

УДК 535.326:535.417.2:535.421

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

© 2025 г. А. И. Гарифуллин<sup>1, 2\*</sup>, Н. М. Арсланов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,  
Институт физики, Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», Казанский квантовый  
центр, Казань, Россия*

\*E-mail: adel-garifullin@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2025

После доработки 20.07.2025

Принята к публикации 30.07.2025

Нанофотонные (фотонно-кристаллические) резонаторы с высокой добротностью и малым модовым объемом являются перспективными для исследований в области нелинейной и квантовой оптики на кристалле. В данной работе проведен расчет добротности, модовой площади, модового объема и фактора Парселла нанофотонных резонаторов на основе кремния и нитрида кремния для генерации высокодобротных резонансных состояний.

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

**ВВЕДЕНИЕ**

Интегральная фотоника позволяет компактно объединять на одном кристалле различные компоненты линейной и нелинейной оптики для применения в устройствах телекоммуникации, квантовых источников света, сенсоров, квантовых вычислителей и памяти. Для создания на кристалле фотонных интегральных схем с нанолазерами, однофотонными источниками, маломощными оптоэлектронными переключателями, высокочувствительными сенсорами необходимыми элементами являются высокодобротные резонаторы [1-5]. Оптические резонаторы с большим значением добротности и малым модовым объемом позволяют значительно усилить взаимодействие света с квантовыми объектами, что важно для наблюдения и исследования фундаментальных эффектов квантовой электродинамики в полости [6-8], расщепления Раби (режим сильной связи), усиление спонтанного излучения – эффект Парселла (режим слабой связи) [9], для поиска новых приложений и создания квантовых устройств. Среди различных интегральных резонаторов фотонно-кристаллические (нанофотонные) резонаторы являются наиболее многообещающими кандидатами для получения больших значений добротности и малого модового объема одновременно. Нанофотонные резонаторы экспериментально реализуются на основе структуры с периодическим изменением показателя преломления, период которого нарушается в некотором пространстве, что обеспечивает возможность удержания света в условии фотонной запрещенной зоны фотонного кристалла [10]. В качестве платформы для нанофотонных резонаторов используют кремний [11, 12],  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{YVO}_4$  [13],

нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [14] и другие вещества. Кремний широко используется в создании волноводных структур для инфракрасного диапазона длин волн в связи с большим показателем преломления и, как следствие, большим оптическим контрастом по сравнению с воздухом, что важно для лучшего удержания и управления светом в волноводе [11]. В работе [11] был показан дизайн и экспериментальная характеристика кремниевого высокодобротного фотонно-кристаллического нанорезонатора, который был подвешен краями на подложки из SOI (кремния на изоляторе) и имел вид одномерного периодического массива отверстий в кремнии [11]. Рассчитанная величина добротности на длине волне 1.56 мкм составила  $1.4 \cdot 10^7$ . С помощью детектирования кросс-поляризованного резонансно рассеянного света, возникающего под действием нормально падающего на структуру лазерного пучка, авторы измерили спектр рассеяния и оценили экспериментальную добротность, которая составила около  $7.5 \cdot 10^5$ . Такое большое отличие в добротностях может наблюдаться из-за высокой чувствительности величины добротности от области размещения дефекта в нанорезонаторе, ширины дефектной зоны и согласования с подводящим волноводом. На основе учета этих влияний в работе [12] был предложен детерминистический метод достижения высоких значений добротности нанорезонатора на основе периодического массива отверстий в волноводе (одномерный фотонный кристалл). Ключевыми положениями этого метода являются: 1) нулевая длина центральной полости ( $L = 0$ ), 2) постоянный период  $a$  структуры и 3) гауссово-подобный профиль затухания световой волны.

Используя численные расчеты, авторы продемонстрировали доказательство пригодности предлагаемого метода и поэтапную оптимизацию схемы резонатора с волноводными модами, локализованными в диэлектрических слоях или в воздушных слоях в зависимости от параметров нанорезонатора. Рассчитанные величины добротности и модового объема для нанофотонного резонатора на основе Si составили  $Q > 10^6$  и  $V \sim 0.9(\lambda/n_{\text{Si}})^3$  на резонансной длине волны 1.5 мкм.

Несмотря на высокие значения добротности в ИК области, эффективность нанофотонных резонаторов на кремнии существенно падает в видимом диапазоне. Для работы в видимом и ИК диапазонах перспективной платформой является система на основе нитрида кремния. Преимущества фотонных устройств, интегрированных в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , заключаются в широком окне прозрачности, охватывающем видимую и ближнюю инфракрасную области спектра, что, в свою очередь, позволяет использовать их в биофотонике, оптической связи и зондировании. Вместе с этим, нитрид кремния имеет хорошие механические и термооптические свойства, низкие линейные и нелинейные 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. Однако реализация нанофотонных резонаторов на платформе из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  является довольно сложной задачей из-за низкого показателя преломления, что ведет к просачиванию света в подложку. В исследовании [14] авторы провели численные расчеты и эксперимент с высокодобротным нанофотонным резонатором из

нитрида кремния. Авторы показали, что геометрия резонатора на основе эллиптических отверстий вместе с оболочкой из  $\text{SiO}_2$  приводит к большей локализации света внутри волновода и меньшим потерям. Также оболочка из  $\text{SiO}_2$  делает нанофотонный резонатор механически более устойчивым, что важно для создания полноценных фотонных интегральных схем. Максимальная величина добротности в расчетах составила до  $2.8 \cdot 10^7$ , на эксперименте – около  $4.42 \cdot 10^5$ , что ограничено особенностями изготовления и сопоставимо с результатами работ по нанофотонным резонаторам на кремнии [11, 12].

В нашей работе мы используем подходы к проектированию и дизайну нанофотонных резонаторов [11, 12, 14] и проводим расчет спектров пропускания, величин добротности, модовой площади, модового объема и фактора Парселя четырех различных структур нанофотонных резонаторов из Si и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Расчеты проводились методом конечных разностей во временной области с использованием программных пакетов Ansys Lumerical, MPB и Comsol.

## РАСЧЕТ ДОБРОТНОСТИ, МОДОВОЙ ПЛОЩАДИ, МОДОВОГО ОБЪЕМА И ФАКТОРА ПАРСЕЛЛА НАНОФОТОННОГО РЕЗОНАТОРА

Добротность  $Q$  является основным показателем, используемым для оценки качества резонаторов при взаимодействии со светом, поскольку она определяет накопление оптической энергии внутри резонатора и зависит от потерь. По определению добротность определяется как

$$Q = \frac{\omega_0 E_{stored}}{P_{loss}}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – частота резонансного пика,  $E_{\text{stored}}$  – запасенная на этой частоте энергия в резонаторе,  $P_{\text{loss}}$  – мощность потерь. Потери в резонаторе складываются из потерь в виде рассеяния света в свободное пространство (характеризуются  $Q_{\text{sc}}$ ) и потерь на перенос (coupling) света из волновода в резонатор ( $Q_{\text{wg}}$ ). Полная (нагруженная) добротность  $Q_{\text{total}}$  рассчитывается таким образом, что  $1/Q_{\text{total}} = 1/Q_{\text{wg}} + 1/Q_{\text{sc}}$ . Отметим, что добротность резонатора можно рассчитать и по спектру пропускания, используя выражение

$$Q = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – центральная длина волны резонансного пика,  $\Delta\lambda$  – его ширина на полувысоте (FWHM).

Сила взаимодействия света и вещества зависит от позиционно-зависимой эффективной модовой площади  $S(\vec{r}_0)$  и эффективного модового объема  $V(\vec{r}_0)$  резонансной полости

$$S(\vec{r}_0) = \frac{\int W(\vec{r}) dS}{W(\vec{r}_0)}, \quad (3)$$

$$V(\vec{r}_0) = \frac{\int \varepsilon(\vec{r}) |\vec{E}(\vec{r})|^2 d^3\vec{r}}{\varepsilon(\vec{r}_0) |\vec{E}(\vec{r}_0)|^2}, \quad (4)$$

где  $W(\vec{r})$  – плотность энергии,  $S$  – интегрируемая площадь,  $\varepsilon(\vec{r})$  – позиционно-зависимая диэлектрическая постоянная,  $\vec{E}(\vec{r})$  – напряженность электрического поля световой волны,  $\vec{r}_0$  – интересуемая точка наблюдения усиления взаимодействия света и вещества. В рассматриваемых нами структурах эта точка находится в центре симметрии нанофотонных резонаторов.

Эффективная модовая площадь и объем позволяют оценить когерентную

силу связи между атомом (квантовым излучателем) и полем резонатора.

Основываясь на эффекте Парселла [14], скорость  $F$  спонтанной эмиссии квантового излучателя, параметры которого спектрально и пространственно совпадают с максимумом моды резонатора, увеличивается на фактор

$$F = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^3 \frac{Q}{V}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – резонансная длина волны резонатора,  $n = \sqrt{\epsilon}$  – показатель преломления среды в точке  $\vec{r}_0$ ,  $Q$  – добротность резонатора и  $V$  – эффективный модовый объем.

Для расчета представленных спектральных и модовых свойств нанофотонного резонатора на основе первого дизайна [11] мы использовали следующие геометрические параметры волновода из Si ( $n = 3.45$ ) для целевой длины волны  $\lambda = 1.55$  мкм (см. рис. 1a): ширина волновода  $w = 0.50$  мкм, постоянная решетки линейно уменьшается с  $a_{\text{start}} = 0.43$  мкм до  $a_{\text{end}} = 0.33$  мкм в направлении к центру структуры, высота волновода  $h = 0.22$  мкм, число дефектных отверстий (с изменяющимся по линейному закону радиусом)  $N_{\text{def}} = 5$ , радиус отверстий  $r = 0.28a$ , длина полости  $s_{\text{cav}} = 0.288$  мкм.

Спектр пропускания данной структуры для TE-поляризации света приведен на рис. 1б. Максимальные величины добротностей составили  $Q_1 = 8.7 \cdot 10^3$  для  $\lambda = 1.479$  мкм,  $Q_2 = 4 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.658$  мкм. Модовая площадь  $S = 0.097$  мкм<sup>2</sup>, модовый объем  $V = 0.015$  мкм<sup>3</sup> ( $0.13(\lambda/n_{\text{Si}})^3$ ) и фактор Парселла  $F = 2.25 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.658$  мкм. Этот дизайн является относительно простым,

количество цилиндрических отверстий небольшое, однако для уменьшения потерь в виде рассеяния света необходимо подвешивать структуру на подложке.

Для расчета спектра пропускания, добротности, модовой площади и объема, фактора Парселла в нанофотонном резонаторе на основе второго дизайна [12] мы использовали два набора геометрических параметров: в первом случае для волновода из Si и целевой длины волны  $\lambda = 1.5$  мкм (см. рис. 2a): ширина волновода  $w = 0.700$  мкм, постоянная решетки  $a = 0.330$  мкм, высота волновода  $h = 0.22$  мкм, высота подложки  $H = 2.5$  мкм, число дефектных отверстий (с изменяющимся по квадратичному закону радиусом)  $N_{\text{def}} = 20$ , число отверстий с постоянным радиусом  $N = 10$ , объемные доли заполнения круглых отверстий воздухом  $f_{\text{start}} = 0.2$  (в центре структуры),  $f_{\text{end}} = 0.1$  (на ее концах).

Во втором случае для волновода из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $n = 2$ ) и целевой длины волны  $\lambda = 1.55$  мкм (см. рис. 2a): ширина волновода  $w = 2.300$  мкм, постоянная решетки  $a = 0.600$  мкм, высота волновода  $h = 0.22$  мкм, высота подложки  $H = 2.5$  мкм, число дефектных отверстий (с изменяющимся по квадратичному закону радиусом)  $N_{\text{def}} = 20$ , число отверстий с постоянным радиусом  $N = 10$ , объемные доли заполнения круглых отверстий воздухом  $f_{\text{start}} = 0.1765$  (в центре структуры),  $f_{\text{end}} = 0.1373$  (на ее концах). Приведенную выше ширину и высоту волновода из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  мы выбрали на основе готового образца – волновода из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на подложке  $\text{SiO}_2$ .

Спектры пропускания данных структур из Si и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для TE-поляризации света приведены на рис. 2б и 2в. Учет влияния SiO<sub>2</sub> подложки в первом случае (рис. 2б) приводит к сдвигу резонансных пиков 1 и 2 в длинноволновую область, во втором случае (рис. 2в) – к уширению резонансного пика и, как следствие, к уменьшению добротности. Максимальные величины добротностей для структуры из Si составили  $Q_1 = 7.1 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.575$  мкм,  $Q_2 = 1.1 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.594$  мкм. Модовая площадь  $S = 0.064$  мкм<sup>2</sup>, модовый объем  $V = 0.011$  мкм<sup>3</sup> ( $0.11(\lambda/n_{\text{Si}})^3$ ) и фактор Парселла  $F = 4.67 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.575$  мкм. Отметим, что нулевая длина центральной полости ( $L = 0$ , см. рис. 2а) приводит к меньшему модовому объему и большему фактору Парселла. Таким образом, на основе этого дизайна возможно проектирование и создание однофотонных источников света, квантовой памяти.

Максимальные величины добротностей для структуры из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> составили  $Q_1 = 705$  для  $\lambda = 1.550$  мкм,  $Q_2 = 80$  для  $\lambda = 1.550$  мкм. Модовая площадь  $S_1 = 0.334$  мкм<sup>2</sup>, модовый объем  $V_1 = 0.062$  мкм<sup>3</sup> ( $0.13(\lambda/n_{\text{Si}_3\text{N}_4})^3$ ) и фактор Парселла  $F_1 = 402$  для  $\lambda = 1.550$  мкм для первого пика (без учета влияния подложки). Структура нанофотонного резонатора из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, спроектированная на основе второго дизайна, имеет достаточно малую величину добротности в связи с малым оптическим контрастом  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}/n_{\text{air}} = 2$ , большой шириной волновода  $w = 2.300$  мкм и стандартной высотой  $h = 0.22$  мкм. При таких параметрах свет плохо удерживается внутри волновода, что приводит к потерям в виде рассеяния света.

В завершение, для расчета спектральных и модовых свойств нанофотонного резонатора на основе третьего дизайна [14] мы использовали следующие геометрические параметры волновода из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (см. рис. 3a): ширина волновода  $w = 1.200$  мкм, постоянная решетки  $a = 0.515$  мкм, высота волновода  $h = 0.300$  мкм, высота подложки  $H_{\text{substr}} = 10$  мкм, высота верхней оболочки  $H = 4$  мкм, число эллиптических отверстий с максимальными радиусами  $R_{1\text{start}} = 0.500$  мкм и  $R_{2\text{start}} = 0.110$  мкм  $N_w = 160$ , число эллиптических отверстий с минимальными радиусами  $R_{1\text{end}} = 0.200$  мкм и  $R_{2\text{end}} = 0.060$  мкм  $N_M = 60$ , число промежуточных дефектных эллиптических отверстий (с изменяющимися по квадратичному закону радиусами)  $N_T = 80$ , длина центральной полости  $L = 0$ .

Спектр пропускания данной структуры для ТЕ-поляризации света приведен на рис. 3б. Максимальные величины добротностей составили  $Q_1 = 1.7 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.043$  мкм,  $Q_2 = 3.3 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.188$  мкм,  $Q_3 = 3.2 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.326$  мкм,  $Q_4 = 4.5 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.543$  мкм. Модовая площадь  $S = 2.635$  мкм<sup>2</sup>, модовый объем  $V = 0.164$  мкм<sup>3</sup> ( $1.13(\lambda/n_{\text{Si}_3\text{N}_4})^3$ ) и фактор Парселла  $F = 1.1 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.043$  мкм. Спектр пропускания этой структуры имеет множество узких пиков с достаточно большими величинами добротностей, что можно объяснить эффективным удерживанием и, как следствие, малым рассеянием распространяющегося широкополосного света благодаря большому периодическому массиву эллиптических отверстий. Даже при наличии оболочки из  $\text{SiO}_2$ , то есть малому оптическому контрасту  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}/n_{\text{SiO}_2} = 1.33$ , свет удерживается достаточно хорошо. К недостаткам этой структуры можно отнести

как раз большое количество эллиптических отверстий – около 440, что сложнее при экспериментальной реализации.

В итоге отметим, что рассчитанная величина добротности и модового объема нанофотонного резонатора из Si на основе первого дизайна в работе [11] составила  $Q = 1.4 \cdot 10^7$  и  $V = 0.39(\lambda/n_{\text{Si}})^3$  на резонансной длине волны  $\lambda = 1.56$  мкм. Наши расчеты с аналогичными параметрами структуры дали результаты:  $Q_1 = 8.7 \cdot 10^3$  для  $\lambda = 1.479$  мкм,  $Q_2 = 4 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.658$  мкм. Модовый объем  $V = 0.015$  мкм<sup>3</sup> ( $0.13(\lambda/n_{\text{Si}})^3$ ) для  $\lambda = 1.658$  мкм.

Рассчитанные величины добротности и модового объема структуры нанофотонного резонатора из Si на основе второго дизайна в статье [12] составили  $Q > 10^6$  и  $V = 0.9(\lambda/n_{\text{Si}})^3$  на резонансной длине волны 1.5 мкм. Для структуры с аналогичными параметрами наши расчеты дали  $Q_1 = 7.1 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.575$  мкм,  $Q_2 = 1.1 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.594$  мкм. Модовый объем  $V = 0.011$  мкм<sup>3</sup> ( $0.11(\lambda/n_{\text{Si}})^3$ ) для  $\lambda = 1.575$  мкм.

Структура нанофотонного резонатора из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , спроектированная на основе второго дизайна с подобранными нами параметрами, имеет достаточно малую величину добротности в связи с малым оптическим контрастом  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}/n_{\text{air}} = 2$ , большой шириной  $w = 2.300$  мкм и стандартной высотой  $h = 0.22$  мкм экспериментального образца волновода на подложке. При таких параметрах свет плохо удерживается внутри волновода, что приводит к потерям в виде рассеяния света.

Предсказанная добротность резонатора из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на основе третьего дизайна в статье [14] имела значение около  $2.8 \cdot 10^7$  на резонансных длинах волн 1.54 мкм и 1.6 мкм. Для этой структуры с аналогичными параметрами наши расчеты показали  $Q_1 = 1.7 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.043$  мкм,  $Q_2 = 3.3 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.188$  мкм,  $Q_3 = 3.2 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.326$  мкм,  $Q_4 = 4.5 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.543$  мкм. Модовый объем  $V$  составил  $0.164 \text{ мкм}^3 (1.13(\lambda/n_{\text{Si}_3\text{N}_4})^3)$  для  $\lambda = 1.043$  мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен расчет спектральных и модовых характеристик, таких как добротность, модовая площадь, модовый объем и фактор Парселла трех дизайнов нанофотонных резонаторов на основе кремния и нитрида кремния. Рассчитанные величины добротности имели максимальные значения  $10^4$ - $10^5$ , коэффициент усиления излучения – фактор Парселла –  $10^5$ . Учет влияния подложки приводит к уширению резонансных пиков пропускания и их сдвигу в длинноволновую область спектра, что соответствует увеличению потерь и уменьшению добротности резонатора. Нанофотонные резонаторы с высокой добротностью и малым модовым объемом являются необходимыми элементами для усиления взаимодействия света и вещества и создания фотонных интегральных схем.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (Рег. № НИОКТР 125012300688-6) и программой стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский

технического университета имени А. Н. Туполева («ПРИОРИТЕТ-2030»), Рег. №  
НИОКР 125070808154-3

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хайруллин А.Ф., Смирнова А.М., Арсланов Н.М. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2024. Т. 119. № 5. С. 336; *Khairullin A.F., Smirnova A.M., Arslanov N.M. et al.* // JETP Letters. 2024. V. 119. No. 5. P. 345.
2. *Smirnov M.A., Fedotov I.V., Smirnova A.M. et al.* // Opt. Lett. 2024. V. 49. No. 14. P. 3838.
3. *Смирнов М.А., Смирнова А.М., Хайруллин А.Ф. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 12. С. 1946; *Smirnov M.A., Smirnova A.M., Khairullin A.F. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 12. P. 1961.
4. *Oleynikova E.I., Korableva S.L., Morozov O.A., Pudovkin M.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. Suppl 4. P. S587.
5. *Garifullin A.I., Arslanov N.M.* // Proc. SPIE. 2024. V.13168. P. 1.
6. *Гарифуллин А.И., Гайнутдинов Р.Х., Хамадеев М.А.* // Оptический журнал. 2024. Т. 91. № 6. С. 67; *Garifullin A.I., Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A.* // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. P. 399.
7. *Garifullin A.I., Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. Suppl 1. P. S66-S70.
8. *Гайнутдинов Р.Х., Набиева Л.Я., Гарифуллин А.И. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 114. № 4. С. 221; *Gainutdinov R.Kh., Nabieva L.Ya., Garifullin A.I. et al.* // JETP Lett. 2021. V. 114. P. 188.
9. *Barth M., Kouba J., Stingl J.* // Opt. Express. 2007. V. 15. No. 25. P. 17231.
10. *Серафимович П.Г., Степихова М.В., Казанский Н.Л. и др.* // ФТП. 2016. Т. 50. № 8. С. 1133; *Serafimovich P.G., Stepikhova M.V., Kazanskiy N.L. et al.* // Semiconductors. 2016. V. 50. P. 1112.
11. *Deotare P. B., McCutcheon M.W., Frank I.W. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. No. 12. Art. No. 121106.
12. *Quan Q., Loncar M.* // Opt. Express. 2011. V. 19. No. 19. P. 18529.
13. *Zhong T., Rochman J., Kindem J.M. et al.* // Opt. Express. 2016. V. 24. No. 1. P. 536.

14. *Zhan J., Jafari Z., Veilleux S. et al.* // APL Photonics. 2020. V. 5. Art. No. 066101.
15. *Purcell E.M.* // Phys. Rev. 1946. V. 69. P. 681.

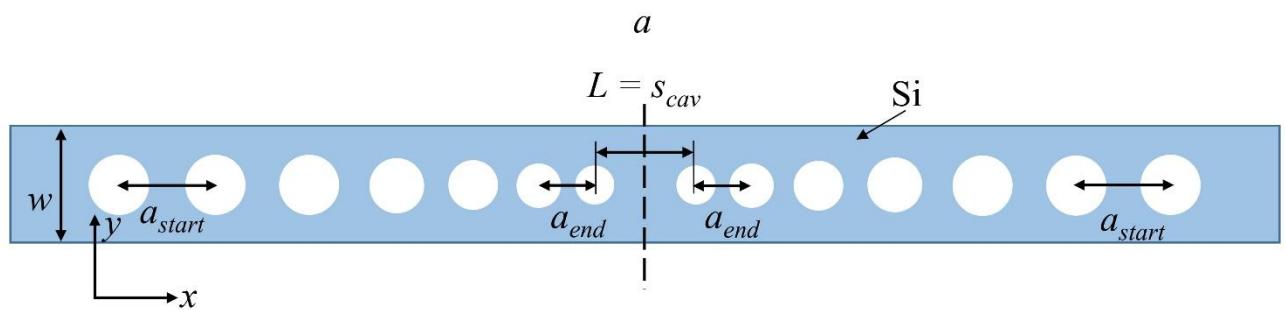
## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** *a* – Схематическое изображение нанофотонного резонатора из Si ( $n = 3.45$ ), состоящего из волновода и массива цилиндрических отверстий с изменяющимся периодом  $a_{\text{start}}$ ,  $a_{\text{end}}$  (брэгговские зеркала), и изображение поперечного сечения волновода с шириной  $w = 0.500$  мкм и толщиной  $h = 0.220$  мкм. Структура резонатора подвешена, по краям опирается на SiO<sub>2</sub> подложку. *б* – Спектр пропускания для TE-поляризации света данного нанофотонного резонатора. Величины добротностей для пиков 1 и 2  $Q_1 = 8.7 \cdot 10^3$  для  $\lambda = 1.479$  мкм и  $Q_2 = 4 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.658$  мкм, соответственно.

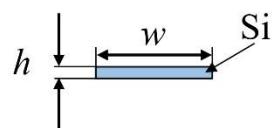
**Рис. 2.** *a* – Схематическое изображение нанофотонного резонатора в первом случае из Si ( $n = 3.45$ ), во втором случае из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $n = 2$ ), состоящего из волновода и массива цилиндрических отверстий с постоянным периодом  $a$ , и изображение поперечного сечения волновода с шириной и толщиной, в первом случае  $w = 0.700$  мкм и  $h = 0.220$  мкм, во втором случае  $w = 2.300$  мкм и  $h = 0.220$  мкм. Структура резонатора помещена на SiO<sub>2</sub> подложку с  $H = 2.5$  мкм. *б* – Спектр пропускания для TE-поляризации света нанофотонного резонатора из Si. Величины добротностей для пиков 1 и 2  $Q_1 = 7.1 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.575$  мкм,  $Q_2 = 1.1 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.594$  мкм, соответственно. *в* – Спектр пропускания для TE-поляризации света нанофотонного резонатора из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Величины добротностей для пиков 1 и 2  $Q_1 = 705$  для  $\lambda = 1.550$  мкм,  $Q_2 = 80$  для  $\lambda = 1.550$  мкм, соответственно. На рисунках *б* и *в* красные сплошные линии обозначают спектр

пропускания без учета влияния  $\text{SiO}_2$  подложки, синяя штриховая линия – с ее учетом.

**Рис. 3.** *a* – Схематическое изображение нанофотонного резонатора из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $n = 2$ ), состоящего из волновода и массива эллиптических отверстий с постоянным периодом  $a$ , и изображение поперечного сечения волновода с шириной  $w = 1.200$  мкм и толщиной  $h = 0.300$  мкм. Структура резонатора помещена на подложку и обернута оболочкой из  $\text{SiO}_2$ . *б* – Спектр пропускания для ТЕ-поляризации света данного нанофотонного резонатора. Величины добротностей для пиков 1-4  $Q_1 = 1.7 \cdot 10^5$  для  $\lambda = 1.043$  мкм,  $Q_2 = 3.3 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.188$  мкм,  $Q_3 = 3.2 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.326$  мкм,  $Q_4 = 4.5 \cdot 10^4$  для  $\lambda = 1.543$  мкм, соответственно. *в* – Увеличенный в масштабе пик пропускания 1 для ТЕ-поляризации света нанофотонного резонатора с добротностью  $Q_1 \approx 1.7 \cdot 10^5$  для  $\lambda \approx 1.043$  мкм.



Воздух



*b*

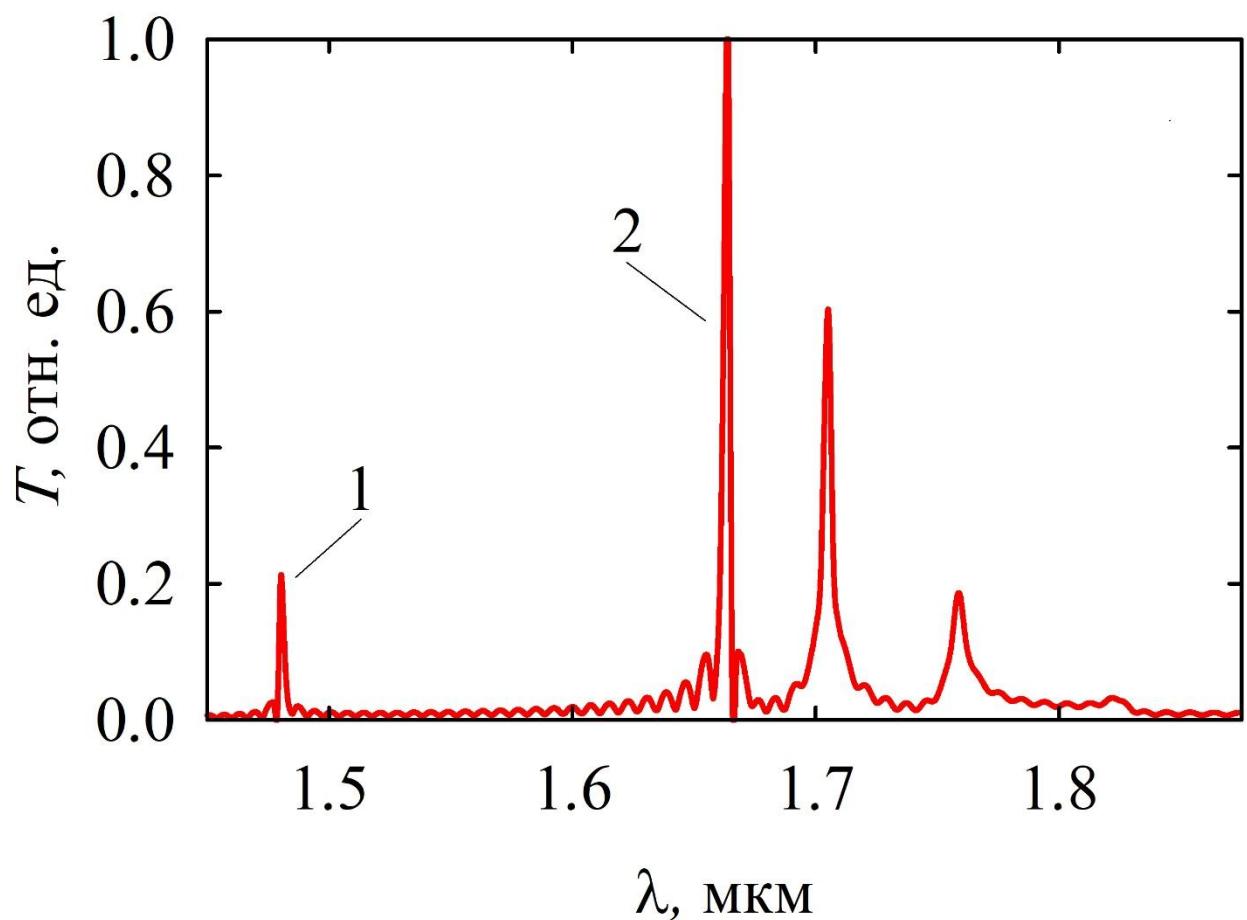
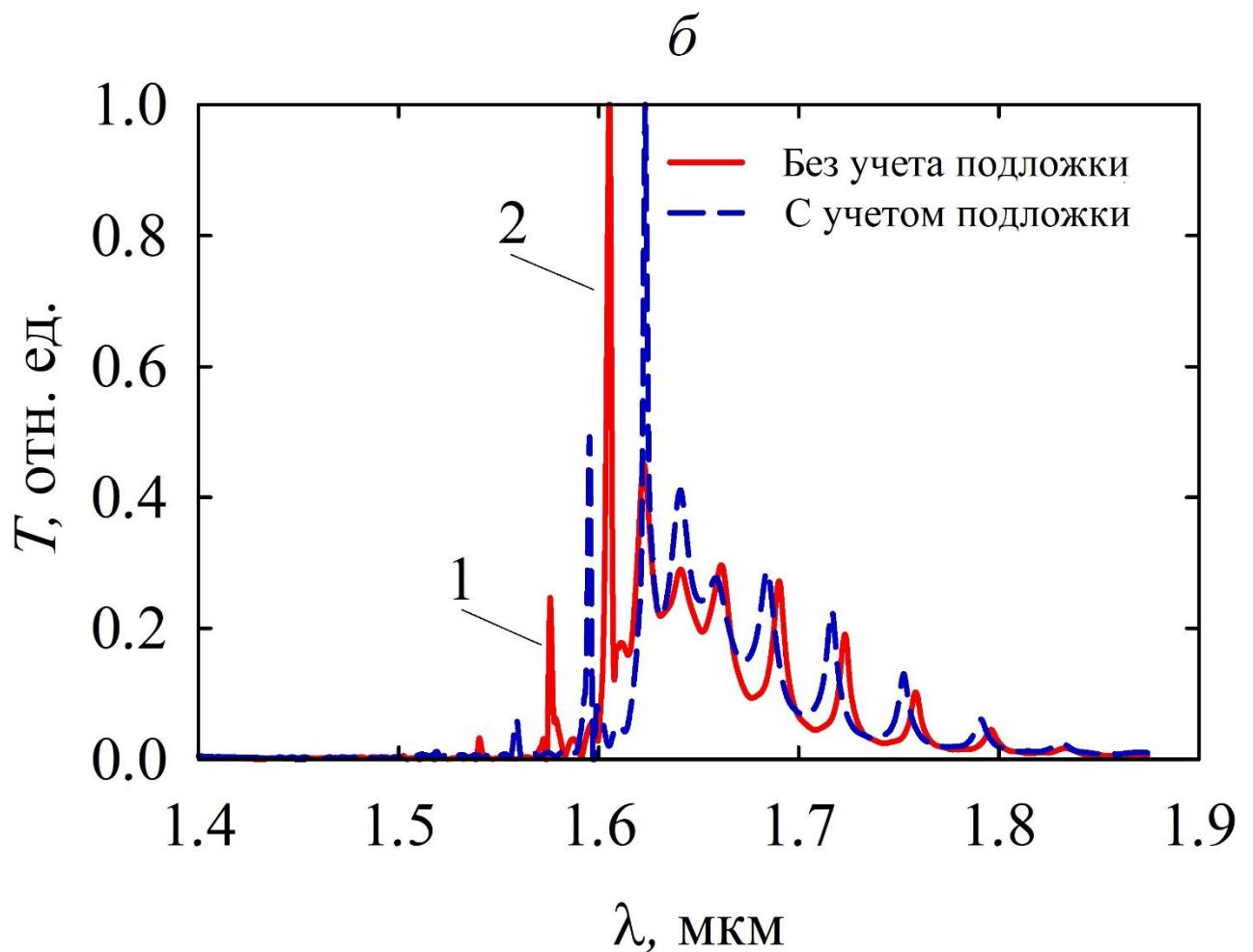
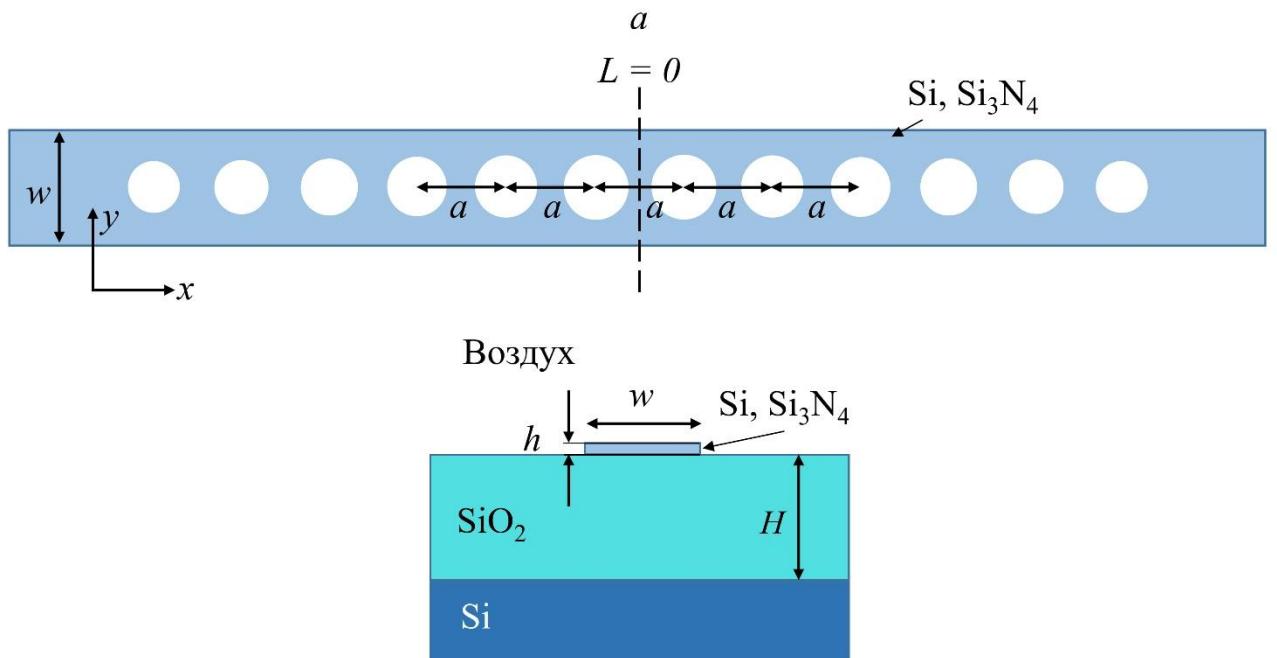


Рис. 1.



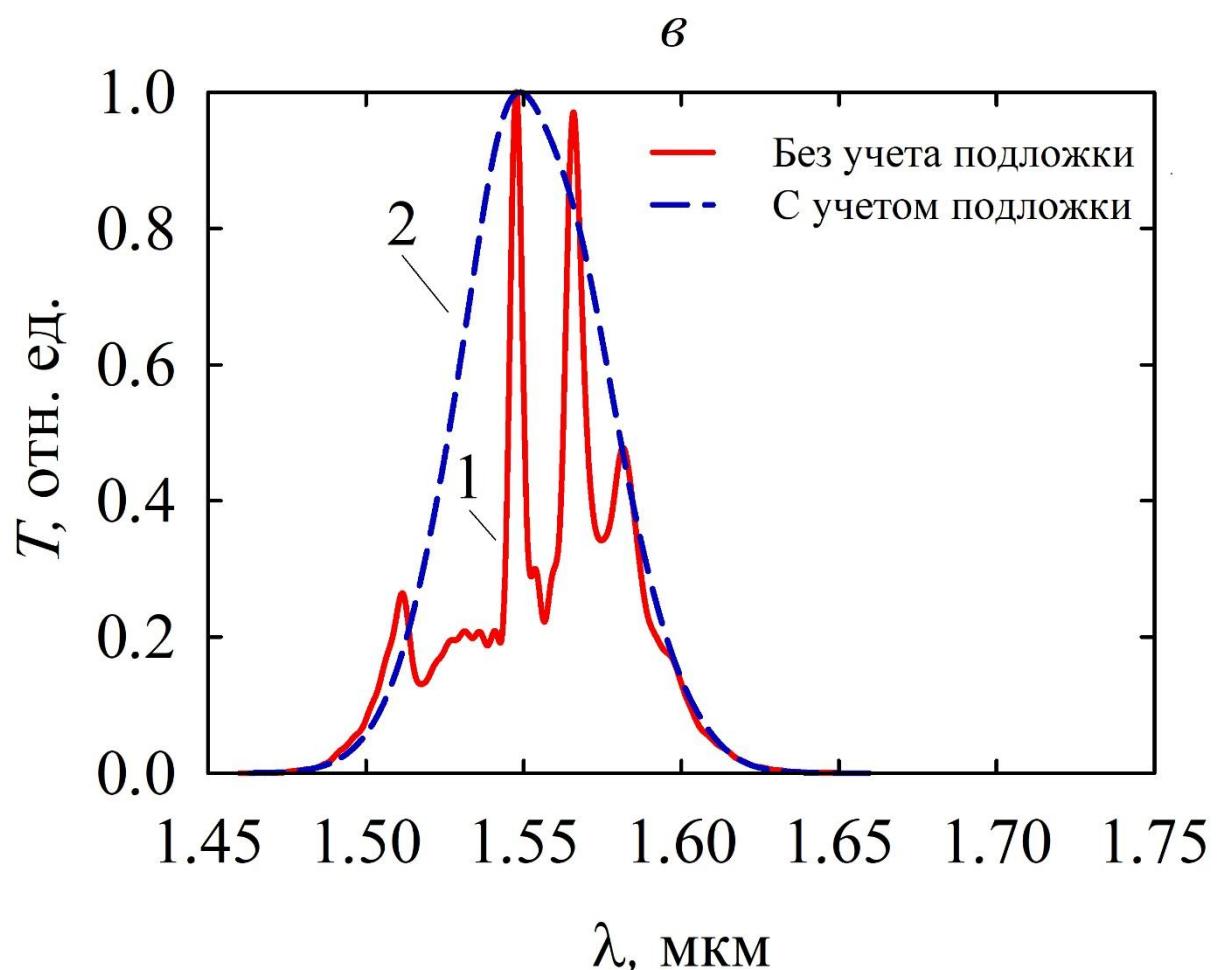
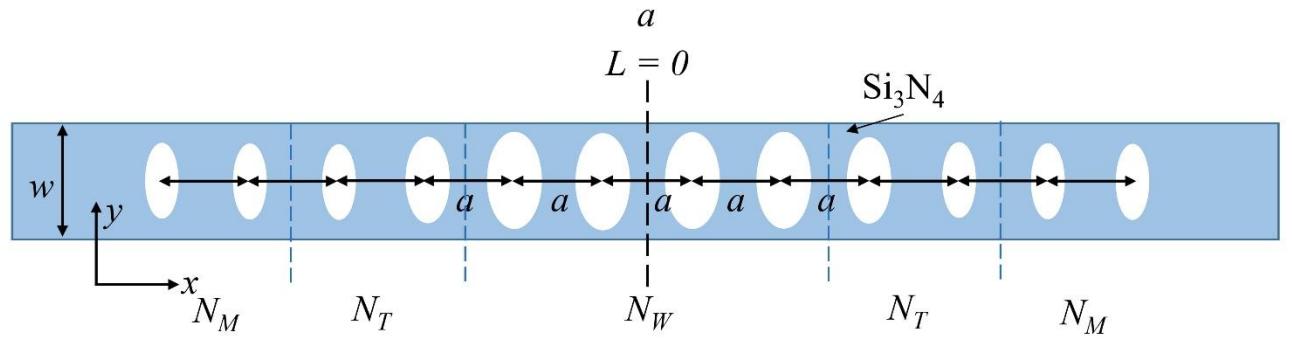
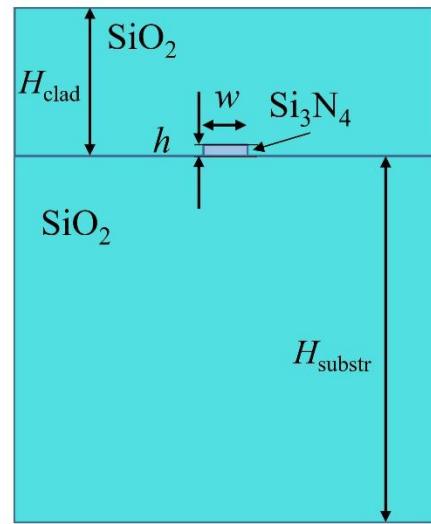


Рис. 2.



Воздух



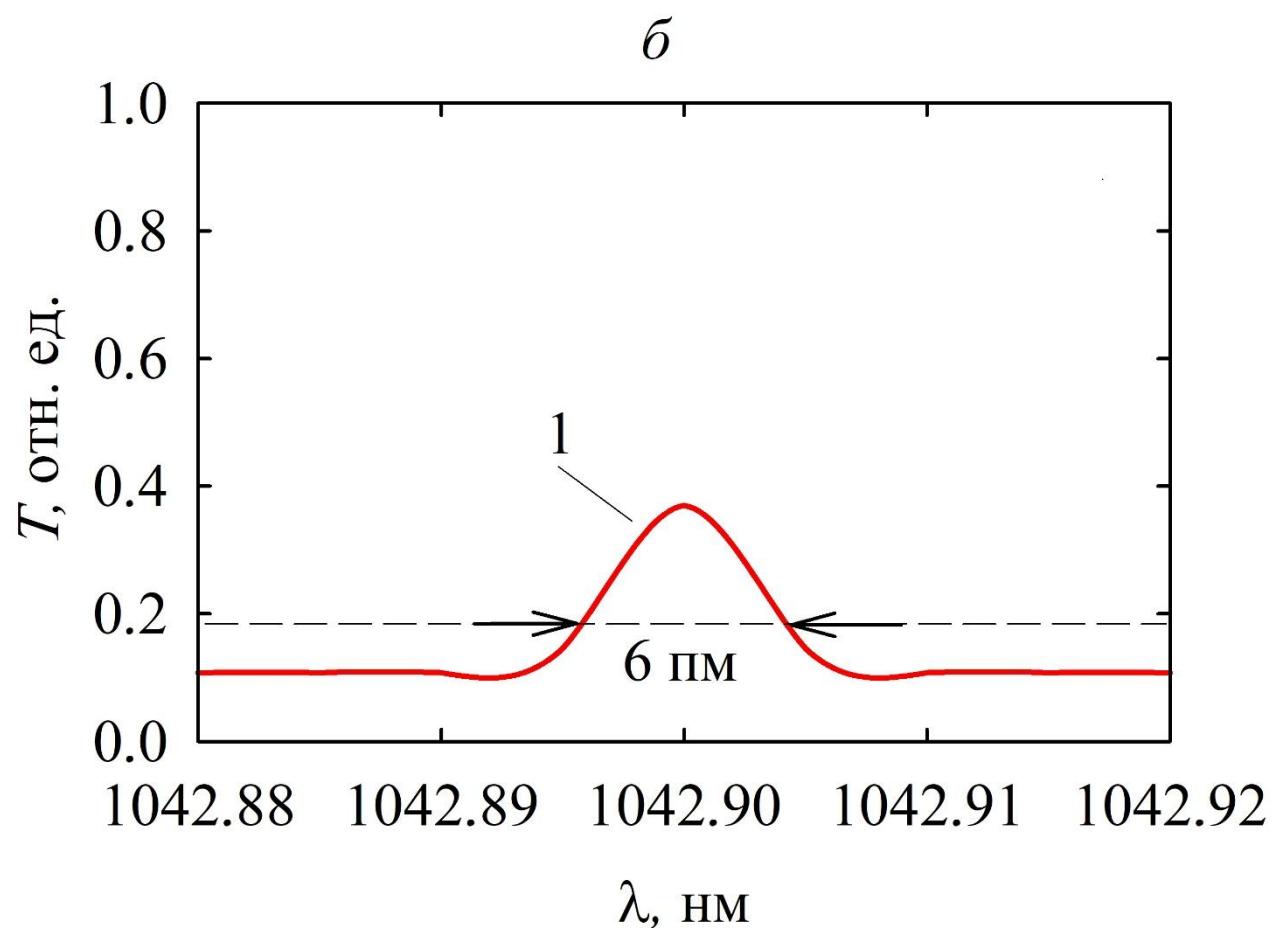


Рис. 3.

# **Determination of spectral and mode properties of nanophotonic resonators based on silicon and silicon nitride**

**A. I. Garifullin<sup>1,2\*</sup>, N. M. Arslanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Kazan Federal University, Institute of Physics, Kazan, 420008 Russia*

<sup>2</sup>*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan Quantum Center, Kazan, 420111 Russia*

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

Nanophotonic (photonic crystal) resonators with high quality and low mode volume are promising for research in the field of nonlinear and quantum optics on a chip. In this paper, the  $Q$ -factor, mode area, mode volume, and Purcell factor of a nanophotonic resonator based on silicon and silicon nitride are calculated to generate high-quality resonant states.

**Keywords:** nanophotonic resonator, photonic crystal, silicon, silicon nitride,  $Q$ -factor, mode area, mode volume, Purcell factor.