

Оптические свойства и локализация поля электромагнитной волны в системе 2D фотоннокристаллических прямоугольных резонаторов с электромагнитной связью

© К.Г. Еланская¹, А.И. Сидоров^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: sidorov@oi.ifmo.ru

Спектральные свойства и распределение электромагнитного поля в одном фотоннокристаллическом резонаторе, а также в системе из двух и трех 2D фотоннокристаллических связанных прямоугольных резонаторов, было изучено методами компьютерного моделирования. Показано, что в условиях резонанса происходит значительная локализация поля электромагнитной волны в резонаторах. Добротность в системе из трех связанных фотоннокристаллических резонаторов может достигать 3000. В результате электромагнитного взаимодействия между связанными резонаторами возникают резонансы Фано, которые наблюдаются в резонансных спектральных полосах.

Ключевые слова: фотонный кристалл, резонатор, электромагнитное поле, резонанс Фано.

DOI: 10.61011/OS.2025.09.61764.7703-25

Введение

Фотонные кристаллы (ФК) широко применяются в различных областях оптики и фотоники [1,2]. Они могут быть использованы как оптические фильтры [3], демультиплексоры [4], оптические переключатели и логические цепи [5,6], конвертеры поляризации [7] в интегрально-оптических устройствах. Чувствительность оптических характеристик ФК к влиянию окружающей среды делает их перспективными для применения в различных оптических датчиках. Например, таких как химические и биосенсоры [8,9], датчиков механических параметров [10], датчиков температуры [11,12] и т.д.

1D и 2D ФК перспективны для применения в интегральной оптике и сенсорике. Оптические компоненты на основе 1D и 2D ФК, такие как волноводы и резонаторы, обладают уникальными свойствами. Они компактны и позволяют уменьшить габариты интегрально-оптических устройств. Изготовление 1D и 2D ФК значительно технологичнее, чем изготовление 3D ФК, так как для этого может быть использована только фотолитография. 2D ФК волноводы и резонаторы хорошо согласуются с интегрально-оптическими устройствами [13]. Они также могут быть использованы в микрофлюидных чипах [14].

Важным достоинством 2D ФК резонаторов является сильная локализация поля электромагнитной волны в резонаторе в условиях резонанса. Этот эффект может быть использован для увеличения чувствительности химических и биосенсоров на основе рамановского рассеяния [15]. Формирование электромагнитной связи между 2D ФК резонаторами создает новые возможности для разработки устройств фотоники. В частности, в

этом случае может быть уменьшена групповая скорость распространения излучения [16].

Целью данной работы было изучение спектральных характеристик группы 2D ФК резонаторов с электромагнитной связью, а также определение характеристик локализации поля электромагнитной волны в таких структурах в резонансных условиях.

1. Геометрия ФК резонатора и методы численного моделирования

Геометрия ФК резонатора показана на рис. 1. ФК сформирован периодически расположенными кремниевыми стержнями круглого сечения с радиусом r и периодом решетки ФК a . Элементарная ячейка ФК состоит из одного кремниевого стержня, окруженного воздухом. Фактор заполнения (FF, Filling Factor) определяется как $FF = 2r/a$. Прямоугольный ФК резонатор в центре ФК сформирован отсутствием одного кремниевого стержня. Электромагнитная волна вводится в резонатор и выводится из него с помощью ФК волноводов. На концах ФК волноводов, примыкающих к резонатору, расположены отражатели, представляющие собой кремниевые стержни с радиусом R . Параметры ФК показаны в таблице. Параметры были выбраны в результате предварительной оптимизации геометрии ФК.

При численном моделировании использовалось решение гармонических уравнений для электрического E и магнитного H полей электромагнитной волны:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times E) - \omega^2 \epsilon_c E = 0,$$

$$\nabla \times (\epsilon_c^{-1} \nabla \times H) - \omega^2 \mu H = 0.$$

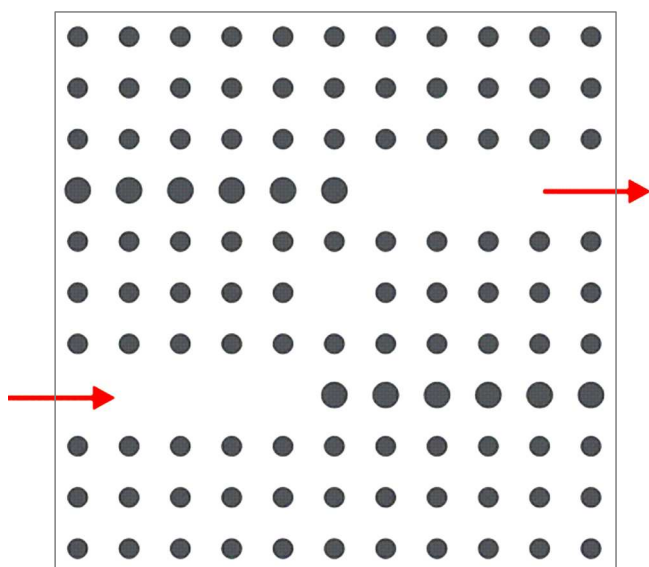


Рис. 1. Геометрия одного ФК резонатора, а также входного и выходного ФК волноводов.

Параметры ФК

Параметр	Значение
Период решетки, a	653–768 nm
Радиус Si стержней, r	0.115 a
Радиус Si стержней отражателей, R	1.5 r
Фактор заполнения, FF	0.115–0.13
Показатель преломления вокруг Si стержней, n_1	1
Показатель преломления Si стержней, n_2	3.48

Здесь μ и ε — магнитная и диэлектрическая постоянные соответственно, ω — частота электромагнитной волны.

Для того, чтобы границы были прозрачны для рассеянной волны использовались граничные условия рассеяния. Условия прозрачности выполняются для следующих типов рассеянных волн:

$$E = E_{sc} e^{-jk(n \cdot r)} + E_0 e^{-jk(k \cdot r)}$$

— планарная рассеянная волна,

$$E = E_{sc} \frac{e^{-jk(n \cdot r)}}{\sqrt{r}} + E_0 e^{-jk(k \cdot r)}$$

— цилиндрическая рассеянная волна,

$$E = E_{sc} \frac{e^{-jk(n \cdot r)}}{r_s} + E_0 e^{-jk(k \cdot r)}$$

— сферическая рассеянная волна.

Здесь n , k и r — показатель преломления, волновое число и радиус соответственно.

Численное моделирование проводилось методом FDTD с использованием программы COMSOL 5.5

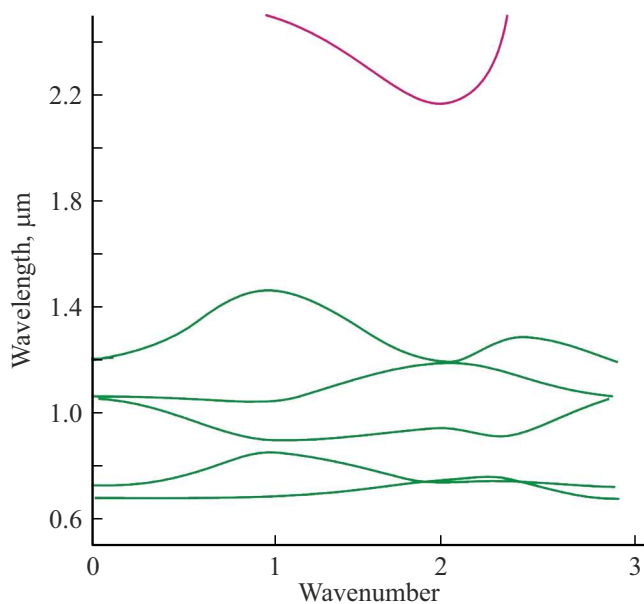


Рис. 2. Фотонная запрещенная зона ФК с параметрами, приведенными в таблице. FF = 0.1156.

Multiphysics вблизи длины волны $1.5 \mu\text{m}$. Энергетическая зонная структура ФК, окружающего волновод, вычислялась методом Блоховских функций. При моделировании использовалась свободная треугольная сетка с качеством „extremely fine“. Для решения поставленных задач использовались процедуры ARPACK FORTRAN, которые работают на основе итерации Арнольди (IRAM).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Один ФК резонатор

На рис. 2 показана фотонная запрещенная зона ФК с параметрами, показанными в таблице. Из рисунка видно, что фотонная запрещенная зона расположена между $1.4 \mu\text{m}$ и $2.1 \mu\text{m}$. Распределение E -компоненты электромагнитного поля для ТЕ моды в одном прямоугольном ФК резонаторе в условиях резонанса показано на рис. 3. Поле электромагнитной волны сосредоточено, в основном в центре резонатора. Относительное увеличение напряженности электромагнитного поля в этом случае достигает 10.

На рис. 4 показаны спектральные зависимости пропускания и отражения одного ФК резонатора. Из рисунка видно, что резонанс расположен на длине волны $1.55 \mu\text{m}$. Пропускание резонатора и волноводов на этой длине волны равно 80%. Ширина резонансной полосы по полувысоте равна 1.5 nm . Добротность резонатора составляет 1040. Это дает возможность использовать такой резонатор как узкополосный фильтр в интегрально-оптических устройствах.

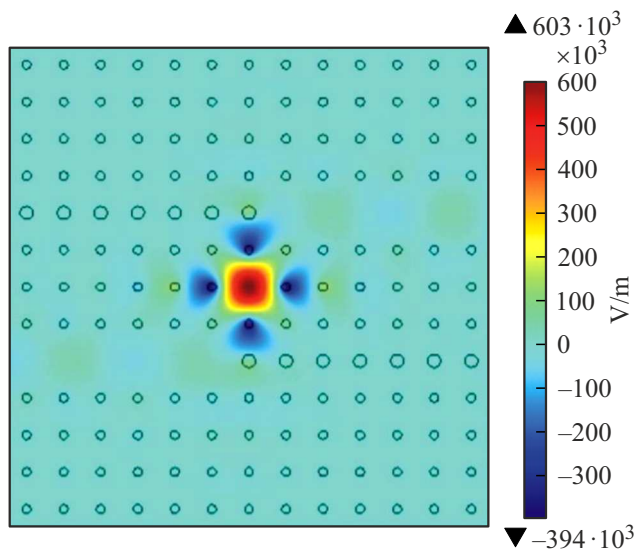


Рис. 3. Распределение E -компоненты электромагнитного поля (ТЕ мода) в одном прямоугольном ФК резонаторе. $FF = 0.1156$.

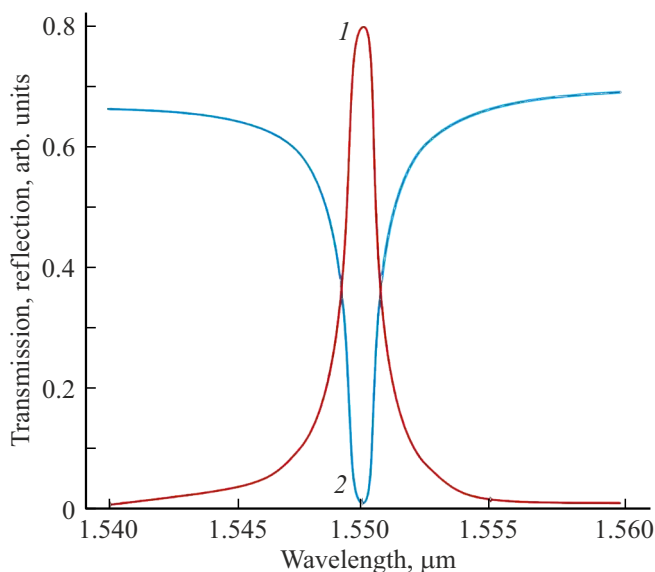


Рис. 4. Спектральные зависимости пропускания (1) и отражения (2) для одного ФК резонатора. $FF = 0.1156$.

2.2. Два ФК резонатора с электромагнитной связью

На рис. 5 показано распределение E -компоненты электромагнитного поля для ТЕ моды для двух связанных резонаторов. Центральный ФК волновод, через который происходит электромагнитная связь, состоит из 13 элементарных ячеек ФК. Электромагнитное взаимодействие между резонаторами вызвано присутствием в центральном ФК волноводе прямой и обратной электромагнитных волн: прямой — от первого резонатора ко второму и обратной — от второго резонатора к первому. Из рисунка видно, что относительное увеличение напряженности

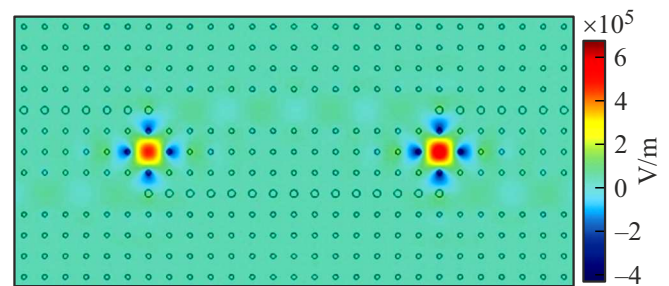


Рис. 5. Распределение E -компоненты электромагнитного поля (ТЕ мода) в двух связанных прямоугольных ФК резонаторах. $FF = 0.1156$.

электромагнитного поля в резонаторах достигает 30. Это указывает на то, что прямоугольные связанные резонаторы могут быть полезны для усиления поля в сенсорах на основе рамановского рассеяния. Из рис. 5 также видно, что во втором резонаторе локализация поля больше, чем в первом, а электромагнитные волны в обоих резонаторах находятся в фазе.

Спектры пропускания и отражения системы из двух связанных резонаторов показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что полоса пропускания в области резонанса имеет плоскую вершину с небольшим минимумом в центре. Эта особенность объясняется электромагнитным взаимодействием двух колебательных систем. Первый резонатор влияет на второй и наоборот. Это приводит к возмущениям колебаний в каждом резонаторе. Результатом такого взаимодействия является возникновение резонанса Фано [17–21]. Ширина резонансной полосы по полувысоте равна 12 nm. Добротность системы из двух резонаторов равна 130. Подобная П-образная полоса пропускания может быть полезна при разработке некоторых типов фильтров в интегральной оптике.

При увеличении фактора заполнения до $FF = 0.13$ электромагнитное взаимодействие между двумя резонаторами также увеличивается (рис. 7). Увеличивается локализация электромагнитного поля в ФК волноводе между резонаторами. Из рисунка видно, что электромагнитное поле в двух резонаторах имеет противоположные фазы. Увеличение электромагнитного взаимодействия между резонаторами приводит к увеличению эффектов, связанных с резонансом Фано (рис. 8). Возрастает провал в центре резонансной полосы пропускания. Ширина резонансной полосы по полувысоте в этом случае равна 3.5 nm. Добротность системы из двух связанных резонаторов равна 320.

2.3. Три ФК резонатора с электромагнитной связью

Распределение E -компоненты электромагнитного поля для ТЕ моды в системе из трех резонаторов с электромагнитной связью показано на рис. 9. Видно,

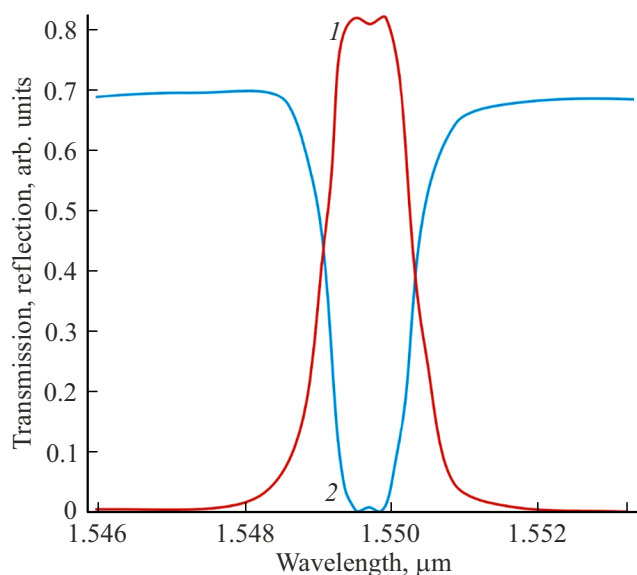


Рис. 6. Спектральные зависимости пропускания (1) и отражения (2) для двух связанных ФК резонаторов. $FF = 0.1156$.

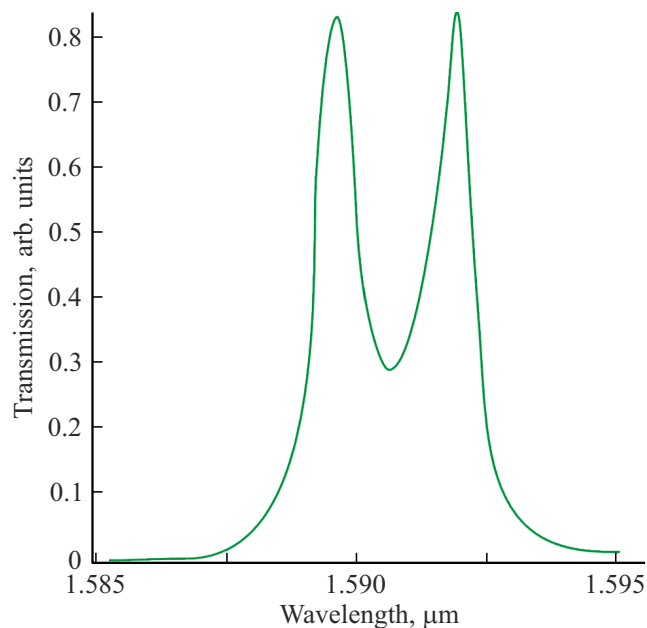


Рис. 8. Спектральные зависимости пропускания (1) и отражения (2) для двух связанных ФК резонаторов. $FF = 0.13$.

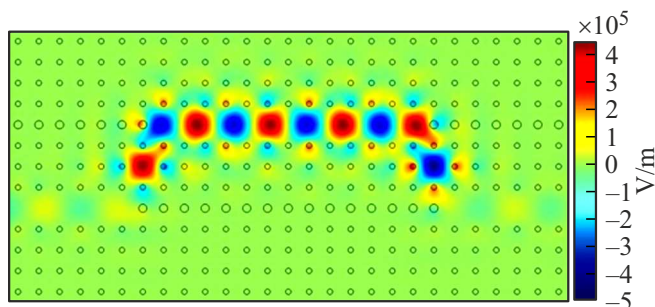


Рис. 7. Распределение E -компоненты электромагнитного поля (ТЕ мода) в двух связанных прямоугольных ФК резонаторах. $FF = 0.13$.

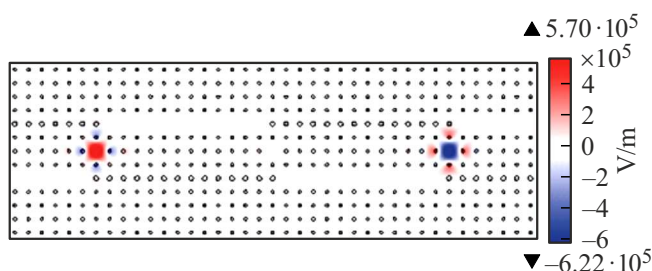


Рис. 9. Распределение E -компоненты электромагнитного поля (ТЕ мода) в трех связанных прямоугольных ФК резонаторах. $FF = 0.1156$.

что в правом и левом резонаторах электромагнитное поле находится в противоположных фазах. Причиной этого является суммарная длина двух центральных ФК волноводов. В центральном волноводе локализация поля электромагнитной волны близка к нулю. Это связано с суммированием в центральном резонаторе прямой и обратной электромагнитных волн имеющих противоположные фазы. Относительное увеличение напряженности электромагнитного поля в первом и третьем ФК резонаторах достигает 15 раз.

Спектры пропускания и отражения системы из трех ФК резонаторов с электромагнитным взаимодействием показаны на рис. 10. Из рисунка видно, что полосы пропускания и отражения искажены и имеют особенности в центральной части. Это указывает на возникновение резонанса Фано в результате электромагнитного взаимодействия трех связанных ФК резонаторов. Ширина

резонансной полосы по полувысоте для данной системы равна 0.5 nm. Добротность системы равна 3000.

Заключение

Методами численного моделирования показано, что в двух или трех 2D прямоугольных ФК резонаторах с электромагнитной связью возникают резонансы Фано. Эти резонансы увеличиваются при увеличении электромагнитной связи между резонаторами. В свою очередь, электромагнитная связь между резонаторами увеличивается при увеличении фактора заполнения. В трех связанных резонаторах добротность системы достигает 3000. В условиях резонанса происходит сильная локализация напряженности электромагнитного поля в резонаторах. Относительное увеличение напряженности поля может достигать 30 раз. Описанные эффекты могут быть использованы в интегрально-оптических устройствах, химических и биосенсорах и оптических фильтрах.

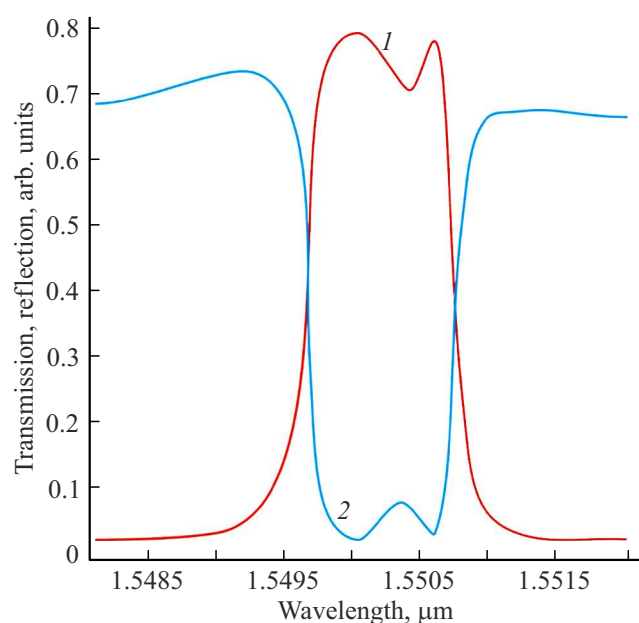


Рис. 10. Спектральные зависимости пропускания (1) и отражения (2) для трех связанных ФК резонатора. $FF = 0.1156$.

Финансирование работы

Настоящие исследования были выполнены при поддержке программой „Приоритет 2030“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. Photonic Crystals, Molding the Flow of Light, Princeton Academic Press, Princeton, NY, (1995).
- [2] R. Ferrini, D. Leuenberger, R. Houdre, H. Benisty, M. Kamp, A. Forchel. Appl. Phys. Lett., **76**, 532–537 (2000). DOI: 10.1364/OL.31.001426
- [3] H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadeh. Digest J. Nanomat. and Biostruct., **20**, 361–367 (2012).
- [4] X. Zhang, Q. Liao, T. Yu, N. Liu, Y. Huang. Opt. Comm., **285**, 274–276 (2012). DOI: 10.1080/03772063.2016.1217175
- [5] A. Sharkawy, S. Shi, D.W. Prather. Opt. Expr., **10**, 1048–1059 (2002). DOI: 10.1364/oe.10.001048
- [6] P. Andalib, N. Granpayeh. J. Opt. Soc., **26**, 10–16 (2009). DOI: 10.1364/JOSAB.26.000010
- [7] M.F.O. Hameed, M. Abdelrazzak, S.S.A. Obayya. IEEE J. Lightwave Techn., **31**, 81–86 (2013). <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-31-1-81>
- [8] C. Kang, C. Phare, S.M. Weiss. Proc. Intern. Conf. on Laser, Electro-Optics and Quant. Electr. and Laser Sci., **16**, 1–2 (2010).
- [9] S. Mandal, J. Goddard, D. Erickson. Proc. Intern. Conf. on Laser, Electro-Optics and Laser Sci., **18**, 1–2 (2008).
- [10] C. Lee, R. Radhakrishnan, C.-C. Chen, J. Li, J. Thillai-govindan, N. Balasubramanian. J. Lightwave Techn., **26**, 839–846 (2008). <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-26-7-839>
- [11] A. Hocini, A. Harhouz. J. Nanophot., #10, 7–12 (2016). DOI: 10.1117/1.JNP.10.016007
- [12] A.I. Sidorov, Yu.O. Vidimina. Opt. Spectr., **130**, 1185–1189 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.09.54840.3355-22
- [13] S. Mandal, X. Serey, D. Erickson. Nano Lett., #10, 99–104 (2010). DOI: 10.1021/nl9029225
- [14] C. Monat, P. Domachuk, B.J. Eggleton. Nat. Photonics, **1**, 106–114 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2006.96
- [15] M.I. Stockman, Electromagnetic theory of SERS. In: K. Kneipp, M. Moskovits, H. Kneipp (eds.) Surface-enhanced Raman scattering, Springer, NY, (2006).
- [16] H. Altuga, J. Vučkovic. Appl. Phys. Lett., **84**, 161–163 (2004). <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=IQEC-2004-IThI2>
- [17] U. Fano. Phys. Rev., **13**, 1866–1875 (1961).
- [18] D.M. Riffe. Phys. Rev. B, **84**, 064308 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.064308
- [19] Y.S. Joe, A.M. Satanin, C.S. Kim. Physica Scripta, **74**, 259–266 (2006). DOI: 10.1088/0031-8949/74/2/020
- [20] M.F. Limonov, M.V. Rybin, A.N. Poddubny, Y.S. Kivshar. Nature Photonics, **11**, 543–554 (2017). DOI: 10.1038/nphoton.2017.142
- [21] J. Ly, Y. Ren, D. Wang, J. Wang, X. Lu, Y. Yu, W. Li, Q. Liu, X. Xu, W. Liu, P.K. Chu, C. Liu. Opt. Expr., **32**, 28334–28347 (2024). DOI: 10.1364/OE.530788