УДК 621.372.8.082.5

РАСЧЁТ УЗЛА ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ

Д.В. Горейнов[1], Ю.Ю. Кривошеева[1]

[1]Самарский университет, г. Самара
e-mail: krivosheeva.yuyu@ssau.ru

Аннотация

С помощью генетической оптимизации для случая фотонно-кристаллического волновода, работающего в широком диапазоне длин волн, рассчитан узел их пересечения (пересечение трех волноводов). Показано, что лучший результат оптимизации достигается при записи целевой функции как суммы значений эффективностей из рассматриваемого диапазона. Полученная структура узла пересечения обеспечивает в среднем на 35% более высокую эффективность во всей запрещенной зоне по сравнению с исходным узлом.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, фотонная запрещенная зона, пересечение волноводов, генетический алгоритм.

Введение

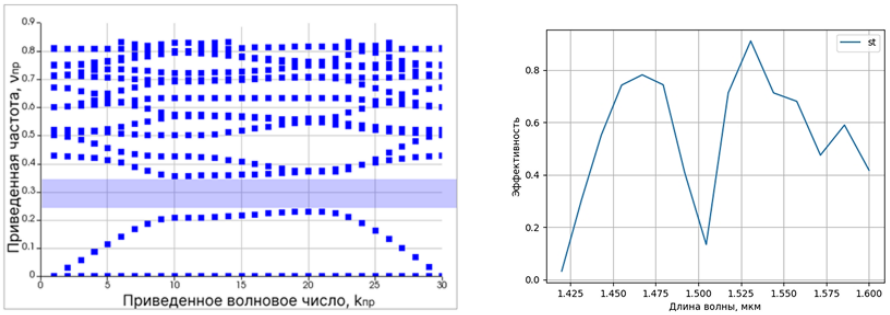
Цифровая интегральная фотоника превосходит традиционную электронику по скорости обработки данных, защищенности от электромагнитных помех и возможностям аппаратного шифрования. Это делает разработку таких устройств актуальной. Сегодня создаются интерференционные оптические логические элементы [1], фотонно-кристаллические переключатели [2], оптические фильтры [3] и другие компоненты. Однако их эффективность – отношение выходной интенсивности к входной – остается низкой, поэтому для ее повышения применяются различные методы оптимизации, такие как топологическая [4] (основанная на градиентном методе) или генетическая [5].

Актуальность представляет не просто повышение эффективности фотонно-кристаллических элементов, но и работа со всей запрещенной зоной кристалла, на базе которого выполнен элемент. В литературе можно найти примеры такого подхода: авторы [5,6] оптимизировали элементы в широкой полосе частот, а в [7] генетическая оптимизация использовалась для поиска конфигурации фотонного кристалла, который обладает широкой абсолютной запрещенной зоной. Рассмотрение всей запрещенной зоной позволяет создать устройство устойчивое к технологическим погрешностям изготовления и при работе с импульсными источниками.

Авторы настоящего исследования, продолжают работу [8], в которой была произведена генетическая оптимизация пересечения трех фотонно-кристаллических волноводов для длины волны 1,55 мкм, рассматривая всю запрещенную зону.

1. Постановка задачи

Конструируемый элемент представляет собой пересечение трех волноводов под углом 60° на фотонном кристалле с гексагональной решеткой и воздушными кавернами в кремнии [8]. Период кристалла a=459 нм, радиус каверн r=183,9 нм. Для данного кристалла с помощью PWE метода найдем запрещенную зону (рисунок 1(а)).



а б

Рисунок 1 – (а) зонная диаграмма для исследуемого кристалла, (б) эффективность узла пересечения с параметрами из [9] во всей запрещенной зоне

На рисунке 1(а) по оси ординат отложена приведенная частота $\upsilon_{\text{пр}} = \nu\frac{a}{c}$, где k – волновое число источника, a – период кристалла, c – скорость света, ν – частота излучения источника, фотонная запрещенная зона отмечена прямоугольником на графике. Из диаграммы можно найти примерный диапазон частот и, соответственно, длин волн, которые входят в запрещенную зону: λ=[1,3 мкм, 1,836 мкм]. Этот диапазон был уточнен методом вычислительного эксперимента (проверена работа прямого волновода на этих длинах волн). В результате интересующий нас диапазон $\lambda = [1{,}42\text{ мкм},\ 1{,}62\text{ мкм}]$.

Далее проверим работу узла пересечения при оптимизированных с помощью генетического алгоритма параметрах из [8] в найденном диапазоне (рисунок 1(б)). Как видно из рисунка, параметры, обеспечивающие высокое значение эффективности для одной длины волны (1,55 мкм), оказываются «несостоятельными» для других длин волн из запрещенной зоны. Поэтому представляется актуальным проведение новой оптимизации для всего диапазона.

Для повышения значений эффективностей узла пересечения во всей запрещенной зоне будем использовать генетический алгоритм, одна особь в котором представляет собой набор из трех параметров {r_0, r_1, d}, где r_0, r_1 – радиусы каверн, d – их смещения относительно начального положения, как в [8]. Однако, целевые функции в алгоритме должны каким-либо образом учитывать работу с широким диапазоном длин волн. Так, в настоящей работе рассматривалось три функции: следуя [5] будем максимизировать сумму значений эффективностей $F_1 = \sum_{i=1}^{N} \delta_i$; следуя [6] будем максимизировать минимальное значение эффективности $F_2 = \min\limits_{1\le i\le N} \delta_i$; в качестве еще одной функции, , не описанной, насколько нам известно, в литературе, возьмем среднее значение эффективностей $F_3 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \delta_i$. Здесь $\delta_i = \frac{P_i{}^{out}}{P_i{}^{in}}$ – эффективность, $i = \overline{1, N}$, N – количество разбиений диапазона длин волн. $P_i{}^{out}$ – интенсивность на выходе элемента,

соответствующая i-ой длине волны, P_i^{in} – интенсивность излучения, поданного на вход элемента, и соответствующая i-ой длине волны.

2. Результаты оптимизации

В результате оптимизации были получены следующие значения параметров: для функции F_1 r_1=139 нм, d =42 нм, для F_2 r_1=154 нм, d =99,6 нм, для F_3 r_1=138 нм, d =-15 нм (отметим, что, следуя [8], r_0 принудительно задается в алгоритме равным нулю). В таблице 1 показаны значения целевых функций до и после оптимизации, а на рисунке 2 представлены графики значений эффективностей для длин волн из запрещенной зоны узла пересечения до и после оптимизации для всех целевых функций.

Таблица 1 – Результаты оптимизации

	Изначальное пересечение	**Результаты оптимизации**	**Улучшение**
Сумма	8.415	11.339	35%
Минимум	0.075	0.371	395%
C	0.561	0.793	41,4%

Рисунок 2 – Сравнение эффективностей исходного узла пересечения с результатами оптимизации: оранжевая линия – изначальное пересечение, синяя – результат оптимизации

Хоть наибольшее увеличение значения целевой функции наблюдается в случае максимизации минимума, однако по графику можно видеть, что на большинстве длин волн эффективность либо повысилась незначительно, либо и вовсе уменьшилась. Самой лучшей оптимизацией оказалась максимизация суммы – практически на всех длинах волн из запрещенной зоны можно наблюдать повышение эффективности.

Заключение

В работе представлена модификация генетической оптимизационной процедуры для расчета узла, соответствующего пересечению трех фотонно-кристаллических волноводов, заключающаяся в учете работы с широком диапазоном длин волн. Оптимизация проводилась для трех целевых функций: суммы значений эффективностей в диапазоне, минимального значения эффективности и среднего значения. Наилучший результат дала оптимизация с целевой функцией суммы: оптимизированная структура пересечения трех фотонно-кристаллических волноводов с гексагональной решеткой и

воздушными кавернами обладает в среднем на 35% большей эффективностью во всей запрещенной зоне, чем структура без оптимизации.

Список использованных источников

1. New designs of a complete set of Photonic Crystals logic gates / M.E. Hussein [et al.] // Optics Communications. – 2018. – P. 411. – P. 175–181.

2. Rajasekar, R. Nano-optical Switch Based on Photonic Crystal Ring Resonator / R. Rajasekar, K. Parameshwari, S. Robinson // Plasmonics. – 2019. – V. 14. – P. 1687–1697.

3. Foroughifar, A. Design and analysis of a novel four-channel optical filter using ring resonators and line defects in photonic crystal microstructure / A. Foroughifar, H. Saghaei, E. Veisi // Optical and Quantum Electronics. 2021. – V. 53, № 2. – P. 101.

4. Broadband waveguide intersection with low-crosstalk in two-dimensional photonic crystal circuits by using topology optimization / Y. Watanabe [et al.] // Opt. Express. 2006. – V. 14. – P. 9502–9507

5. Optimization of low-loss and wide-band sharp photonic crystal waveguide bends using the genetic algorithm / Liyong Jiang [et al.] // Optik. 2013. – V. 124, № 14. – P. 1721–1725.

6. Design optimization of a low-loss and wide-band sharp 120 waveguide bend in 2D photonic crystals / Yuan J. [et al.] //Optics Communications. – 2016. – V. 367. – P. 356–363.

7. Genetic optimization of two-dimensional photonic crystals for large absolute band-gap / Li H. [et al.] //Optics communications. – 2009. – V. 282, №. 14. – P. 3012–3017.

8. Design of the Intersection Node of Photonic Crystal Waveguides Using a Genetic Algorithm / Yu.Yu. Krivosheeva, P.V. Moksin, D.L. Golovashkin, V.S. Pavelyev // 2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russian Federation. – 2024. – P. 1–5.

DESIGN OF THE INTERSECTION NODE OF PHOTONIC-CRYSTAL WAVEGUIDES IN A WIDE BANDWIDTH

D.V. Goreinov[1], Yu.Yu. Krivosheeva[1]

[1]Samara University, Samara
e-mail: krivosheeva.yuyu@ssau.ru

Abstract

Using genetic optimization, an intersection node (the intersection of three waveguides) was designed for a photonic crystal waveguide operating over a wide wavelength range. It was shown that the best optimization result is achieved by writing the objective function as the sum of the efficiency values over the considered range. The resulting intersection node structure provides, on average, 35% higher efficiency across the entire bandgap compared to the original node.

Keywords: photonic crystals, photonic band gap, waveguide intersection, genetic algorithm.