

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ И МОДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОФОТОННОГО РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И НИТРИДА КРЕМНИЯ

А.И. Гарифуллин, Н.М. Арсланов

В данной работе проведен расчет добротности, модовой площади и модового объема нанофотонного резонатора из кремния и нитрида кремния для генерации высокодобротных резонансных состояний. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности. Результаты расчетов согласуются с литературными данными.

Ключевые слова: нанофотонный резонатор, кремний, нитрид кремния, добротность, модовая площадь, модовый объем

Введение

Разработка мультифункциональных чипов, объединяющих радиоэлектронные и оптические устройства позволит значительно увеличить автономность и защищенность беспилотных технических систем, а также ускорит обработку информации при работе в рее. Для создания на кристалле и фотонных интегральных схем систем нанолазеров, однофотонных источников, маломощных оптоэлектронных переключателей, высокочувствительных сенсоров необходимыми элементами являются высокодобротные нанофотонные резонаторы [1]. Данные системы важны для наблюдения и исследования эффектов квантовой электродинамики в полости [2]. В обычных однородных и изотропных средах свет взаимодействует с веществом крайне слабо, оптические резонаторы с большим значением добротности и малым модовым объемом позволяют усилить это взаимодействие (эффект Парселла). Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности. Данный метод состоит из следующих положений: 1) нулевая длина полости ($L = 0$), 2) постоянный период a структуры и 3) гауссово-подобный профиль затухания световой волны, распространяющейся внутри нанофотонного резонатора. В расчетах мы использовали следующие геометрические параметры волновода из Si ($n = 3.46$) на подложке из SiO₂/Si для целевой резонансной длины волны $\lambda = 1.55$ мкм: ширина волновода $w = 0.70$ мкм, постоянная решетки $a = 0.33$ мкм, высота волновода $h = 0.22$ мкм, число дефектных отверстий (с изменяющимся по квадратичному закону радиусом) $N_{\text{def}} = 20$, число отверстий с постоянным радиусом $N = 10$, $f_{\text{start}} = 0.2$, $f_{\text{end}} = 0.1$. Для нанофотонного резонатора на основе Si₃N₄ ($n = 2$) на подложке из SiO₂/Si для целевой резонансной длины волны $\lambda = 1.55$ мкм: ширина волновода $w = 2.30$ мкм, постоянная решетки $a = 0.60$ мкм, высота волновода $h = 0.22$ мкм, N_{def} и N аналогичны первому набору параметров, $f_{\text{start}} = 0.1765$, $f_{\text{end}} = 0.1373$.

Расчет добротности, модовой площади и модового объема нанофотонного резонатора

Для оптимизации параметров нанофотонного резонатора мы рассчитали его спектры пропускания с помощью метода FDTD, используя программные пакеты MPB, MEEP, Ansys Lumerical и Comsol. Симметричная относительно всех трех осей структура резонатора показана на Рисунке 1а. Она состоит из волновода и вытравленного на нем периодического массива воздушных полостей с убывающим радиусом. Период структуры постоянный, и расстояние L между двумя центральными ячейками, содержащими два центральных отверстия, равно нулю, что приводит к меньшим потерям в резонаторе и малому модовому объему.

Добротность нанофотонного резонатора может быть увеличена с помощью уменьшения рассеяния света при его распространении вдоль оси волновода (ось x , Рис. 1а). Для этого необходимо преобразовать рассеянный свет в распространяющееся излучение. В нанофотонном резонаторе с периодическим набором

отверстий распространяющееся эманесцентное излучение описывается как $\sin(\beta_{\text{Bragg}} x) \exp(-\gamma x)$, где γ – постоянная затухания [3]. Потери на рассеяние света уменьшаются при значении волнового числа $\beta_{\text{Bragg}} = \pi/a$ на границе первой зоны Бриллюэна. Световая волна, распространяющаяся в области нанофотонного резонатора без отверстий в начале и конце структуры, может быть выражена как $\sin(\beta_{\text{wg}} x)$. Тогда для уменьшения потерь света на границе волновод/брэгговские зеркала необходимо выполнение условия фазового синхронизма $\beta_{\text{Bragg}} = \beta_{\text{wg}}$.

Обычно, пространственный профиль светового пучка в волноводе при $\beta = \pi/a$ имеет лоренцевский профиль. Для уменьшения энергии пространственных гармоник и, соответственно, увеличения Q необходимо, чтобы распространяющаяся в области брэгговских зеркал световая волна имела гауссовый профиль затухания $\sin(\beta_{\text{Gauss}} x) \exp(-\sigma x^2)$. Тогда такая волна будет иметь постоянную затухания $\gamma = \sigma x$, растущую от одного отверстия (зеркала) к другому.

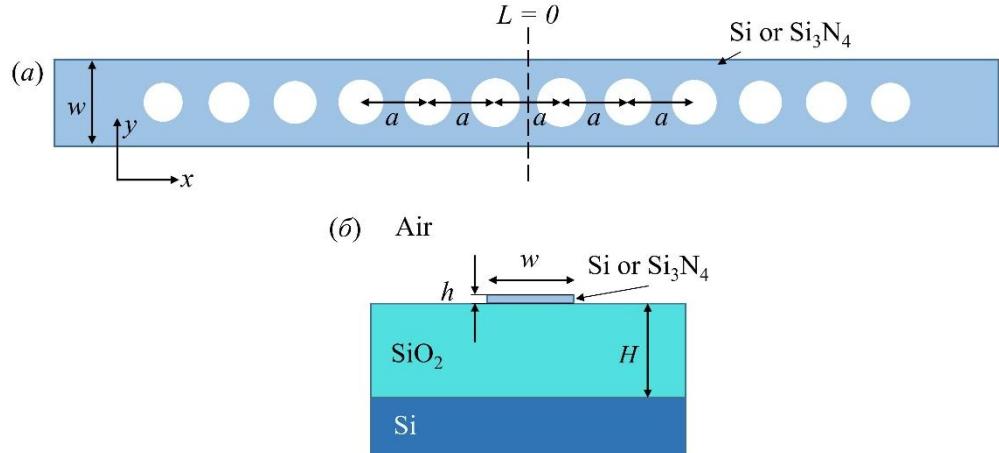


Рис.1 а – Схематическое изображение нанофотонного резонатора, состоящего из волновода и массива цилиндрических отверстий с периодом a (брэгговские зеркала). б – Схематическое изображение поперечного сечения волновода на пластинах Si/SiO₂/Si, Si/SiO₂/Si₃N₄ с толщиной слоя Si, Si₃N₄ $h = 0.22$ мкм и толщиной слоя SiO₂ $H = 2.50$ мкм. Ширина волновода из Si равна $w = 0.70$ мкм, из Si₃N₄ – 2.30 мкм.

Рассчитанные величины добротностей, модовой площади и модового объема ТЕ-поляризации электромагнитной волны для нанофотонной структуры из Si составили: $Q_1 = 8.2 \cdot 10^5$ для $\lambda = 1.578$ мкм (без учета влияния подложки), $Q_2 = 1.7 \cdot 10^5$ для $\lambda = 1.560$ мкм (с учетом влияния подложки). $S_{\text{mode}} = 0.064$ мкм² и $V_{\text{mode}} = 0.011$ мкм³ для $\lambda = 1.550$ мкм.

Рассчитанные величины добротностей, модовой площади и модового объема ТЕ-поляризации электромагнитной волны для нанофотонной структуры из Si₃N₄ составили: $Q_1 = 610$ для $\lambda = 1.551$ мкм (без учета влияния подложки), $Q_2 = 40$ для $\lambda = 1.531$ мкм (с учетом влияния подложки). $S_{\text{mode}} = 0.334$ мкм² и $V_{\text{mode}} = 0.062$ мкм³ для $\lambda = 1.550$ мкм.

Приведенные результаты были получены при 3D FDTD моделировании с размером сетки 20 нм, времени симуляции 5000 фс и параметре auto shutoff min 10^{-7} . Отметим, что добротность нанофотонной структуры из нитрида кремния мала по сравнению с добротностью структуры из кремния. Это значительное отличие можно объяснить меньшим показателем преломления и, соответственно, меньшим удержанием поля в резонаторе, большей шириной волновода из нитрида кремния. Это приводит к просачиванию света в подложку из SiO₂, что ведет к изменению добротности нанофотонного резонатора из Si₃N₄.

Заключение

В данной работе проведен расчет спектральных и модовых характеристик, таких как добротность, модовый объем и модовая площадь нанофотонного резонатора из кремния и нитрида кремния. Нанофотонный резонатор с высокой добротностью и малым модовым объемом является необходимым элементом для усиления взаимодействия света и вещества и создания фотонных интегральных схем. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности.

Благодарность

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Brien J. L., Furusawa A. et al. Photonic quantum technologies // Nature Photonics. 2009. V.3. P.687.
2. Gainutdinov R. Kh., Nabieva L. J. et al. Dressing of superconducting qubits by their interaction with a low frequency photon reservoir // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V.1283. P.012004(1).
3. Garifullin A. I., Arslanov N. M. Optimization of Si_3N_4 nanophotonic resonator taking into account the substrate influence. Proc. SPIE. 2024. V.13168. P. 1.

CALCULATION OF SPECTRAL AND MODE CHARACTERISTICS OF A NANOPHOTONIC RESONATOR BASED ON SILICON AND SILICON NITRIDE

A.I. Garifullin, N.M. Arslanov

In this paper, the Q -factor, mode area, and mode volume of a nanophotonic resonator made of silicon and silicon nitride to generate high- Q resonant states are calculated. The calculations using a deterministic method for achieving high Q -factor values were carried out. The calculation results are consistent with the literature data.

Keywords: nanophotonic resonator, silicon, silicon nitride, Q -factor, mode area, mode volume

Авторы

Адель Ильдусович Гарифуллин — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптики и нанофотоники Института физики Казанского федерального университета, 420008, Казань, Россия; научный сотрудник Казанского квантового центра Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, Россия; adel-garifullin@mail.ru
Наркис Мусавирович Арсланов — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры электронных и квантовых средств передачи информации Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, Россия; заведующий лабораторией интегральной квантовой оптики Казанского квантового центра Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, Россия; narkis@yandex.ru

Authors

Adel I. Garifullin — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Optics and Nanophotonics of the Institute of Physics of the Kazan Federal University, 420008, Kazan, Russia; Researcher of the Kazan Quantum Center of the Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, 420111, Kazan, Russia; adel-garifullin@mail.ru

Narkis M. Arslanov — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Electronic and Quantum Information Transmission Media of the Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, 420111, Kazan, Russia; Head of the Laboratory of Integrated Quantum Optics of the Kazan Quantum Center of the Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, 420111, Kazan, Russia; narkis@yandex.ru