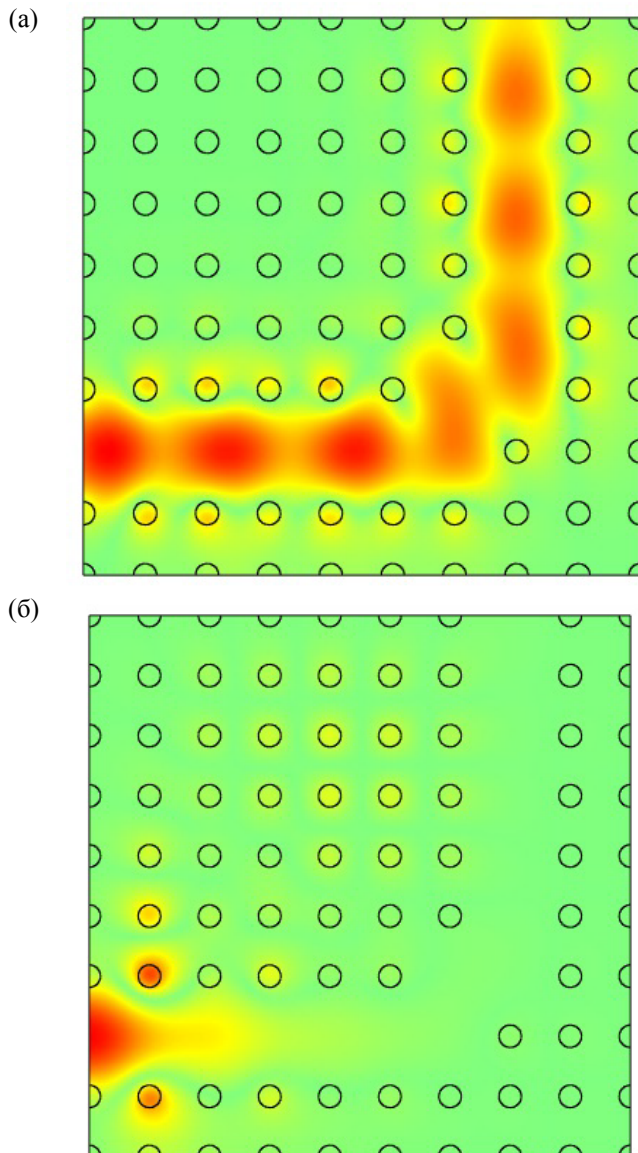


Рис 5. Распространение ТЕ волн в волноводном изгибе

На рисунке 5 представлено распространение поперечной составляющей электрического поля  $E_z$  при  $\lambda=1$  (рис.5(а)) мкм и  $\lambda=1,2$  мкм (рис.5(б)). Отметим, что в рассмотренной структуре фотонно-кристаллического волновода с изгибом возможно распространение света в определенном диапазоне длин волн, за пределами этого диапазона световая волна не будет распространяться вдоль волноводной структуры, как и в случае с волноводом, рассмотренным выше. Также, отметим, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами, представленными ранее [6]

### Выводы

В работе представлены результаты моделирования распространения поперечной составляющей электрического поля в двумерном фотонно-кристаллическом волноводe, а также в волноводe с изгибом  $90^\circ$ . Приведены результаты распределения поля в волноводe при различных значениях длин волн излучения, а также представлена полоса пропускания волновода без изгиба. Показано, что в рассмотренных структурах волноводов распространение света возможно в определенном диапазоне длин волн. Также показана возможность использования фотонно-кристаллического волновода в качестве фильтра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. M. Skorobogatiy, J. Yang, "Fundamentals of Photonic Crystal Guiding", Cambridge University Press, 2009. – 263p.
2. Jiaming Jin "The finite element method in electromagnetics", John Wiley & Sons Inc., pp. 5-9, 2002.
3. J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, and J.N. Winn, "Photonic Crystals", Princeton University Press, 1995.
4. L. Ouyhenart, V. Vigneras, "Photonic Crystals – Introduction, Applications and Theory", Published by InTech, pp. 267–290, March 2012.
5. A. I. Filipenko, A. N. Donskov, "Investigation of the 2-D Photonic Crystal Filter", International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013), pp. 58-59, 2013. ISBN: 978-1-4799-0019-0
6. Донсков А.Н. «Влияние геометрических характеристик на параметры передачи двумерного ФК волновода», Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013», Материалы 9-ой международной молодежной научно-технической конференции, с 205-206