

Академия наук Республики Татарстан
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»
Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук
Троицкое обособленное подразделение (ТОП ФИАН)
Московский педагогический государственный университет

XXVIII МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА
КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА
И ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Казань, 7–8 ноября 2024 г.

Сборник статей
Выпуск XXVIII

Издательство «ФЭН» АН РТ

Казань, 2024

**УДК 535
ББК 22.34
К57**

Рецензенты:

д.ф.-м.н., профессор Тагиров Ленар Рафгатович,
академик-секретарь Отделения физики, энергетики и наук о Земле АН РТ
к.ф.-м.н., доцент Сибгатуллин Мансур Эмерович,
в.н.с. «Институт прикладных исследований АН РТ»

Научный редактор

доктор физико-математических наук, академик АН РТ,
профессор М.Х. Салахов

Когерентная оптика и оптическая спектроскопия:

К57 XXVIII Молодежная научная школа: сборник статей /
Под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2024. – 145 с.

ISBN 978-5-9690-1275-2

В данный сборник вошли статьи участников XXVIII Молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия».

Предназначается для студентов, аспирантов, научных работников, специализирующихся по естественнонаучным направлениям.

**УДК 535
ББК 22.34**

Подписано в печать 25.11.2024 г.
Формат 60х84/8. Бумага офсетная.
Тираж 25 экз.

ООО «ТКС-КОНТАКТ»
420021, г.Казань, ул. Г. Тукая, д. 91, оф. 407

ISBN 978-5-9690-1275-2

© Коллектив авторов, 2024
© Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Гладуш М.Г. <i>Квантово-кинетическая теория кооперативной фотолюминесценции органических молекул.....</i>	6
Батталова Э.И., Харинцев С.С. <i>Связь ширины центрального рамановского пика со структурой разупорядоченных полупроводников</i>	15
Болдышева В.К., Арсланов Н.М. <i>Оптимизация компактной геометрии оптического делителя на нитриде кремния методом роя частиц.....</i>	20
Виногорова А.А., Хамадеев М.А. <i>Дисперсионные соотношения и генерация когерентного излучения во временных фотонных кристаллах.....</i>	25
Гайнутдинов А.Р. <i>Зависимость ми резонансов от размера диэлектрических частиц и показателя преломления</i>	29
Гарафутдинов А.А., Сибгатуллин М.Э., Арсланов Н.М. <i>Формирование обучающей выборки для машинного обучения на основе модели теста NIST Longest RUN случайной бинарной последовательности.....</i>	34
Гарифуллин А.И., Арсланов Н.М. <i>Оптимизация параметров нанофотонного резонатора из нитрида кремния с учетом влияния подложки</i>	40
Гатауллина Р.М., Солодов А.Н., Никифоров В.Г., Шмелев А.Г., Жарков Д.К. <i>Создание многофункциональных люминесцентных сенсоров для широкого круга задач на основе фторидов наночастиц, допированных лантаноидами</i>	46
Гилязов Л.Р., Мельник К.С., Моисеев С.А., Перминов Н.С. <i>Фотонный квантовый интерфейс для неоднородных квантовых сетей.....</i>	51
Ермишев О.А., Смирнов М.А., Арсланов Н.М. <i>Модификация дисперсии нановолновода Si₃N₄ с помощью полимерного купола, изготовленного на литографе квант.....</i>	56
Замалиев Р.Р., Гилязов Л.Р., Арсланов Н.М. <i>Цифровая схема активного гашения для лавинного фотодиода.....</i>	61
Избасарова Э.А., Газизов А.Р. <i>Плазмонно-усиленная люминесценция: исследование ближнеполевого взаимодействия в нанокластерах Au-CeYbF₃.....</i>	65
Каримуллин К.Р., Федянин В.В. <i>Численное моделирование сверхбыстрой оптической дефазировки в примесных нанокмползитах с квантовыми точками: влияние локальной колебательной динамики матрицы.....</i>	70

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАНОФОТОННОГО РЕЗОНАТОРА ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПОДЛОЖКИ

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

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

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

Нанопотонный резонатор с высокой добротностью и малым модовым объемом является перспективной системой для создания оптоэлектронных устройств на чипе и усиления взаимодействия света и вещества. В данной работе проведена оптимизация параметров нанопотонного резонатора из нитрида кремния с учетом влияния подложки. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности.

Ключевые слова: нанопотонный резонатор, фотонный кристалл, нитрид кремния, добротность, модовый объем.

1. Введение

Нанопотонные (фотонно-кристаллические (ФК)) резонаторы с высокой добротностью Q и малым модовым объемом V являются важными элементами для создания оптических устройств на чипе, таких как низкопороговые лазеры, маломощные оптоэлектронные переключатели, высокочувствительные сенсоры, устройства оптомеханики, квантовой обработки информации [1, 2]. Эти системы перспективны для наблюдения и исследования квантово-электродинамических эффектов в полости [3-6]. В связи с тем, что в обычных однородных и изотропных средах свет взаимодействует с веществом крайне слабо, оптические резонаторы с большим значением Q/V позволяют усилить это взаимодействие (эффект Парселла). Оно ведет к большой оптической нелинейности, эффективной лазерной генерации, оптомеханическим эффектам в полости и пр. [7, 8].

В работе [9] предложен детерминистический метод достижения высоких значений Q нанорезонатора на основе периодического массива отверстий в волноводе (одномерный ФК). На основе численных расчетов авторы продемонстрировали доказательство пригодности предлагаемого метода и поэтапную оптимизацию схемы резонатора с волноводными модами, локализованными, в одном случае, в диэлектрических слоях и, в другом случае, в воздушных слоях. Рассчитанные величины составили $Q > 10^6$ и $V < 0.9(\lambda_{res}/n_{Si})^3$.

В другой работе [10] на эксперименте продемонстрирована новая конструкция и надежная платформа нанопотонного резонатора на основе волновода с треугольным профилем и поперечными канавками. Этот резонатор вытравлен в объемном кристалле Y_2SiO_5 и YVO_4 . Треугольный профиль волновода в сочетании с субволновой решеткой из прямоугольных канавок обеспечивает лучшую устойчивость к дефектам, возникающим в процессе изготовления нанорезонатора. Полученные образцы нанорезонаторов имели $Q \sim 27\,000$ и $V \sim 1(\lambda_{res}/n)^3$ в широком диапазоне длин волн от видимого до ближнего ИК-излучения с резонансными длинами волн, соответствующими атомным переходам редкоземельных ионов.

В данной работе проведена оптимизация параметров нанофотонного резонатора на основе Si_3N_4 для генерации высокодобротных резонансных состояний. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности резонансных состояний. Для этого в расчетах мы использовали следующие геометрические параметры волновода из Si_3N_4 на подложке из SiO_2/Si : w (ширина) = 2300 нм, h (высота) = 220 нм.

Нитрид кремния обладает хорошими свойствами и характеристиками для создания устройств интегральной квантовой оптики: широкий рабочий спектральный диапазон длин волн (от видимого до среднего ИК), оптимальные механические свойства, низкие потери ($<1\text{дБ/см}$), а также отсутствие двухфотонного поглощения в телекоммуникационном диапазоне длин волн. Это, в свою очередь, позволяет генерировать высокоинтенсивное излучение внутри волновода [11].

2. Построение спектра пропускания и расчет добротности нанофотонного резонатора

Для оптимизации параметров нанофотонного резонатора мы рассчитали его спектры пропускания с помощью метода FDTD, используя программные пакеты MPB, MEER и Comsol. Симметричная относительно всех трех осей структура резонатора показана на рис. 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.

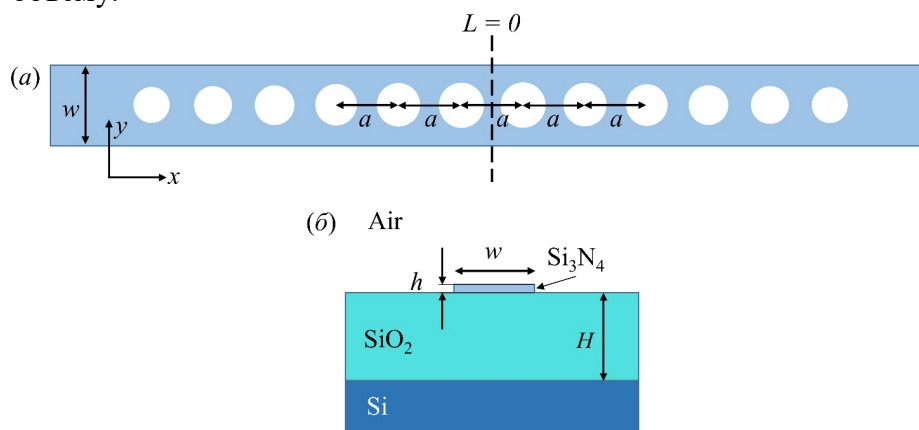


Рис. 1. а – Схематическое изображение нанофотонного (ФК) резонатора, состоящего из волновода и массива цилиндрических отверстий с периодом a (брэгговские зеркала). б – Схематическое изображение поперечного сечения волновода на пластинах $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с толщиной слоя Si_3N_4 $h = 220$ нм и толщиной слоя SiO_2 $H = 2500$ нм. Ширина волновода равна $w = 2300$ нм.

Добротность ФК 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 (брэгговские зеркала) распространяющееся излучение (эванесцентное поле) описывается как $\sin(\beta_{\text{Bragg}} x) \exp(-\gamma x)$, где γ – постоянная затухания [12]. Потери на рассеяние света уменьшаются при значении волнового числа $\beta_{\text{Bragg}} = \pi/a$ (граница 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 равенства волновых чисел $\beta_{\text{Bragg}} = \beta_{\text{wg}}$ (фазовый синхронизм).

Обычно, пространственный профиль светового пучка в волноводе при $\beta = \pi/a$ имеет лоренцевский профиль. Как было показано в [12], для уменьшения энергии пространственных гармоник (и увеличения Q) необходимо, чтобы распространяющаяся в области брэгговских зеркал световая волна имела гауссовский 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.

Детерминистический метод достижения высокого значения Q на резонансной длине волны, локализованной в оптически плотных (диэлектрических) слоях ФК резонатора, предложен в работе [9].

Ключевыми пунктами детерминистического метода являются а) нулевая длина полости между двумя центральными отверстиями ($L = 0$) (рис. 1а), б) постоянство периода a структуры и в) гауссово-подобный профиль затухания световой волны, обеспечиваемый линейным увеличением $\gamma = \sigma x$ мнимой компоненты γ волнового числа света $k = (1 + i\gamma)\pi/a$ при распространении поля вдоль оси структуры от центральных к крайним отверстиям нанوفотонного резонатора.

Для локализации поля в конкретной области нанوفотонного резонатора необходимо введение в эту область дефекта. Обычно, дефект создается в виде изменяющегося периода структуры или изменяющегося диаметра отверстий/толщин слоев от центра к краям периодической структуры. Введение дефекта в периодическую ФК структуру приводит к образованию резонансного пика пропускания в фотонной запрещенной зоне.

Для локализации поля в центральных диэлектрических слоях нанوفотонного резонатора необходимо, чтобы дефект находился в центре структуры. Например, это возможно, когда происходит уменьшение объемной доли заполнения f воздухом (следовательно, и радиусов) отверстий, начиная с центра и до краев резонатора. Отметим, что величина $f = \pi R^2/aw$, где R – радиус отверстий, a – период нанوفотонного резонатора, w – его ширина. При этом необходимо, чтобы в дисперсионных соотношениях (рис. 2а) резонансная частота (нижняя синяя штриховая линия), соответствующая распределению поля между отверстиями с $f_{\text{start}} = 0,1765$, находилась в центре запрещенной зоны (нижняя и верхняя красная сплошные линии), сформированной остальными отверстиями резонатора, включая конечными с $f_{\text{end}} = 0,1373$.

Алгоритм детерминистического метода состоит из следующих действий:

1) определить целевую резонансную частоту. Резонансная длина волны λ_0 , выбранная нами, составляет 1550 нм, таким образом, целевая резонансная частота равна $\nu_{\text{target}} = 193,55$ ТГц. Используя теорию возмущений, авторы предлагаемого метода показали, что резонансная частота моды, локализованной в диэлектрическом каркасе, будет ниже целевой на 1%. Таким образом, необходимо увеличить резонансную частоту на 1% до $\nu_{\text{adjusted}} = 195,48$ ТГц.

2) Выбрать толщину волновода, на основе которого создается ФК резонатор. Обычно, данная толщина заранее известна исходя из выбора подложки. В наших расчетах мы рассматриваем волновод на пластинах Si/SiO₂/Si₃N₄ с толщиной слоя Si₃N₄ $h = 220$ нм (рис. 1б).

3) Выбрать период нанوفотонного резонатора на основе выражения $a = \lambda_0/2n_{\text{eff}}$, где n_{eff} – эффективный модовый индекс резонатор. Выбрали $n_{\text{eff}} = 1,3$ в отрезке $n_{\text{eff}} \in [1; 2]$, где $n(\text{air}) = 1$, $n(\text{Si}_3\text{N}_4) = 2$. Тогда период структуры $a \approx 600$ нм.

4) Рассчитать оптимальную ширину волновода. Большая ширина увеличивает эффективный модовый индекс, и исследуемая мода будет находиться выше световой линии в зонной диаграмме. Такая мода называется утекающей, и она будет

рассеиваться в окружающее пространство. Однако большая ширина волновода позволяет создавать моды высокого порядка с той же симметрией, что и фундаментальная мода. В нашем случае, ширина волновода равна $w = 2300$ нм.

5) Подобрать объемную долю заполнения f воздухом двух центральных отверстий нанофотонного резонатора таким образом, чтобы резонансная диэлектрическая мода имела частоту $\nu_{adjusted} = 195,48$ ТГц (рис. 2а). Оптимальной объемной долей заполнения является $f_{start} = 0,1765$, и радиус этих отверстий равен $R_{start} = 278$ нм.

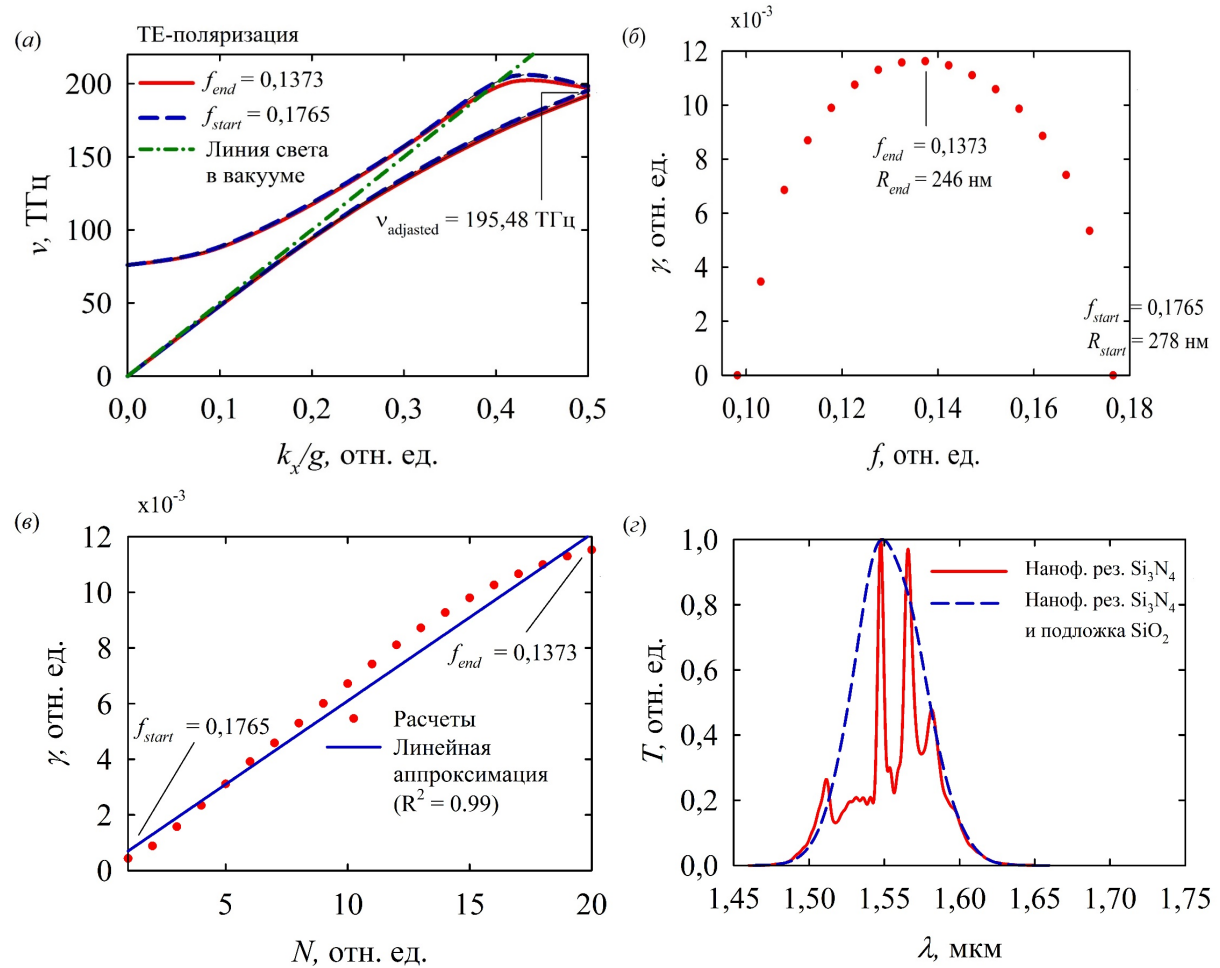


Рис. 2. а – Зонная диаграмма для ТЕ-поляризации света, распространяющегося в ФК резонаторе с отверстиями, в первом случае, с $f_{start} = 0,1765$ (синяя штриховая линия) и, во втором случае, с $f_{end} = 0,1373$ (красная сплошная линия). $g = 2\pi/a$ – постоянная обратной решетки структуры. Зеленая штрихпунктирная линия обозначает линию света в вакууме ($\omega = ck$). Резонансная частота $\nu_{target} = 193,55$ ТГц резонатора на 1% ниже края диэлектрического состояния (нижняя синяя штриховая линия) с частотой $\nu_{adjusted} = 195,48$ ТГц. б – Зависимость мнимой компоненты γ волнового числа света $k = (1 + i\gamma)\pi/a$ (постоянной затухания) от объемной доли заполнения f воздухом отверстий нанофотонного резонатора. Два центральных отверстия с $f_{start} = 0,1765$ и радиусами $R_{start} = 278$ нм имеют $\gamma = 0$. Конечные 11 отверстий с каждой стороны ФК резонатора с $f_{end} = 0,1373$ и радиусами $R_{start} = 246$ нм имеют максимальную величину постоянной затухания $\gamma \approx 0,012$. в – Зависимость постоянной затухания γ от номера N отверстия (зеркала) нанофотонного резонатора после вариации по квадратичному закону величины f (начиная с f_{start} и заканчивая f_{end}). Приведена линейная аппроксимация функции $\gamma(N)$ методом наименьших квадратов. г – Спектр пропускания ФК резонатора $T(\lambda)$ в диапазоне $\Delta\lambda = 1,45$ -1,65 мкм. Красной сплошной линией показан спектр нанофотонного резонатора без подложки, синей штриховой линией – с подложкой SiO_2 .

6) Найти объемную долю заполнения f воздухом конечных отверстий нанофотонного резонатора таким образом, чтобы мнимая компонента γ волнового вектора фотона, распространяющегося в периодической структуре на резонансной частоте $\nu_{adjusted} = 195,48$ ТГц, была максимальной. Мы получили $f_{end} = 0,1373$ и соответствующий радиус этих отверстий равен $R_{end} = 246$ нм (рис. 2б).

7) Подобрать число отверстий N с каждой стороны резонатора для создания эффективных зеркал для гауссово-подобного профиля затухания световой волны (при этом $\gamma = \sigma x$). Оптимальное число отверстий с каждой стороны резонатора составило 20 (рис. 2в). В наших расчетах мы использовали $N = 25$ отверстий с каждой стороны резонатора относительно его центра.

8) Для создания гауссово-подобного профиля затухания волны, распространяющейся в резонаторе, необходимо уменьшить объемную долю заполнения воздухом отверстий по квадратичному закону в обе стороны относительно центра структуры. Для этого, начиная с центральных двух отверстий с $f_{start} = 0,1765$ и до N -ых отверстий с $f_{end} = 0,1373$ мы плавно уменьшали величину f по квадратичному закону.

9) Для удержания волноводных мод в резонаторе необходимо с каждой стороны структуры добавить по 10 дополнительных отверстий с $f_{end} = 0,1373$.

Рассчитанный спектр пропускания нанофотонного резонатора на основе Si_3N_4 без учета подложки Si/SiO_2 показан на рис. 2з (красная сплошная линия). Добротность этой структуры на резонансной длине волны $\lambda_0 = 1550$ нм составила 540. Учет подложки Si/SiO_2 в расчете спектра пропускания приводит к его уширению с FWHM $\Delta\lambda \approx 50$ нм (синяя штриховая линия, рис. 2з) и уменьшению добротности до $Q \approx 54$.

Результаты и выводы

В данной работе проведена оптимизация параметров нанофотонного резонатора из нитрида кремния для генерации высокодобротных резонансных состояний. Нанофотонный резонатор с высокой добротностью и малым модовым объемом является перспективной системой для создания оптоэлектронных устройств на чипе и усиления взаимодействия света и вещества. Расчеты проводились с использованием детерминистического метода достижения высоких значений добротности. Расчет нанофотонного резонатора дал величину $Q = 540$, учет подложки Si/SiO_2 привел к уменьшению добротности до $Q \approx 54$ [13]. Научное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

Литература

1. O'Brien J.L., Furusawa A., Vučković J. Photonic quantum technologies // Nature Photonics. 2009. V. 3. №. 12. P. 687.
2. Yang L., et al. Controlling single rare earth ion emission in an electro-optical nanocavity // Nature Communications. 2023. V. 14. №. 1. P. 1718.
3. Liu Y., Houck A.A. Quantum electrodynamics near a photonic bandgap // Nature Physics. 2017. V. 13. №. 1. P. 48.
4. 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. P. 115.

5. Gainutdinov R.Kh., et al. Dressing of superconducting qubits by their interaction with a low frequency photon reservoir // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1283. №. 012004. P.1.
6. 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 №. Suppl. 1. P. S66.
7. Burgwal R., Verhagen E. Enhanced nonlinear optomechanics in a coupled-mode photonic crystal device // Nature Communications. 2023. V. 14. №. 1. P. 1526.
8. Aspelmeyer M., Kippenberg T.J., Marquardt F. Cavity optomechanics // Reviews of Modern Physics. 2014. V. 86. №. 4. P. 1391.
9. Quan Q., Loncar M. Deterministic design of wavelength scale, ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities // Optics Express. 2011. V. 19. №. 19. P. 18529.
10. Zhong T., et al. High quality factor nanophotonic resonators in bulk rare-earth doped crystals // Optics Express. 2016. V. 24. №. 1. P. 536.
11. Проходцов А.И. и др. Разработка и создание элементов радио – и квантовой интегральной фотоники на платформе из нитрида кремния // Фотон-экспресс. 2021. Т. 6. № 174. С. 171.
12. Quan Q., Deotare P.B., Loncar M. Photonic crystal nanobeam cavity strongly coupled to the feeding waveguide // Applied Physics Letters. 2010. V. 96. No. 203102. P. 1.
13. Garifullin A.I., Arslanov N.M. Optimization of Si₃N₄ nanophotonic resonator taking into account the substrate influence. Proceedings of SPIE. V. 13168. P. 1.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A NANOPHOTONIC RESONATOR BASED ON SILICON NITRIDE TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE SUBSTRATE

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

A nanophotonic resonator with a high Q -factor and a small mode volume is a promising system for creating optoelectronic devices on a chip and enhancing the light- matter interaction. In this paper, the parameters of a nanophotonic resonator based on silicon nitride to generate high-quality resonant states are optimized. The calculations were carried out using a deterministic method of achieving high Q -factor values.

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