

Компоненты ФИС на основе фотонно-кристаллических резонаторов

К.Г. Еланская¹, А.Н. Назаров¹, Д.С. Агафонова¹, В.Н. Иванов^{1,2}, С.А. Тарасов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²АО НПО ГОИ им. С.И. Вавилова

Аннотация: в данной работе представлены результаты разработки и оптимизации в программной среде COMSOL Multiphysics фильтров на основе двумерных фотонных кристаллов с дефектами, состоящих из столбов кремния в воздухе. Методами численного моделирования были определены оптические характеристики структур: пропускание, отражение, добротность резонансного пика по полувысоте, а также оценена локализация электромагнитной волны. Проведенная оптимизация дефектных областей структур с целью увеличения добротности и локализации позволила достичь значительного сужения резонансных пиков, а показанная методика расчета конечных структур открывает широкие возможности для разработки компонентов с заданными характеристиками для фотонных интегральных схем. Представлено сравнение оптических характеристик структур, показано достижение добротности порядка 10^7 и увеличение амплитуды электромагнитной волны порядка 10^3 раз.

Ключевые слова: фотонный кристалл, фотонная интегральная схема, резонатор, добротность, пропускание, кремний

1. Введение

Фотонные интегральные схемы (ФИС) в настоящее время относятся к числу наиболее активно развивающихся направлений современной фотоники, а использование фотонных кристаллов (ФК) в составе ФИС рассматривается как перспективное решение задачи создания функциональных компактных устройств управления светом на чипе. [1, 2, 3]. Структуры на основе ФК представляют значительный интерес для интегральной сенсорики, поскольку резонаторы и волноводы на их основе позволяют реализовать высокочувствительное и селективное детектирование температурных, химических и биологических факторов реализуемые посредством анализа изменений их оптического отклика сохраняя высокие значения пропускания структур [1-6].

Таким образом, разработка и оптимизация структур на основе ФК, материалов с пространственной модуляцией диэлектрических свойств в одном, двух или трех измерениях на масштабе порядка длины волны электромагнитного излучения, вызывает интерес не только с научной точки зрения, но и с точки зрения широких возможностей практического применения. Наличие фотонной запрещенной зоны ФК позволяет с помощью оптимизации геометрии и дефектов широко варьировать спектральные характеристики конечных структур и проектировать компоненты для использования в различных областях оптики, оптоэлектроники, СВЧ-техники и нанофотоники отличающиеся низкими потерями, достижения высоких значений пропускания, добротности и локализации [6-10]. По сравнению с плазмонными и металлическими оптическими компонентами диэлектрические и полупроводниковые ФК компоненты характеризуются меньшей чувствительностью к электромагнитным помехам и паразитному нагреву [11], что способствует повышению стабильности и воспроизводимости их характеристик в составе ФИС.

Тема управления оптическими свойствами структур на основе ФК резонатора

широко представлена в литературе, однако несмотря на это, многофакторная оптимизация оптических характеристик конечных структур на основе ФК недостаточно освещена. Показанный в настоящей работе комплексный подход к оптимизации геометрии и дефектам в ФК массиве, расчету изменения оптических характеристик схем ФК фильтров от фиксированных параметров геометрии и размещения дефектов, позволят проектировать дефектные фотонно-кристаллические резонаторы с заданными оптическими характеристиками для эффективного включения в качестве компонентов в фотонные интегральные схемы на широком диапазоне длин волн [7, 8].

2. Оптимизация геометрии ФК резонатора и его оптические характеристики

Развитие интегральной оптики и оптоэлектроники требует разработки компактных, управляемых оптических элементов, совместимых с микро- и нанoeлектроникой. ФК волноводы и резонаторы, образованные диэлектрическими столбами с квадратной решеткой, являются перспективной основой для таких устройств. Исследование оптических характеристик конечных структур и комплексный подход к их оптимизация расширит возможности создания устройств и их компонентов на основе двумерных ФК резонаторов, позволит проектировать компоненты с заданными характеристиками в широком диапазоне, такими как пропускание, добротность, величина локализации и др.

Расчет и оптимизация конечных структур проводились с помощью численного моделирования методом конечных элементов в частотной области в программной среде COMSOL Multiphysics. Для уточнения диапазона исследования был проведен анализ собственных частот для выявления запрещенных зон бездефектного ФК и проведены корректировки диапазона с учетом вклада линейных дефектов с увеличенным радиусом стержней в массиве основного ФК. Массив фотонного кристалла представляет собой кремниевые столбы в воздушной среде, за счет высокого контраста показателей преломления материалов и оптимизацией размещения дефектов в виде исключения рядов элементарных ячеек ФК и увеличения радиусов ряда ФК, разработанные в программной среде структуры продемонстрировали высокую спектральную селективность.

На рисунке 1 представлен вариант схемы оптимизируемого резонатора и пример расчета конечной структуры. Направления оптимизации геометрии дефектов резонаторной области и др. структурных элементов схемы включают в себя изменение количества рядов в массиве ФК или ячеек в линейных дефектах, изменение величины радиусов стержней линейных дефектов, оптимизацию длины волноводов. Результат расчета структуры (рисунок 1):

1. Длина волны резонанса: 1558,56 нм;
2. Пропускание: 89,3 %;
3. Модуль напряженности электрического поля в центре структуры: 6,14 МВ/м;
4. Добротность по полувысоте резонансного пика: 56 613;
5. Полуширина резонансного пика: 27,5 пм.

Для исследуемых структур характерна высокая спектральная селективность, выражающаяся в наличии одного пика пропускания в окрестности показанной резонансной длины волны (рисунок 1, *в*) с уровнем более 1 % в широком диапазоне длин волн (рисунок 2, *б*). Исследование ограничено вычисленной фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ) ФК.

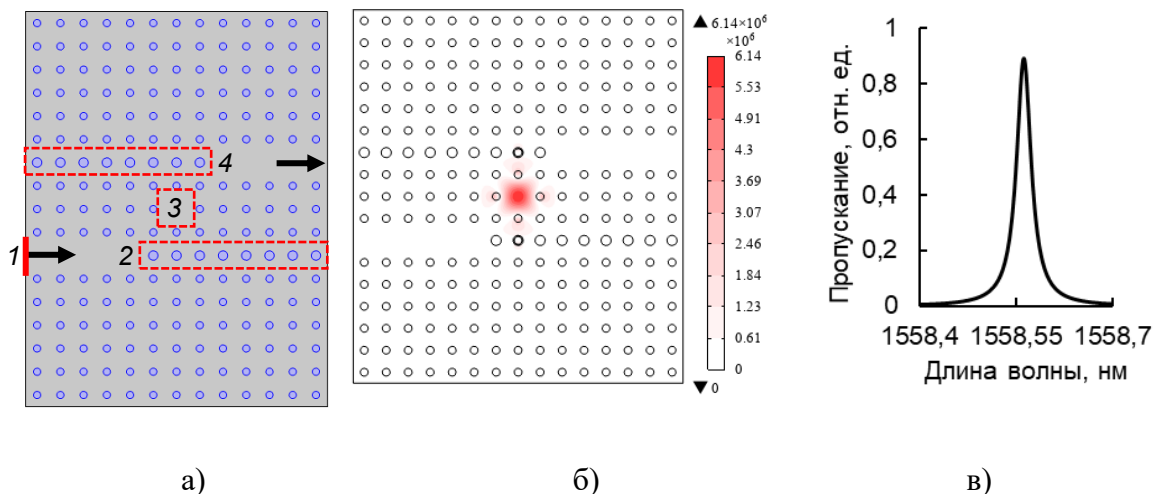


Рисунок 1. Пример расчета конечной ФК структуры: *а)* – схема ФК резонатора: 1 – источник электромагнитной ТЕ-волны; 2 – волновод входной с рядом отражателей; 3 – точечный дефект в массиве ФК представляющий собой резонансную область; 4 – выходной волновод с рядом отражателей. *б)* – напряженность электромагнитного поля на резонансной длине волны *в)* – пропускание в окрестности резонансного пика.

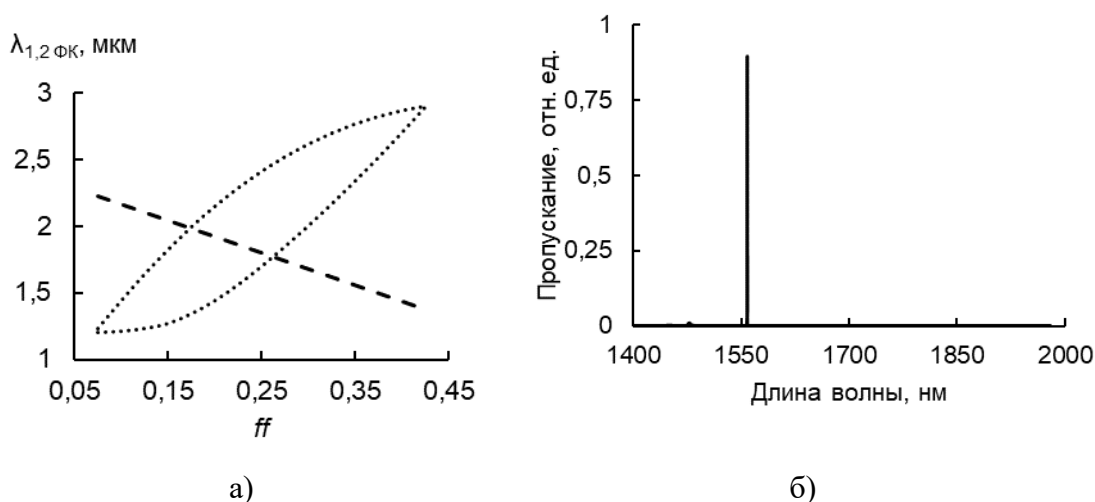


Рисунок 2. Пропускание ФК резонатора на широком диапазоне длин волн. *а)* – границы 1 ФЗЗ ФК от фактора заполнения. Пунктиром указана длина волны отсечки, *б)* – пропускание на всем диапазоне ФЗЗ для структуры (рисунок 1)

Варьирование глобальных геометрических параметров структуры на ФК, таких как фактор заполнения $ff = r/a$, и вычисление вышеперечисленных характеристик на всем диапазоне допустимых значений ff (рисунок 2, а) позволяет выявлять транслируемые в соответствии с соотношениями закономерности изменения оптических характеристик от фактора заполнения. Таким образом, при изменении периода решетки массива ФК и сохранении прочих соотношений в структуре удастся воспроизводить результат для других рабочих длин волн.

Ключевым фактором, влияющим на характер изменения вышеперечисленных значений от ff в конечных структурах, являются дефекты и их расположение относительно друг друга. Вариации конфигураций формируют диапазон изменений каждого из оптических параметров. Пример расчета структуры и выявленные закономерности изменения оптических характеристик от фактора заполнения представлены на рисунке 3.

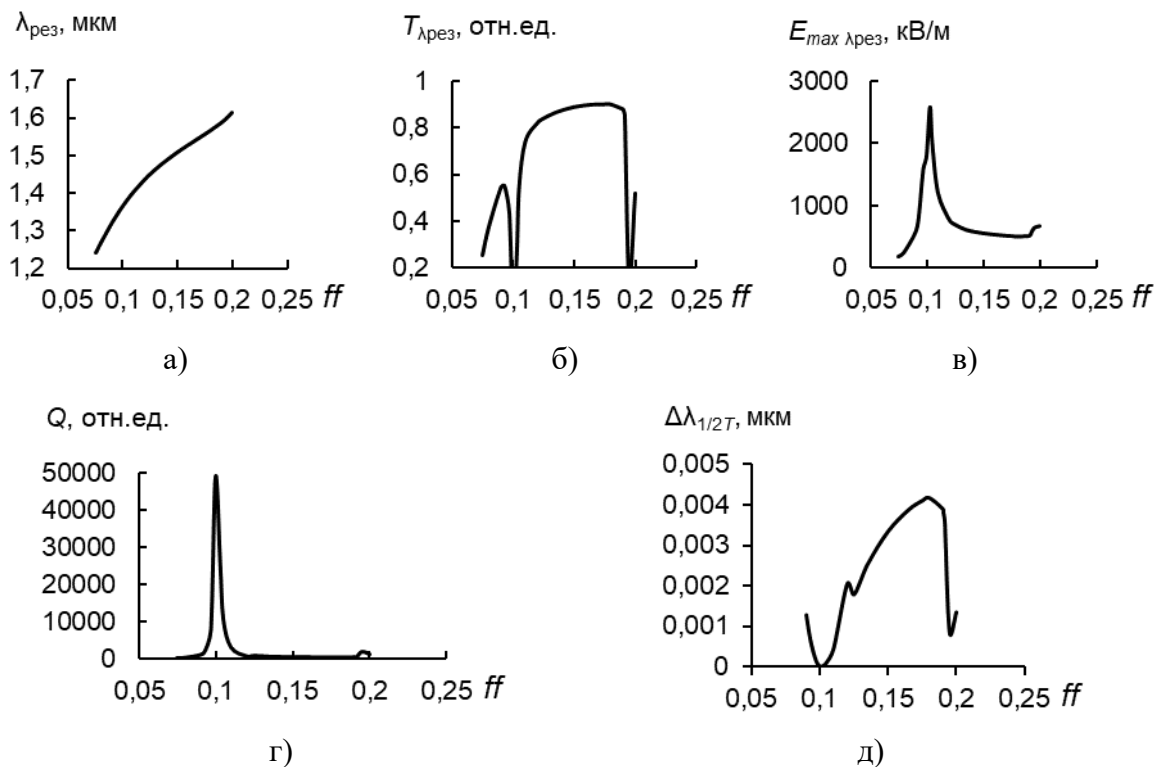


Рисунок 3. Пример расчета для оптимизации оптических характеристик в зависимости от фактора заполнения: а) длина волны резонанса структуры; б) пропускание; в) модуль напряженности электрического поля в центре структуры; г) добротность по полувысоте резонансного пика; д) полуширина резонансного пика.

Изменения оптических характеристик для разных конфигураций на примере оптимизации 2-х параметров резонаторов приведены в таблице 1, где $\lambda_{рез}$ – длина волны резонанса, T – пропускание структуры на длине волны резонанса, E – значение напряженности электрического поля в центре резонансной области, Q – добротность резонансного пика по полувысоте, $\Delta\lambda$ – ширина резонансного пика по полувысоте при фиксированном значении фактора заполнения для различных схем с изменением тех или иных параметров (рисунок 3). Пример результата расчета схемы 1.1 представлен на рисунке 1.

Таблица 1. Сравнение оптических характеристик

Структура	$\lambda_{рез}$, нм	T , %	$E_{max \lambda_{рез}}$, кВ/м	Q , отн.ед.	$\Delta\lambda_{1/2T}$, пм
Схема 1.1	1 558,56	89,3	6 142	56 613	27,5
Схема 1.2	1 510,1666	87,7	17 642	470 310	3,2
Схема 1.3	1 510,1660	50,5	94 895	17 808 561	0,085
Схема 2.1	1 544,8	86,6	650	659	2 343,6
Схема 2.2	1 544,406	87,7	3 128	15 475	99,8
Схема 2.3	1 544,39	47,6	39 284	3 244 521	0,476

Усовершенствование схем фильтров на двумерном фотонном кристалле прямоугольной симметрии и их оптимизация позволили достичь сверхвысоких значений добротности и локализации поля, сравнимой и превосходящей значения для структур с более плотной упаковкой элементарных ячеек [9, 10].

3. Заключение

Компоненты для ФИС на основе ФК-резонаторов демонстрируют значительную вариативность основных параметров оптических характеристик, что указывает на широкий потенциал их структурной и функциональной оптимизации. Полученные оптические характеристики свидетельствуют о возможности проектирования компонентов на основе ФК-резонаторов в широком диапазоне параметров с заранее заданными свойствами.

Установлено, что варьирование параметров структуры позволяет управлять не только длиной волны резонанса при сохранении высокого пропускания, но и добротностью, шириной резонансного пика на полувывоте, а также степенью локализации электромагнитного поля. Сравнительный анализ оптических характеристик ФК-резонаторов, приведенный в таблице 1, свидетельствует о том, что изменение конструктивных параметров приводит к комплексной перестройке спектральных и резонансных свойств структуры. Это подтверждает, что оптимизация ФК-резонаторов должна быть направлена на согласованное управление несколькими характеристиками одновременно, что особенно важно при разработке компонентов для интеграции в оптические системы различного назначения.

Результаты исследования показывают, что оптимизация геометрии и конфигурации дефектов позволяет многократно повысить добротность и локализацию поля без усложнения технологического процесса. Такой подход дает возможность гибко адаптировать структуру фотонного кристалла под конкретные задачи, достигая заданных оптических характеристик на требуемых длинах волн.

Список литературы

1. Butt M. A., Khonina S. N., Kazanskiy N. L. Recent advances in photonic crystal optical devices: A review // *Optics & laser technology*. – 2021. – Т. 142. – С. 107265
2. Butt M. A. et al. A review on photonic sensing technologies: status and outlook // *Biosensors*. – 2023. – Т. 13. – №. 5. – С. 568.
3. Butt M. A., Janaszek B., Piramidowicz R. Lighting the way forward: The bright future of photonic integrated circuits // *Sensors International*. – 2025. – Т. 6. – С. 100326.
4. Xiao Y. et al. Scalable photonic crystal waveguides with 2 dB component loss // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2022. – Т. 34. – №. 12. – С. 637-640.
5. Yang Y. et al. Recent advances in photonic crystal-based chemical sensors // *Chemical Communications*. – 2024. – Т. 60. – №. 69. – С. 9177-9193.
6. Rajasekar R. Numerical investigation of nanoresonator based ultra narrow-band photonic filters // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. – 2024. – Т. 23. – С. 188-194.
7. Еланская К. Г., Сидоров А. И. Оптимизация геометрии двумерного фотоннокристаллического волновода для телекоммуникационных применений и сенсорики // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2024. – Т. 24. – №. 6. – С. 892-898.
8. Еланская К. Г., Сидоров А. И. Оптические свойства и локализация поля электромагнитной волны в системе 2D фотоннокристаллических прямоугольных резонаторов с электромагнитной связью // *Оптика и спектроскопия*. 2025. Т. 133. №. 9. С. 963-967.
9. Zhang J. et al. Ultrahigh-Q and ultrasensitive quasi-bound states in the continuum via asymmetric environment engineering of a photonic crystal slab // *Optics Express*. – 2025. – Т. 33. – №. 23. – С. 48227-48243.
10. Takata K. et al. Improved design and experimental demonstration of ultrahigh-Q C6-symmetric H1 hexapole photonic crystal nanocavities // *Optics Express*. – 2023. – Т. 31. – №. 7. – С. 11864-11884.
11. Chung T., Wang H., Cai H. Dielectric metasurfaces for next-generation optical biosensing: a comparison with plasmonic sensing // *Nanotechnology*. – 2023. – Т. 34. – №. 40. – С. 402001.