

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ И МОДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

А.И. Гарифуллин^{1,2*}, Н.М. Арсланов²

¹Институт физики, Казанский федеральный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а

² Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева - КАИ
420111, г. Казань, ул. Четаева, 18а
e-mail: adel-garifullin@mail.ru

Аннотация статьи. Фотонно-кристаллические (нанофотонные) резонаторы являются необходимыми элементами для создания оптоэлектронных устройств на чипе. В настоящей работе проведен расчет добротности, модовой площади, модового объема и фактора Парселла фотонно-кристаллического резонатора на основе ванадата иттрия для генерации резонансных состояний с высокой добротностью. Численные расчеты проводились с использованием метода конечных разностей во временной области.

Ключевые слова: фотонно-кристаллический, нанофотонный резонатор, ортованадат иттрия, добротность, модовый объем, модовая площадь, фактор Парселла

1. Введение

Усиление взаимодействия света и вещества позволяет исследовать и наблюдать фундаментальные квантовые эффекты [1-4], а также применять их в перспективных оптоэлектронных устройствах для квантовых вычислений и квантовых коммуникаций [5, 6]. В качестве одного из таких устройств выступают фотонно-кристаллические (нанофотонные) резонаторы, изготовленные из диэлектрического волновода и вытравленного на нем периодического массива полос или отверстий. Нанофотонные резонаторы на основе кремния (Si , $n \approx 3.45$) надежно удерживают свет с высоким значением добротности, так и с малым модовым объемом, значительно усиливая это взаимодействие [7]. Известные примеры включают высокоэффективные оптические модуляторы и переключатели, ультракомпактные фильтры и усовершенствованную нелинейную оптику. Однако скорость модуляции кремниевой фотоники в первую очередь ограничена присущими ей поглощающими характеристиками в видимом диапазоне, что затрудняет удовлетворение экспоненциально растущего спроса в индустрии оптоэлектроники и коммуникаций.

Однако существует множество других материалов, включая оксидные кристаллы, такие как ванадат иттрия (YVO_4 , $n \approx 2.2$), ортосиликат иттрия (Y_2SiO_5 , $n \approx 1.9$), ниобат лития (LiNbO_3 , $n \approx 2.3$) и титанилфосфат калия (KTiOPO_4 , $n \approx 1.76$), обладающие интересными нелинейными и люминесцентными свойствами (при допировании редкоземельными ионами), которые могут быть использованы в нанофотонике и квантовых технологиях.

В данной работе проведен расчет спектральных и модовых характеристик, таких как спектры пропускания, добротность, модовый объем, модовая площадь и фактора Парселла, фотонно-кристаллического резонатора на основе YVO для генерации высокодобротных резонансных состояний. Расчеты проводились методом конечных разностей во временной области в программных пакетах MEEP, Ansys Lumerical.

2. Построение спектра пропускания и расчет добротности фотонно-кристаллического резонатора

В данной работе мы использовали дизайн (рис. 1) и устойчивую платформу для будущего изготовления фотонно-кристаллических резонаторов на основе прямоугольных пластин треугольного поперечного профиля с продольными канавками, вытравленных в объемном кристалле оксида YVO_4 [8]. В отличие от обычной конструкции фотонных кристаллов, основанной на вакуумных/воздушных отверстиях в тонкой пластине подложки, треугольная геометрия резонатора в сочетании с прямоугольной субволновой оптической решеткой обеспечивает лучшую устойчивость к смещениям, перпендикулярным оси резонатора, которые могут возникать в процессе фабрикации.

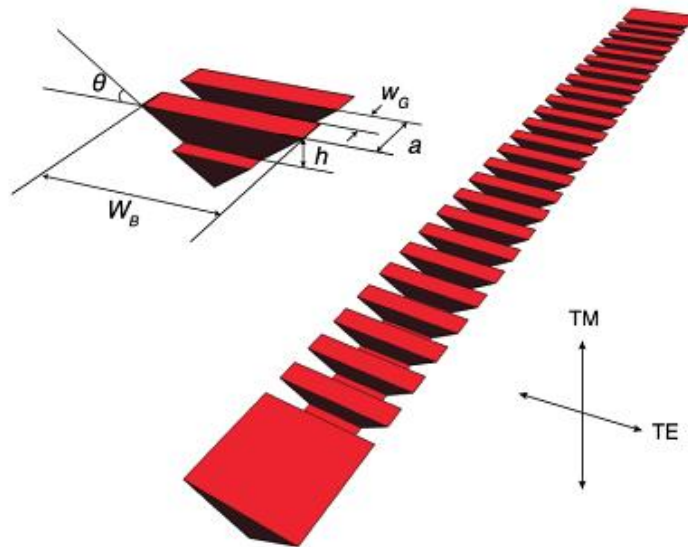


Рис. 1. Схематическое изображение фотонно-кристаллического (нанофотонного) резонатора, состоящего из периодического массива прямоугольных пластин треугольного профиля с периодом a (брэгговские зеркала) и продольными канавками между ними. Ширина волновода $w_B = 0.852\lambda$, постоянная решетки $a = 0.352\lambda$ ($0.95a$), ширина канавки $w_G = 0.210\lambda$, λ – резонансная длина волны, глубина канавки $h = 0.350w_B \tan(\theta)$ и внутренний угол треугольного профиля волновода $\theta = 60^\circ$.

В расчетах мы использовали следующие геометрические параметры волновода на основе YVO_4 ($n \approx 2.2$) для целевой длины волны $\lambda = 880$ нм $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$ Nd^{3+} : ширина волновода $w_B = 0.852\lambda$, постоянная решетки $a = 0.352\lambda$ ($0.95a$), ширина канавки $w_G = 0.210\lambda$, глубина канавки $h = 0.350w_B \tan(\theta)$ и внутренний угол треугольного профиля волновода $\theta = 60^\circ$. В волноводе созданы 40 канавок (14 из которых имеют возмущенный период решетки по квадратичному закону), что обеспечивает высокую добротность нанорезонатора.

Рассчитанные величины добротностей, модовой площади, модового объема и фактора Парселла в нанофотонной структуре из YVO_4 составили для ТЕ-поляризации: $Q_{\text{TE}} = 4.2 \cdot 10^5$, $S_{\text{TE}} = 0.169$ мкм², $V_{\text{TE}} = 0.043$ мкм³ ($0.70(\lambda/n_{\text{YVO}_4})^3$) и $F_{\text{PTE}} = 4.5 \cdot 10^4$ на длине волны $\lambda = 0.865$ мкм. Для ТМ-поляризации: $Q_{\text{TM}} = 1.5 \cdot 10^6$, $S_{\text{TM}} = 0.144$ мкм², $V_{\text{TM}} = 0.065$ мкм³ ($0.95(\lambda/n_{\text{YVO}_4})^3$) и $F_{\text{PTM}} = 4.9 \cdot 10^4$ на длине волны $\lambda = 0.898$ мкм (рис. 2).

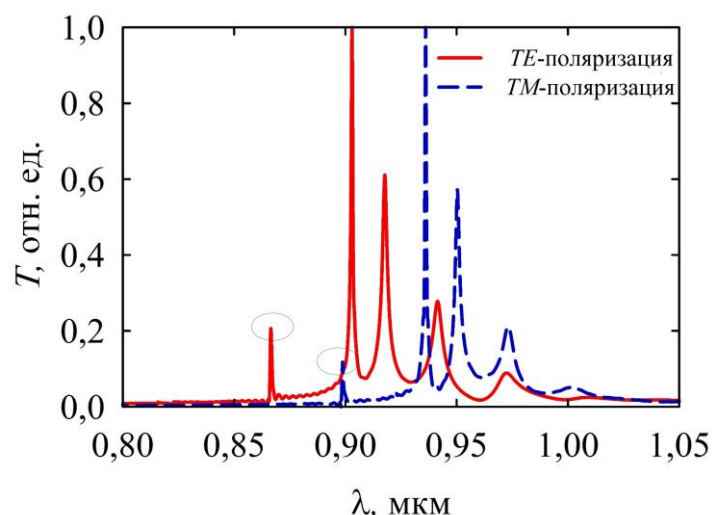


Рис. 2. Спектры пропускания для ТЕ- и ТМ-поляризации света в фотонно-кристаллическом резонаторе из YVO_4 с треугольным профилем. Максимальные величины добротностей для структуры из YVO_4 составили $Q_{\text{TE}} = 4.2 \cdot 10^5$ для $\lambda = 0.865$ мкм и $Q_{\text{TM}} = 1.5 \cdot 10^6$ для $\lambda = 0.898$ мкм (пики отмечены кружками). Модовая площадь, модовый объем и фактор Парселла для ТЕ-поляризации: $S_{\text{TE}} = 0.169$ мкм², $V_{\text{TE}} = 0.043$ мкм³ ($0.70(\lambda/n_{\text{YVO}_4})^3$) и $F_{\text{PTE}} = 4.5 \cdot 10^4$ для $\lambda = 0.865$ мкм. Модовая площадь, модовый объем и фактор Парселла для ТМ-поляризации: $S_{\text{TM}} = 0.144$ мкм², $V_{\text{TM}} = 0.065$ мкм³ ($0.95(\lambda/n_{\text{YVO}_4})^3$) и $F_{\text{PTM}} = 4.9 \cdot 10^4$ для $\lambda = 0.898$ мкм.

Результаты и выводы

В настоящей работе проведен расчет добротности, модовой площади, модового объема и фактора Парселла фотонно-кристаллического резонатора на основе ванадата иттрия для генерации резонансных состояний с высокой добротностью. Рассчитанные величины добротности имели максимальные значения 10^5 - 10^6 , коэффициент усиления излучения – фактор Парселла – 10^4 . Численные расчеты проводились с использованием метода конечных разностей во временной области. Фотонно-кристаллический резонатор с высокой добротностью и малым модовым объемом является перспективной системой для создания мультифункциональных чипов, объединяющих радиоэлектронные и оптические устройства и усиления взаимодействия света и вещества.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Рег. номер NIOKTR 125012300688-6).

Литература

1. Quantum electrodynamics in photonic crystals and controllability of ionization energy of atoms / R.Kh. Gainutdinov [et al.] // Physics Letters A. 2021. V. 404. No. 127407. P.1-7.
2. Gainutdinov R.Kh., Garifullin A.I., Khamadeev M.A. Effect of changing the electron mass and physicochemical processes in one-dimensional photonic crystals // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2019. V. 46. No. 4. P. 115-117.
3. Strong interaction effects in the emission spectra of a quantum dot coupled to a phonon reservoir / R.Kh. Gainutdinov [et al.] // JETP Letters. 2021. V. 114. No. 4. P. 188-194.
4. Dressing of superconducting qubits by their interaction with a low frequency photon reservoir / R.Kh. Gainutdinov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1283. No. 012004. P.1-6.
5. Garifullin A.I., Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A. / Acceleration of Chemical Reactions in Hybrid One-Dimensional Photonic Crystals Based on High-Index

Metamaterials // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. No. Suppl. 1. P. S66-S70.

6. Garifullin A.I., Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A. / Controlling the frequencies of photons emitted by a single quantum dot in a one-dimensional photonic crystal // Journal of Optical Technology. 2024. V. 91. No. 6. P. 399-404.
7. Garifullin A.I., Arslanov N.M. / Optimization of Si_3N_4 nanophotonic resonator taking into account the substrate influence // Optical Technologies for Telecommunications 2023. – SPIE. 2024. V.13168. P. 1-6.
8. High quality factor nanophotonic resonators in bulk rare-earth doped crystals / T. Zhong [et al.] // Optics Express. 2016. V. 24. No. 1. P. 536-544.

CALCULATION OF SPECTRAL AND MODE CHARACTERISTICS OF A PHOTONIC CRYSTAL RESONATOR

A. I. Garifullin^{1,2*}, N. M. Arslanov²

¹ *Institute of Physics, Kazan Federal University
420008, Kazan, Kremlevskaya St., 16a*

² *Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University named after A.N
Tupolev – KAI
420111, Kazan, Chetaeva St., 18a*

*e-mail: adel-garifullin@mail.ru

Abstract. Photonic crystal (nanophotonic) resonators are essential elements for creating optoelectronic devices on a chip. In this paper, the Q -factor, mode area, mode volume, and Purcell factor of a photonic crystal resonator based on yttrium vanadate to generate high- Q resonant states are calculated. Numerical calculations using the finite-difference time-domain method were performed.

Key words: photonic crystal, nanophotonic resonator, yttrium orthovanadate, Q factor, mode volume, mode area, Purcell factor