

ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ НАНОРЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Серафимович П.Г.

Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

В работе предложена и численно исследована модель двухкомпонентного оптического резонатора. Такой резонатор состоит, во-первых, из гребенчатого фотонно-кристаллического волновода, в котором период структуры не изменяется. Во-вторых, резонатор содержит фрагмент дополняющего материала площадью несколько периодов фотонного кристалла. При совмещении двух компонентов формируется дефект, в котором может быть возбуждена резонансная мода. Рассмотрены преимущества предложенной модели резонатора. В частности, простота формирования массивов резонаторов и создания динамических нанофотонных элементов. Рассчитаны допустимые погрешности изготовления предложенного резонатора. Показано, что величины допустимых погрешностей позволяют использовать существующие технологии совмещения структурных слоёв.

Ключевые слова: оптический нанорезонатор, фотонно-кристаллический волновод, резонансная мода, добротность резонатора.

Введение

Способность фотонно-кристаллических (ФК) структур локализовывать свет в субволновых объёмах находит применение в различных нанофотонных устройствах. Нанорезонатор становится базовым элементом нанофотоники [1]. Перечислю несколько проблем, которые усложняют разработку устройств на основе нанорезонаторов. Большинство существующих технологий создания высокодобротных ФК-резонаторов предполагают тонкую настройку геометрии резонансной камеры с помощью изменения параметров фотонного кристалла. Такими параметрами могут быть, например, длина периода фотонного кристалла и/или радиус отверстия на этом периоде [2, 3]. Это накладывает строгие ограничения на точность изготовления минимальных деталей ФК-структуры. При создании массива нанорезонаторов [4] высокая точность изготовления минимальных деталей должна быть обеспечена на всей площади массива. Индивидуальная настройка резонаторов в таком массиве требует дополнительных усилий [5]. Создание на основе нанорезонаторов динамических систем также требует сложных технологических решений. При этом в большинстве случаев предполагается механическое воздействие непосредственно на ФК-структуру [6]. Другая сложность возникает при создании нелинейных нанофотонных устройств. Усиление степени взаимодействия света с веществом в нанорезонаторе позволяет эффективно использовать оптически нелинейные материалы и квантовые точки. Привнесение таких материалов в область резонатора предполагает использование относительно сложных технологий [7].

Примером ещё одной трудности при создании некоторых нанофотонных устройств является необходимость формирования заданного распределения излучения в дальней зоне. Эта задача часто решается также с помощью тонкой настройки минимальных деталей фотонного кристалла [8, 9].

Постановка задачи и предложенный подход

Чтобы упростить решение перечисленных выше проблем, в данной работе предлагается и теоретически исследуется модель двухкомпонентного нанорезонатора (рис. 1). Первым компонентом такого резонатора является периодическая ФК-структура на основе гребенчатого ФК-волновода. По сравнению с двумерными ФК-структурами в слое [10, 11] резонаторы на основе гребенчатого ФК-волновода обладают меньшей площадью и естественным образом интегрируются в волноводную геометрию соединений на кристалле.

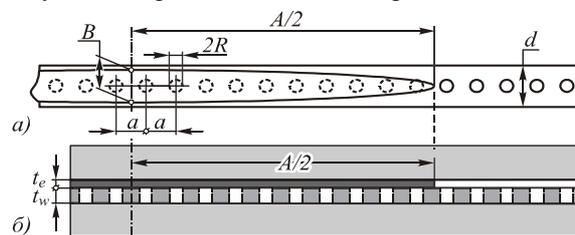


Рис. 1. Геометрия рассчитанного резонатора: вид сверху (а), вид сбоку (б). ФК-волновод ($n = 3,46$) лежит на подложке ($n = 1,45$). Ширина ФК-волновода $d = 0,5$ мкм, толщина $t_w = 0,26$ мкм. Круглые отверстия имеют радиус $R = 75$ нм и заполнены воздухом, период ФК-структуры – $a = 0,34$ мкм. Фрагмент эллиптической формы (параметры эллипса A и B) ($n = 3,46$) лежит на подложке ($n = 1,45$). Толщина фрагмента $t_e = 100$ нм

Вторым компонентом является фрагмент дополняющего материала, имеющий площадь в несколько периодов ФК. Форма и размер этого фрагмента определяются из заданных параметров нанорезонатора. При совмещении двух этих компонентов в регулярной ФК-структуре формируется дефект. Резонансная мода соответствующей частоты может быть возбуждена в этом дефекте.

Чтобы проиллюстрировать предложенный подход к созданию двухкомпонентных ФК-резонаторов примем за основу структуру, изображённую на рис. 1. Первый компонент данного резонатора является гребенчатым ФК-волноводом. Волновод состоит из

кремния и расположен на кварцевой подложке. Отверстия в волноводе имеют одинаковый радиус, равноотстоят друг от друга и заполнены воздухом. Параметры ФК-волновода приведены в подписи к рис. 1. При таких параметрах ФК-волновода создаётся запрещённая зона для излучения с преобладающей ТЕ-поляризацией в диапазоне от 1,4 до 1,7 мкм. Второй компонент резонатора является кремниевым фрагментом эллиптической формы, расположенным на кварцевой подложке. При совмещении двух компонентов возникает дефект в регулярном ФК-волноводе.

Для создания высокодобротного нанорезонатора необходимо уменьшить излучение резонансной моды в пространство. Это достигается оптимизацией формы огибающей резонансной моды. Спектр распределения электромагнитного поля непосредственно над волноводом определяет распределение поля в дальней зоне. Этот спектр состоит из двух пиков. Энергия рассеивается из резонатора через световой конус волновода, который находится между спектральными пиками. Следовательно, ширина спектральных пиков определяет потери в резонаторе на рассеяние. В работах [11, 12] предлагается формировать резонансную моду с огибающей, которая соответствует функции Гаусса. Форма огибающей резонансной моды зависит, в частности, от мнимой части γ волнового вектора периодической структуры. Гауссова форма огибающей обеспечивается ФК-волноводом, в котором γ меняется линейно от периода к периоду фотонного кристалла [12]. В той же работе [12] показано, что резонансная мода с огибающей в виде функции Гаусса может быть реализована квадратичным изменением коэффициента заполнения материалом (КЗМ) ФК-волновода. Эллиптическая форма дефекта предлагаемого в данной работе резонатора позволяет уменьшать КЗМ ФК-волновода по квадратичной зависимости от центра к краям резонатора. В дальнейших расчётах толщины ФК-волновода и дефекта полагались равными 260 нм и 100 нм соответственно. Такие величины толщин позволяют достичь оптимального изменения КЗМ в области резонатора. Увеличение толщины волновода приводит к необходимости увеличить толщину эллиптического фрагмента.

Численное моделирование резонатора

Для моделирования использовался параллельный трёхмерный метод FDTD [13]. В частности, был рассчитан резонатор с параметрами эллипса $A=6,8$ мкм (20 отверстий под эллипсом) и $B=0,5$ мкм. По краям резонатора располагалось ещё по 5 отверстий, т.е. общая длина резонатора составила $(20+5\times 2)\times 0,34=10,2$ мкм.

На рис. 2а показано распределение E_y в вертикальной плоскости, проходящей через ось волновода. На рис. 2б приведено распределение E_y в горизонтальной плоскости непосредственно над эллиптическим фрагментом (в кварце). Значения E_y вдоль линии пересечения этих двух плоскостей представлены в виде пунк-

тирной линии на графике на рис. 2в. Точечная линия на этом же графике показывает распределение E_y непосредственно под ФК-волноводом (в кварце). Сплошная линия на этом же графике соответствует функции $\cos(\pi x/a) \exp(-\sigma x^2)$ при $\sigma=0,23$; $\alpha=0,34$ мкм. Хорошее соответствие между распределениями E_y и аналитической функцией свидетельствует о гауссовой форме огибающей резонансной моды. Полагая линейной зависимость γ от x , можно получить

$$\gamma(x) = a/\pi \int \sigma dx \approx x/40.$$

В работах [12, 14] для формирования резонатора использовалось варьирование ширины ФК-волновода по квадратичному закону. Для резонатора длиной 60 ФК периодов в работе [12] была реализована зависимость $\gamma(x) \approx x/120$. Таким образом, можно сделать вывод, что две техники создания дефекта приблизительно эквивалентны. Рассматриваемый резонатор с эллиптическим дефектом в 3 раза короче, чем резонатор с квадратично изменяемой шириной волновода. Соответственно, скорость изменения γ в резонаторе с эллиптическим дефектом в 3 раза быстрее.

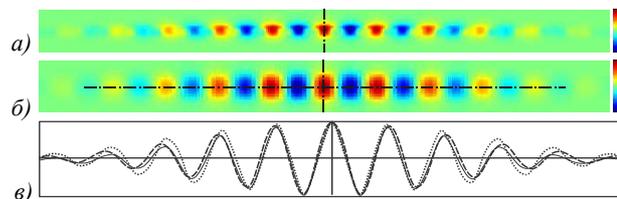


Рис. 2. Распределение E_y в вертикальной плоскости, проходящей через ось волновода (а), распределение E_y в горизонтальной плоскости непосредственно над эллиптическим фрагментом (в кварце) (б), точечная линия – значения E_y вдоль линии пересечения двух плоскостей (а) и (б), пунктирная линия – значения E_y вдоль центральной линии непосредственно под ФК волноводом (в кварце), сплошная линия – функция $\cos(\pi x/a) \exp(-\sigma x^2)$ при $\sigma=0,23$; $a=0,34$ мкм (в)

Анализ результатов

На рис. 3 приведены результаты моделирования предложенного резонатора для различных параметров эллиптического фрагмента. Для всех рассчитанных резонаторов по краям располагалось ещё по 5 отверстий, не лежащих под эллиптическим фрагментом. Из рис. 3а видно, что при увеличении длины резонатора добротность возрастает. Для резонатора длиной 12,24 мкм (36 отверстий – из них 26 отверстий находятся под эллиптическим фрагментом, т.е. $A=8,84$ мкм) и $B=0,5$ мкм добротность составила $\sim 1,4 \times 10^5$.

Минимальное значение A , при котором ещё возбуждается резонансная мода с добротностью выше 10^3 , составляет 3,4 мкм (10 отверстий под эллипсом), $B=0,65$ мкм. Добротность такого резонатора составила $2,5 \times 10^3$. Значения B , при которых достигается максимальная добротность резонатора, различны для каждого значения A . Оптимальные величины B составляют 650, 600, 550 и 500 нм для значений A , равных 3400, 4080, 6800 и 8840 нм со-

ответственно. Оптимальная величина B для каждого A соответствует частоте возбуждаемой резонансной моды. Горизонтальная серая линия на рис. 3б соответствует 1,525 мкм. Это значение резонансной частоты для $A=3400$ нм, $B=650$ нм. Другие оптимальные соотношения величин A и B на рис. 3а, б также примерно соответствуют значению этой резонансной частоты. Изменение значения B можно использовать для настройки резонансной частоты резонатора в массиве. Например, при $A=4,08$ мкм и изменении величины B в диапазоне от 0,4 до 0,7 мкм значение резонансной частоты меняется от 1,485 до 1,535 мкм.

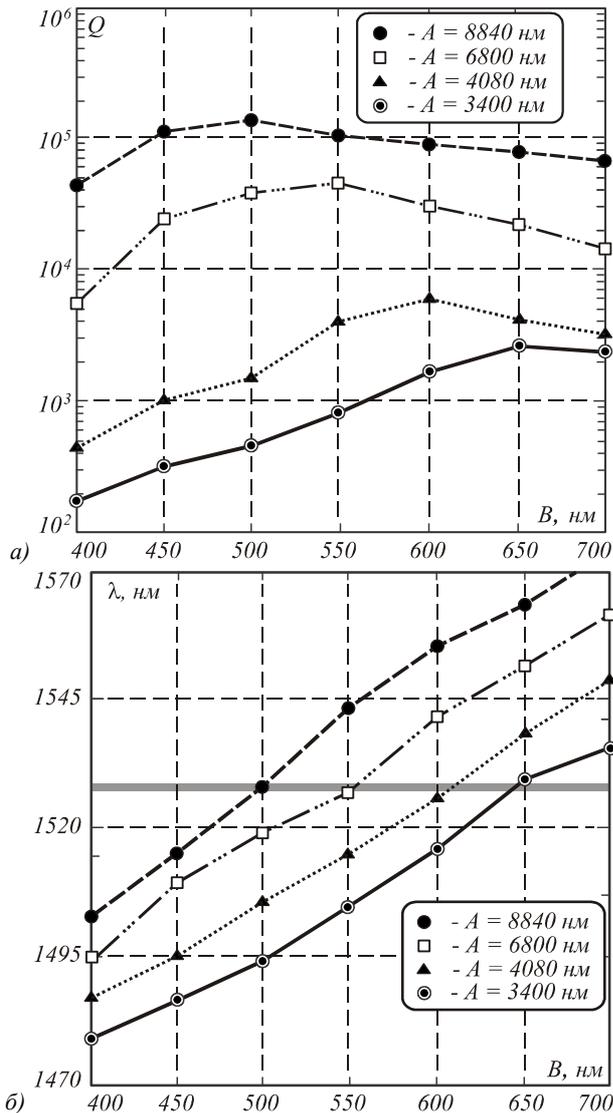


Рис. 3. Зависимость добротности резонатора (а) и резонансной частоты (б) от параметра эллипса A для различных значений B

На рис. 4 приведены результаты моделирования погрешностей горизонтального смещения двух компонентов резонатора относительно друг друга. Чем больше длина резонатора, тем точнее должны быть совмещены два компонента. При этом погрешность смещения эллипса в направлении перпендикулярном оси волновода наиболее критична. Современные тех-

нологии позволяют совмещать структурные слои с точностью ~ 10 нм [15]. Из рис. 4 видно, что при поперечном смещении всего в 20 нм добротность резонатора не превышает 10^3 для $A=4,08$ мкм. Продольное направление менее критично к погрешностям совмещения компонентов резонатора. Рис. 4 также показывает, что при продольном смещении 100 нм значение добротности резонатора изменяется слабо. Такая асимметрия допустимых погрешностей по осям X и Y полезна, например, при использовании относительно недорогой технологии совмещения, описанной в работе [16]. При использовании данной технологии совмещения средняя погрешность по одной из осей не превышает 60 нм, при этом по другой оси погрешность составляет менее 10 нм.

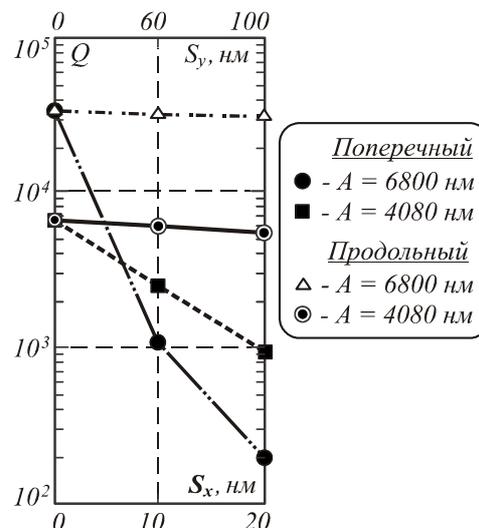


Рис. 4. Зависимость добротности резонатора от параметра эллипса A для нескольких значений сдвига эллиптического фрагмента в поперечном и продольном направлениях

Предложенный в данной работе двухкомпонентный нанорезонатор имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими решениями. Во-первых, упрощается изготовление нанорезонаторов на основе ФК-структур. В основе такого резонатора лежит регулярная структура. Для формирования дефекта не нужно варьировать форму минимальных деталей этой структуры. Например, изменить период и/или размер отверстий в структуре. В свою очередь, достаточно крупный второй компонент структуры может быть изготовлен также относительно просто. Во-вторых, предложенная структура позволяет естественным образом формировать двумерные массивы нанорезонаторов.

Двухкомпонентная структура позволяет использовать относительно недорогую технологию интерферометрической литографии (ИЛ) для изготовления массивов резонаторов. Массив из первых компонентов структуры может быть изготовлен методом двухэкспозиционной ИЛ [17]. Для изготовления массива вторых компонентов достаточно использования однокспозиционной ИЛ. Возможность использования ИЛ является преимуществом предложенной в данной

работе структуры перед структурами, рассмотрены в работах [12, 14].

В-третьих, двухкомпонентная структура нанорезонатора позволяет динамически управлять его параметрами. Сдвигая один из компонентов резонатора в горизонтальном и/или вертикальном направлениях, можно варьировать, например, резонансную частоту, добротность и характеристики вертикального излучения резонатора.

Отметим ещё два потенциальных достоинства предложенного резонатора, подтверждение которых потребует дополнительных исследований. Во-первых, упрощается создание нанорезонаторов с нелинейными свойствами. Второй компонент структуры может быть использован для привнесения оптически нелинейного материала непосредственно в область нанорезонатора. Во-вторых, варьируя форму второго компонента резонатора и его подложки, можно управлять характеристиками вертикального излучения резонатора.

Заключение

В работе предложена конструкция двухкомпонентного резонатора. В такой конструкции наиболее сложные для изготовления минимальные детали структуры содержатся только в периодическом компоненте резонатора. Другими преимуществами являются простота формирования массивов резонаторов, естественность создания динамических систем на основе нанорезонаторов, лёгкость привнесения оптически нелинейных материалов в область резонатора, возможность формирования заданных характеристик распределения энергии в дальней зоне.

Недостатком предложенной конструкции резонатора является высокая чувствительность к погрешности поперечного совмещения компонентов. Показано, для создания резонатора с добротностью выше 10^3 необходимо использовать самые современные технологии совмещения структурных слоёв с точностью ~ 10 нм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, гранта РФФИ № 13-07-97002-р_поволжье_а, федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Соглашение № 8231 от 06.08.2012 г.) и Программы № 5 фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы физики и технологии эпитаксиальных наноструктур и приборов на их основе».

Литература (References)

1. **Vahala, K.J.** Optical microcavities / K.J. Vahala // Nature. – 2003. – Vol. 424(6950). – P. 839-846.

2. **Akahane, Y.** Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity / Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song and S. Noda // Optics Express. – 2005. – Vol. 13(4). – P. 1202-1214.

3. **Velha, P.** Ultra-high-reflectivity photonic-bandgap mirrors in a ridge SOI waveguide / P. Velha, J.C. Rodier, P. Lalanne, J.P. Hugonin, D. Peyrade, E. Picard, T. Charvolin and E. Hadji // New J. Phys. (IOP). – 2006. – V. 8(204). – P. 1-13.

4. **Yariv, A.** Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis / A. Yariv, Y. Xu, R.K. Lee and A. Scherer // Opt. Lett. – 1999. – V. 24(11). – P. 711-713.

5. **Faraon, A.** Local tuning of photonic crystal cavities using chalcogenide glasses / A. Faraon, D. Englund, D. Bulla, B. Luther-Davies, B.J. Eggleton, N. Stoltz, P. Petroff and J. Vuckovic // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 92. – P. 043123.

6. **Frank, I.W.** Programmable photonic crystal nanobeam cavities / I.W. Frank, P.B. Deotare, M.W. McCutcheon and M. Lončar // Optics Express. – 2010. – V. 18(8). – P. 8705-8712.

7. **Qin, F.** Fabrication of semiconductor-polymer compound nonlinear photonic crystal slab with highly uniform infiltration based on nano-imprint lithography technique / F. Qin, Z.-M. Meng, X.-L. Zhong, Y. Liu and Z.-Y. Li // Optics Express. – 2012. – V. 20(12). – P. 13091-13099.

8. **Tran, N.-V.-Q.** Directive emission from high-Q photonic crystal cavities through band folding / N.-V.-Q. Tran, S. Combrié and A. De Rossi // Phys. Rev. – 2009. – Vol. B79. – P. 041101.

9. **Portalupi, S.L.** Planar photonic crystal cavities with far-field optimization for high coupling efficiency and quality factor / S.L. Portalupi, M. Galli, C. Reardon, T.F. Krauss, L. O'Faolain, L.C. Andreani and D. Gerace // Opt. Express. – 2010. – V. 18. – P. 16064-16073.

10. **Asano, Y.** High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal / Y. Akahane, T. Asano, B.S. Song and S. Noda // Nature. – 2003. – V. 425. – P. 944-947.

11. **Song, B.-S.** Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity / B.-S. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane // Nature Materials. – 2005. – V. 4. – P. 207-210.

12. **Quan, Q.** Deterministic design of high Q, small mode volume photonic crystal nanobeam cavities / Q. Quan and M. Loncar // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19, N 5. – P. 18529-18542.

13. **Taflove, A.** Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed. / A. Taflove and S.C. Hagness. – Norwood, MA: Artech House, 2005.

14. **Ahn, B.H.** One-dimensional parabolic beam photonic crystal laser / B.H. Ahn, J.H. Kang, M.K. Kim, J.H. Song, B. Min, K.S. Kim and Y.H. Lee // Opt. Express. – 2010. – V. 18. – P. 5654-5660.

15. **Li, N.** Sub-20-nm alignment in nanoimprint lithography using Moire fringe / N. Li, W. Wu, S.Y. Chou // Nano Letters. – 2006. – V. 6(11). – P. 2626-2629.

16. **Wu, W.** Nanoimprint lithography with ≤ 60 nm overlay precision / W. Wu, R.G. Walmsley, W.-D. Li, X. Li, R.S. Williams // Applied Physics A. – 2012. – V. 106(4). – P. 767-772.

17. **Brueck, S.R.J.** Optical and Interferometric Lithography — Nanotechnology Enablers / S.R.J. Brueck // Proc. IEEE. – 2005. – V. 93(10). – P. 1704-1721.

TWO-COMPONENT NANOCAVITY BASED ON A REGULAR PHOTONIC CRYSTAL NANOBEAM*P.G. Serafimovich**Image Processing Systems Institute of RAS***Abstract**

I propose and numerically examine a two-component design of an optical nanocavity. Such a nanocavity consists, first, of a photonic crystal nanobeam, in which the period of the structure is not changed. Second, the cavity contains a piece of additional (supplementary) material with the area of several periods of the photonic crystal. When combining the two components the defect has formed, in which the resonant mode can be excited. The advantages of the proposed model of the cavity has been considered. In particular, the easiness of formation of cavities arrays and of development of dynamic nanophotonic elements. The proposed nanocavity fabrication tolerances have been calculated. It is shown that existing structural layers alignment technologies can be used for fabrication.

Key words: optical nanoresonator; photonic crystal waveguide; resonance mode; Q-factor.

Сведения об авторе

Серафимович Павел Григорьевич, кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Области научных интересов: моделирование и проектирование нанооптических устройств, методы исследования фотонных кристаллов, разработка и исследование программных средств распределённой и параллельной обработки крупноформатных изображений.

E-mail: serp@smr.ru.

Pavel Grigorievich Serafimovich, candidate in physics and mathematics; senior researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS. His areas of research are nanooptics, simulation and design of photonic crystals, parallel and distributed image processing.

Поступила в редакцию 19 марта 2013 г.