

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И МОДОВЫХ СВОЙСТВ НАНОФОТОННЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И НИТРИДА КРЕМНИЯ

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

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

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

Кремниевая фотоника позволяет интегрировать различные оптические компоненты для приложений в линейной и нелинейной оптике, включая телекоммуникации, однофотонные источники света, биосенсоры. Для создания фотонных интегральных схем вместе с нанолазерами, однофотонными источниками, маломощными оптоэлектронными переключателями, высокочувствительными сенсорами необходимыми элементами являются высокодобротные нанофотонные резонаторы. В данной работе проведен расчет добротности, модовой площади, модового объема и фактора Парселла нанофотонного резонатора из кремния и нитрида кремния для генерации высокодобротных резонансных состояний. Численные расчеты проводились с использованием метода FDTD.

Ключевые слова: нанофотонный резонатор, фотонный кристалл, кремний, нитрид кремния, добротность, модовая площадь, модовый объем, фактор Парселла.

Нанофотонные резонаторы являются важными элементами функциональных устройств фотонных интегральных схем как нанолазеры, однофотонные источники света, маломощные оптоэлектронные переключатели, биосенсоры, квантовая память [1, 2]. Вместе с этим, данные системы важны и перспективны для наблюдения, исследования и проверки фундаментальных эффектов квантовой электродинамики в полости [3-5].

Благодаря периодическому изменению показателя преломления, довольно большому оптическому контрасту, например, $n_{\text{Si}}/n_{\text{air}}$ и наличию дефекта в центре структуры в виде изменяющегося периода или толщин слоев двух сред, нанофотонные резонаторы позволяют создавать дефектные пики пропускания на резонансных длинах волн внутри фотонной запрещенной зоны. С помощью оптимизации геометрических параметров структуры можно добиться создания высокодобротных резонансных состояний, локализованных вблизи дефекта на структуре. Эти локализованные состояния называются медленным светом. Локализация света позволяет усилить взаимодействие света и вещества (эффект Парселла), что важно для многих приложений.

В данной работе численные расчеты проводились с использованием метода FDTD. В расчетах мы использовали следующие геометрические параметры волновода на основе Si ($n = 3.46$) на подложке из SiO_2/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 $N = 10$, начальный и конечный факторы заполнения $f_{\text{start}} = 0.2$, $f_{\text{end}} = 0.1$. Для нанофотонного резонатора на основе Si_3N_4 ($n = 2$) на подложке из SiO_2/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, начальный и конечный факторы заполнения $f_{\text{start}} = 0.1765$, $f_{\text{end}} = 0.1373$.

Рассчитанные величины добротностей, модовой площади, модового объема и фактора Парселла TE-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). $S_{\text{mode}} = 0.064 \text{ мкм}^2$ и $V_{\text{mode}} = 0.011 \text{ мкм}^3$ и фактор Парселя $F_p = 4.67 \cdot 10^5$ для $\lambda = 1.575 \text{ мкм}$.

Рассчитанные величины добротностей, модовой площади, модового объема и фактора Парселя TE-поляризации электромагнитной волны для нанофотонной структуры из Si_3N_4 составили: $Q_1 = 610$ для $\lambda = 1.551 \text{ мкм}$ (без учета влияния подложки), $Q_2 = 40$ для $\lambda = 1.531 \text{ мкм}$ (с учетом влияния подложки). $S_{\text{mode}} = 0.334 \text{ мкм}^2$ и $V_{\text{mode}} = 0.062 \text{ мкм}^3$ и фактор Парселя $F_p = 402$ для $\lambda = 1.550 \text{ мкм}$.

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 оптическим контрастом и большей шириной волновода из нитрида кремния. Это ведет к меньшему удержанию поля в резонаторе, к просачиванию света в SiO_2 подложку и к уменьшению добротности нанофотонного резонатора из Si_3N_4 .

Литература

1. Garifullin A.I., Arslanov N.M. // Proc. SPIE. 2024. V.13168. P. 1.
2. Garifullin A.I., Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A. // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. P. 399-404.
3. Gainutdinov R.Kh., Garifullin A.I., Ziyatdinova K.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1068. № 1. Art. no. 012005.
4. Gainutdinov R. Kh., Nabieva L. J., Garifullin A.I. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V.1283. № 1. Art. no. 012004.
5. Garifullin A.I., Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2022. V. 86(1). P. S66-S70.

DETERMINATION OF SPECTRAL AND MODE PROPERTIES OF NANOPHOTONIC RESONATORS BASED ON SILICON AND SILICON NITRIDE

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

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

² Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev -KAI,
Kazan, 420111, Chetaeva St., 18a
*e-mail: adel-garifullin@mail.ru

Silicon photonics allows the integration of various optical components for applications in linear and non-linear optics, including telecommunications, single-photon light sources, and biosensors. High quality nanophotonic resonators are necessary to create photonic integrated circuits together with nanolasers, single-photon sources, low-power optoelectronic switches, and highly sensitive sensors. In this paper, the Q -factor, mode area, mode volume, and Purcell factor of a nanophotonic resonator made of silicon and silicon nitride to generate high quality resonant states are calculated. Numerical calculations were performed using the FDTD method.

Key words: nanophotonic resonator, photonic crystal, silicon, silicon nitride, quality factor, mode area, mode volume, Purcell factor.