

УДК 621.383

Н.А. Ушаков, А.А. Маркварт, А.В. Петров, Л.Б. ЛикумовичСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРНЫХ
СВЯЗАННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Представлен анализ оптических линий задержки, основанных на связанных кольцевых микрорезонаторах. Вносимая оптическая задержка вызвана реализацией режима медленного света в системе с высокой добротностью. При помощи метода медленно меняющихся амплитуд был проведён теоретический анализ, и получено выражение для передаточной функции рассматриваемой системы. При помощи численного моделирования была исследована возможность управления вносимой задержкой и ослабление задерживаемого сигнала. Из проведённого численного моделирования следует, что предложенная система связанных резонаторов позволяет изменять задержку в диапазоне от 165 до 629 пс для полезного сигнала с полосой частот до 300 МГц при максимальном ослаблении задерживаемого сигнала $-4,7$ дБ.

Ключевые слова: управляемые линии задержки, медленный свет, моды шепчущей галереи, радиофотоника.

N.A. Ushakov, A.A. Markvart, A.V. Petrov, L.B. Liokumovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

**APPLICATION OF PAIRS OF COUPLED MICRORESONATORS
FOR CONTROL OF OPTICAL RADIATION:
THEORETICAL ANALYSIS**

The paper presents an analysis of optical delay lines based on coupled ring microresonators. The introduced optical delay is caused by realization of a slow light mode in a system with high Q-factor. Using the method of slowly varying amplitudes, a theoretical analysis was carried out and an equation for the transfer function of the system under consideration was obtained. Using numerical simulation, the possibility of controlling the introduced delay and attenuation of the delayed signal was investigated. It follows from the numerical simulation that the proposed system of coupled resonators allows to change the delay in the range from 165 ps to 629 ps for a transmitted signal with a frequency band up to 300 MHz with a maximum attenuation of the delayed signal -4.7 dB.

Keywords: controlled delay lines, slow light, whispering gallery modes, radiophotonics.

Введение

Для построения таких устройств радиофотоники, как системы формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток, оптические устройства обработки сигналов, необходимы оптические линии задержки [1]. В то же время для адаптивности характеристик и, как следствие, большей функциональности проектируемых устройств необходимо предусмотреть возможность управления параметрами системы, в частности, временем задержки. Одним из наиболее перспективных методов построения оптических линий задержки являются системы, реализующие режим медленного света, в которых групповая скорость распространения света значительно меньше фазовой скорости [2–5]. Для достижения таких условий необходимо создать среду с большим значением дисперсии показателя преломления, что реализуется, если частота света близка к резонансам среды. Оптические резонансы формируются по разным принципам:

– связанные с собственными энергетическими переходами атомов и молекул [6];

– при нелинейном взаимодействии когерентных оптических полей [7];

– в специально созданных высокодобротных оптических резонаторах вследствие многократной интерференции света [1, 8].

Первый тип оптических резонансов имеет существенные ограничения на изменение параметров резонанса, а следовательно, и характеристик формируемых ими линий задержки. Во втором типе резонансов обычно используются такие процессы, как стимулированное усиление Бриллюэна и четырехволновое смешение. Их недостатком является ограниченное время задержки. Системы медленного света на основе высокодобротных оптических резонаторов обладают наибольшим потенциалом изменения параметров и способны обеспечить значительные времена задержки. Предполагается, что использование систем связанных резонаторов [9–11] позволит в достаточной степени улучшить свойства создаваемых линий задержки.

Кольцевые микрорезонаторы с модами шепчущей галереи [1, 12, 13] являются идеальными кандидатами для использования в оптических линиях задержки благодаря их высоким значениям добротности (до $Q \sim 10^9$, как сообщается в [13]). Тем не менее в спектральной

области, близкой к одиночному резонансу, помимо дисперсии второго порядка (линейной зависимости групповой скорости от длины волны), существует достаточно сильная дисперсия третьего порядка, приводящая к искажению оптического сигнала, проходящего через систему. С другой стороны, наличие дисперсии третьего порядка позволяет изменять величину дисперсии второго порядка путем изменения резонансной частоты или длины волны излучения и, следовательно, изменения групповой скорости и временной задержки проходящего света. В системах связанных резонаторов проблема искажения формы импульса может быть решена путем выбора величин дисперсии второго и третьего порядка путем регулирования связи между резонаторами и резонансных частот отдельных резонаторов. В то же время в системе связанных резонаторов групповая скорость и временная задержка зависят, в частности, от фазовых соотношений волн, прошедших различные пути в связанной системе. Таким образом, изменяя оптические размеры самих резонаторов и/или оптические расстояния соединительных элементов, можно также управлять введенной оптической задержкой. В данной работе будет исследована зависимость управления оптической задержкой при помощи малого изменения оптической длины волновода, через который осуществляется связь двух микро-резонаторов.

1. Передаточная функция системы связанных резонаторов

В данном разделе рассмотрим структуру связанных резонаторов, в которой два кольцевых микрорезонатора косвенно связаны друг с другом через волоконный тейпированный световод, как показано на рис. 1 [14, 15]. С точки зрения приближения медленно меняющихся амплитуд поля моды микрорезонатора можно описать с помощью теории связанных мод [11, 16]

$$\frac{da_{cw}}{dt} = -i(\omega_0 a_{cw} + g a_{ccw}) - s a_{cw} / 2 - \sqrt{k} a_{cw}^{in}, \quad (1)$$

$$\frac{da_{ccw}}{dt} = -i(\omega_0 a_{ccw} + g a_{cw}) - s a_{ccw} / 2 - \sqrt{k} a_{ccw}^{in}, \quad (2)$$

где a_{cw} и a_{ccw} – амплитуды мод, распространяющихся по и против часовой стрелки (CW и CCW); ω_0 – частота резонанса;

$$s = r + k,$$

где k – коэффициент связи моды волокна с модой микрорезонатора; r – коэффициент затухания света в микрорезонаторе, $r = \omega_0/(2Q)$; g – коэффициент связи между CW и CCW модами. При этом предполагается, что моды CW и CCW имеют одинаковые параметры.

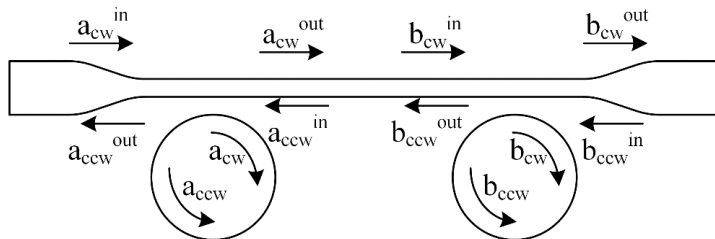


Рис. 1. Рассматриваемая система: два микрорезонатора, связанные через тейпированное оптическое волокно

Выходные поля a_{cw}^{out} и a_{ccw}^{out} связаны с входными a_{cw}^{in} и a_{ccw}^{in} как $a_{cw/ccw}^{out} = a_{cw/ccw}^{in} + \sqrt{k}a_{cw/ccw}$. Применяя для решения уравнений (1) и (2) метод Фурье, получим следующие выражения для выходных полей:

$$a_{cw}^{out} = \frac{igka_{ccw}^{in} + h^2a_{cw}^{in}}{g^2 + \alpha^2}, \quad (3)$$

$$a_{ccw}^{out} = \frac{igka_{cw}^{in} + h^2a_{ccw}^{in}}{g^2 + \alpha^2}, \quad (4)$$

где $\alpha = i(\omega - \omega_c) - s/2$, и $h^2 = g^2 + \alpha(\alpha + k)$. Выражения (3) и (4) могут быть переписаны в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} a_{cw}^{out} \\ a_{ccw}^{in} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a_{cw}^{in} \\ a_{ccw}^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g^2 + (\alpha + k)^2 & igk \\ -igk & g^2 + \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{h^2} \cdot \begin{bmatrix} a_{cw}^{in} \\ a_{ccw}^{out} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Передаточную матрицу системы из двух микрорезонаторов, связанных при помощи волновода длиной L , и эффективным показателем преломления n можно записать в виде:

$$T = T_b T_0 T_a, \quad (6)$$

где T_a и T_b – матрицы передачи двух микрорезонаторов, описываемые формулой (5), а T_0 – матрица передачи отрезка волновода, записываемая как

$$T_0 = \begin{bmatrix} \exp(i\omega nL/c) & 0 \\ 0 & \exp(-i\omega nL/c) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где c – скорость света в вакууме.

С учётом того, что коэффициент передачи по полю для системы с передаточной матрицей T определяется как

$$t = T_{0,0} - T_{0,1}T_{1,0} / T_{1,1}, \quad (8)$$

можно получить следующее выражение для коэффициента передачи системы:

$$t = \frac{\exp(i\omega nL/c)(g_a^2 + \alpha_a^2 + \alpha_a k_a)(g_b^2 + \alpha_b^2 + \alpha_b k_b)}{\exp(i2\omega nL/c)k_a k_b g_a g_b + (g_a^2 + \alpha_a^2)(g_b^2 + \alpha_b^2)}. \quad (9)$$

Множественная интерференция света будет приводить к задержке оптического излучения, распространяющегося через рассматриваемую систему. Величина задержки удобно характеризуется групповой скоростью распространения света в рассматриваемой системе, которая может быть выражена следующим образом:

$$v_g = L \frac{d\omega}{d \arg(t)}. \quad (10)$$

Также при анализе систем связанных резонаторов важна передаточная функция по интенсивности, которая может быть найдена как квадрат модуля передаточной функции по полю $t_1 = |t|^2$. Явные выражения для групповой скорости и передаточной функции по интенсивности могут быть получены при помощи соответствующих преобразований с выражением (9). В данной работе анализ волоконно-оптических линий задержки, использующих связанные кольцевые микрорезонаторы, включая возможности управления вносимым временем задержки и равномерности, и величины передаточной функции по интенсивности, будет проводиться при помощи численных расчётов ввиду громоздкости соответствующих аналитических выражений и сложности их аналитического рассмотрения.

2. Поиск оптимальных параметров системы связанных резонаторов

Возможность практической реализации управляемых оптических линий задержки, построенных на системах медленного света, использующих связанные кольцевые микрорезонаторы, была исследована при помощи численных расчётов. Поскольку для линий задержки важны не только величина вносимой задержки и возможность управления ею, но и способность неискажающего пропускания задерживаемого сигнала, будут анализироваться как групповая скорость распространения света в системе связанных микрорезонаторов, так и коэффициент передачи системы по интенсивности.

В качестве примера рассмотрены два связанных кольцевых микрорезонатора с радиусом $R = 10$ мкм, добротностью $Q = 10^8$, коэффициентами преобразования между модой волокна и модой микрорезонатора $k = 10^{-5} \cdot \omega_0$ и между разнонаправленными модами микрорезонатора $g = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_0$, показатель преломления микрорезонаторов $n_{\text{WGM}} = 1,47$, эффективный показатель преломления волоконной моды $n_{\text{fib}} = 1,46$, расстояние между резонаторами $L \approx 1000$ мкм. Анализируется диапазон длин волн от 1539 до 1540 нм, соответствующий окрестности моды шепчущей галереи с азимутальным индексом $m = 60$; интервал дискретизации по длине волны 100 фм, что соответствует изменению оптической частоты на 12,6 МГц.

На рис. 2 показаны спектральные зависимости коэффициента пропускания системы микрорезонаторов и групповой скорости распространения света в системе связанных резонаторов, нормированной на скорость света в волокне. Видно, что сильная связь между разнонаправленными модами микрорезонатора приводит к расщеплению резонанса на величину около 60 пм или 7 ГГц. В результате в достаточно широком спектральном интервале система имеет ненулевой коэффициент пропускания и в то же время обеспечивает крайне малое значение групповой скорости распространения света.

Одним из подходов управления задержкой излучения в перестраиваемых оптических линиях задержки является перестройка длины волны излучения [17]. Из рис. 2 видно, что данная система представляет большие возможности по управлению задержкой таким способом.

Однако такой подход требует применения дорогостоящих перестраиваемых лазеров, что усложняет практическое применение таких систем. Другим способом управления вносимой задержкой является изменение оптического расстояния между микрорезонаторами $n_{\text{фиб}}L$. Соответственно далее будут рассмотрены зависимости групповой скорости распространения и коэффициента передачи от расстояния между микрорезонаторами L . На рис. 3 и 4 изображены зависимости групповой скорости распространения, нормированной на скорость света в волокне, и коэффициента пропускания по интенсивности от расстояния между резонаторами и длины волны излучения. Изображённый диапазон длин волн соответствует спектральной области между резонансами.

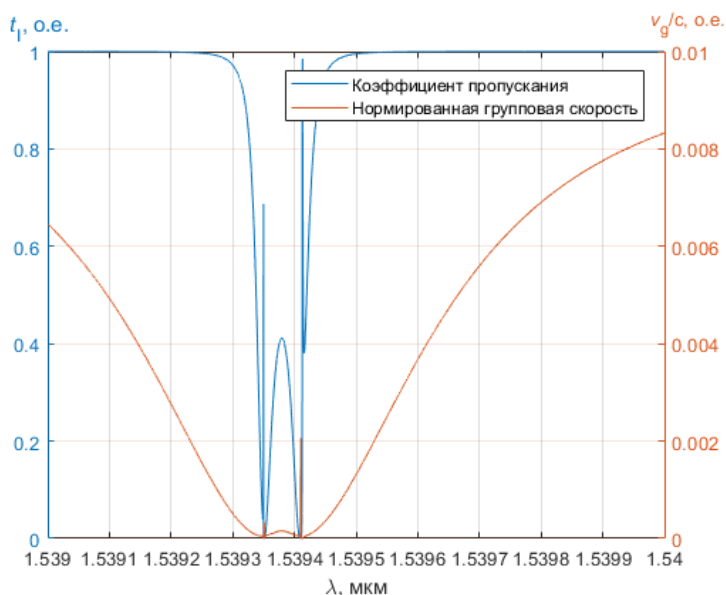


Рис. 2. Зависимость нормированной групповой скорости распространения v_g/c и коэффициента пропускания по интенсивности t_1 от длины волны излучения

Как видно из рис. 3, при длине волны излучения около 1539,355 нм при относительно небольших изменениях L (в пределах 100 нм) можно достичь многократного изменения групповой скорости распространения света, а следовательно, и изменения вносимой задержки. Одновременно с этим, как следует из рис. 4, коэффициент пропускания t_1 в требуемом диапазоне значений L и λ имеет уровень не ниже 0,2.

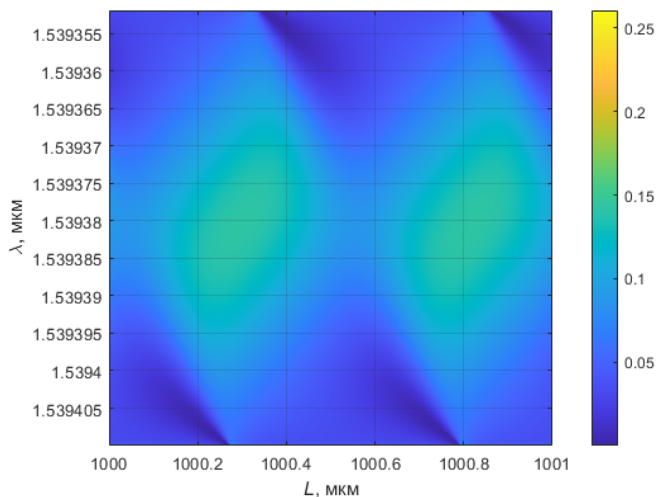


Рис. 3. Зависимость нормированной групповой скорости распространения v_g/c от расстояния между резонаторами и длины волны излучения

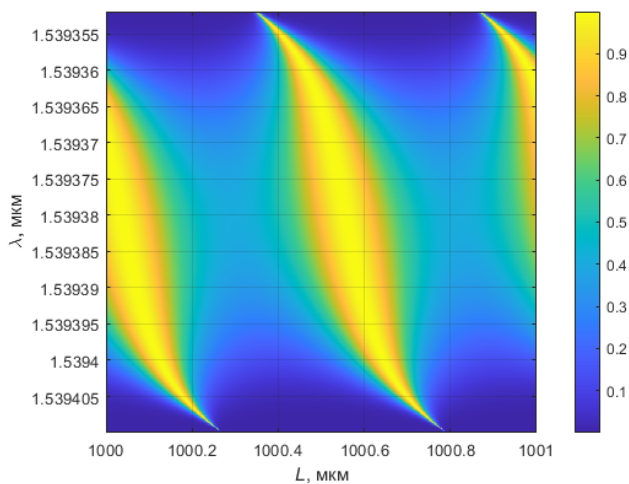


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания по интенсивности t_1 от расстояния между резонаторами и длины волны излучения

Было также промоделировано прохождение оптических сигналов через управляемую линию задержки. В качестве целевого сигнала был выбран прямоугольный импульс длительностью 3 нс с оптической несущей на длине волны 1593,3452 нм. Сигнал, прошедший через линию задержки, моделировался путём перемножения преобразования Фурье от исходного импульса с комплексной передаточной функцией системы микрорезонаторов, вычисленной по формуле (9), и приме-

нением обратного преобразования Фурье. При этом вычисления повторялись для параметра L , варьируемого в пределах от $L=1000,2$ мкм до $L=1000,26$ мкм. Для наглядности к сигналу на выходе линии задержки применялся согласованный фильтр, огибающие результирующих сигналов показаны на рис. 5.

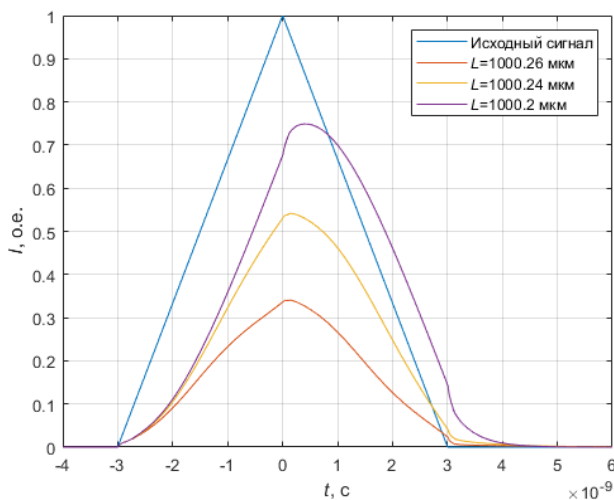


Рис. 5. Сравнение сигналов, обработанных согласованным фильтром: исходного (не прошедшего линию задержки), а также прошедших через управляемую линию задержки при $L=1000,2$ мкм, $L=1000,24$ мкм и $L=1000,26$ мкм

Величина вносимой задержки была оценена как позиция центра масс прошедшего импульса. При этом вносимая задержка увеличивается от 165 до 629 пс по мере уменьшения расстояния между резонаторами от $L=1000,26$ мкм до $L=1000,2$ мкм. Таким образом, диапазон изменения задержки составляет 464 пс, что соответствует фазовому набегу более 2π для радиочастоты 2,4 ГГц, и, следовательно, может применяться в качестве элементов фазированных антенных решёток и других устройств радиофоники.

При изменении оптической несущей в диапазоне ± 50 МГц диапазон изменения вносимой задержки сокращается до 422 пс, что всё ещё обеспечивает изменение фазового набега более чем на 2π для радиочастоты 2,4 ГГц. При этом вносимое линией задержки ослабление сигнала при изменении оптической частоты не изменялось по сравнению с номинальной частотой и составляло $-4,7$ дБ для минимальной задержки и $-1,3$ дБ для максимальной задержки.

Заключение

В работе получено удобное для проведения расчётов аналитическое выражение, описывающее передаточную функцию управляемой оптической линии задержки, в основе которой лежит пара связанных кольцевых микрорезонаторов. Найдены параметры системы, при которых реализуются параметры линии задержки, позволяющие использовать её для систем формирования диаграмм направленности фазированных антенных решёток, оптической обработки информации и ряде других систем. Полученные результаты могут лечь в основу методов разработки различных устройств радиофотоники, используемых при проектировании таких устройств.

Список литературы

1. Ilchenko V.S., Matsko A.B. Optical resonators with whispering-gallery modes-part II: applications // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2006. – Vol. 12, № 1. – P. 15–32.
2. Khurgin J.B. Slow light in various media: a tutorial // *Advances in Optics and Photonics*. – 2010. – Vol. 2, № 3. – P. 287–318.
3. Krauss T.F. Why do we need slow light? // *Nature Photonics*. – 2008. – Vol. 2, № 8. – P. 448–450.
4. Thévenaz L. Slow and fast light in optical fibres // *Nature Photonics*. – 2008. – Vol. 2, № 8. – P. 474–481.
5. Zhao Y., Qin C., Wang Q. Principles of structural slow light and its applications for optical fiber sensors: a review // *Instrumentation Science & Technology*. – 2014. – Vol. 42, № 1. – P. 72–94.
6. Sokolov I.M. Electro-optical effects in dense and cold atomic gases // *Physical Review A*. – 2018. – Vol. 98, № 1. – P. 013412.
7. Control of glass–metal composite optical nonlinearity via nanostructuring / O.V. Shustova, V.V. Zhurikhina, A.A. Lipovskii, Y.P. Svirko // *Plasmonics*. – 2016. – Vol. 11, № 2. – P. 581–585.
8. Цепочки связанных микрорезонаторов в интегральной оптике / А.И. Маймистов, И.А. Пшеничнюк, С.С. Косолюбов, В.П. Драчев // *Прикладная Фотоника*. – 2020. – Vol. 7, № 2. – P. 6–72.
9. Sumetsky M.A SNAP coupled microresonator delay line // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, № 13. – P. 15268–15279.

10. Totsuka K., Kobayashi N., Tomita M. Slow light in coupled-resonator-induced transparency // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol. 98, № 21. – P. 1–4.

11. Coupling whispering-gallery-mode microcavities with modal coupling mechanism / Y. Xiao, B. Min, X. Jiang [et al.] // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2008. – Vol. 44, № 11. – P. 1065–1070.

12. Microbubble-probe WGM resonators enable displacement measurements with high spatial resolution / B. Liu, S. Liu, Q. Zhang [et al.] // *Optics Letters*. – 2023. – Vol. 48, № 7. – P. 1922–1925.

13. Billion Q-factor in silicon WGM resonators / A.E. Shitikov, I.A. Bilenko, N.M. Kondratiev [et al.] // *Optica*. – 2018. – Vol. 5, № 12. – P. 1525–1528.

14. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper. / J.C. Knight, G. Cheung, F. Jacques, T.A. Birks // *Optics letters*. – 1997. – Vol. 22, № 15. – P. 1129–1131.

15. Gorodetsky M.L., Pryamikov A.D., Ilchenko V.S. Rayleigh scattering in high-Q microspheres // *Journal of Optical Society of America B*. – 2000. – Vol. 17, № 6. – P. 1051–1057.

16. Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. Optical microsphere resonators: optimal coupling to high-Q whispering-gallery modes // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1999. – Vol. 16, № 1. – P. 147.

17. Chirped fiber grating beamformer for linear phased array antenna / S.I. Ivanov, A.P. Lavrov, I.I. Saenko, D.L. Filatov // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, Cham, 2018. – P. 594–604.

References

1. Ilchenko V.S., Matsko A.B. Optical resonators with whispering-gallery modes-part II: applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 15-32.

2. Khurgin J.B. Slow light in various media: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 287-318.

3. Krauss T.F. Why do we need slow light? *Nature Photonics*, 2008, vol. 2, no. 8, pp. 448-450.

4. Thévenaz L. Slow and fast light in optical fibres. *Nature Photonics*, 2008, vol. 2, no. 8, pp. 474-481.

5. Zhao Y., Qin C., Wang Q. Principles of structural slow light and its applications for optical fiber sensors: a review. *Instrumentation Science & Technology*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 72-94.

6. Sokolov I.M. Electro-optical effects in dense and cold atomic gases. *Physical Review A*, 2018, vol. 98, no. 1, p. 013412.
7. Shustova O.V., Zhurikhina V.V., Lipovskii A.A., Svirko Y.P. Control of glass–metal composite optical nonlinearity via nanostructuring. *Plasmonics*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 581-585.
8. Majmistov A.I., Pshenichnjuk I.A., Kosolobov S.S., Drachev V.P. Cepochki svjazannyh mикрорезонаторov v integral'noj optike [Chains of coupled microcavities in integrated optics]. *Applied Photonics*, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 6-72.
9. Sumetsky M. A SNAP coupled microresonator delay line. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 13, pp. 15268-15279.
10. Totsuka K., Kobayashi N., Tomita M. Slow light in coupled-resonator-induced transparency. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 98, no. 21, pp. 1-4.
11. Xiao Y., Min B., Jiang X. et al. Coupling whispering-gallery-mode microcavities with modal coupling mechanism. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, vol. 44, no. 11, pp. 1065-1070.
12. Liu B., Liu S., Zhang Q. et al. Microbubble-probe WGM resonators enable displacement measurements with high spatial resolution. *Optics Letters*, 2023, vol. 48, no. 7, pp. 1922-1925.
13. Shitikov A.E., Bilenko I.A., Kondratiev N.M. et al. Billion Q-factor in silicon WGM resonators. *Optica*, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 1525-1528.
14. Knight J.C., Cheung G., Jacques F., Birks T.A. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper. *Optics letters*, 1997, vol. 22, no. 15, pp. 1129-1131.
15. Gorodetsky M.L., Pryamikov A.D., Ilchenko V.S. Rayleigh scattering in high-Q microspheres. *Journal of Optical Society of America B*, 2000, vol. 17, no. 6, pp. 1051-1057.
16. Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. Optical microsphere resonators: optimal coupling to high-Q whispering-gallery modes. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, vol. 16, no. 1, p. 147.
17. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I., Filatov D.L. Chirped fiber grating beamformer for linear phased array antenna. Lecture Notes in Computer Science. *Springer, Cham*, 2018, pp. 594-604.

Сведения об авторах

УШАКОВ Н.А.

e-mail: *n.ushakoff@spbstu.ru*

Кандидат физико-математических наук, доцент высшей школы прикладной физики и космических технологий ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

МАРКВАРТ А.А.

e-mail: *markvart_aa@spbstu.ru*

Кандидат физико-математических наук, доцент высшей школы прикладной физики и космических технологий ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

ПЕТРОВ А.В.

e-mail: *petrov.av1@spbstu.ru*

Кандидат физико-математических наук, доцент высшей школы прикладной физики и космических технологий ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

ЛИОКУМОВИЧ Л.Б.

e-mail: *leonid@spbstu.ru*

Доктор физико-математических наук, профессор высшей школы прикладной физики и космических технологий ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

About the authors

USHAKOV N.A.

e-mail: *n.ushakoff@spbstu.ru*

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, Higher School of Applied Physics and Space Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg.

MARKVART A.A.

e-mail: *markvart_aa@spbstu.ru*

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, Higher School of Applied Physics and Space Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg.

PETROV A.V.

e-mail: *petrov.av1@spbstu.ru*

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, Higher School of Applied Physics and Space Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg.

LIOKUMOVICH L.B.

e-mail: *leonid@spbstu.ru*

Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Higher School of Applied Physics and Space Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg.

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 25.09.2023

Одобрена: 29.09.2023

Принята к публикации: 30.09.2023

Financing. The work had no sponsorship.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 25/09 /2023

Approved: 29/09/2023

Accepted for publication: 30/09/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Теоретический анализ применения парных связанных кольцевых микрорезонаторов для управления оптическим излучением / Н.А. Ушаков, А.А. Маркварт, А.В. Петров, Л.Б. Лиокумович // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 78–91.

Please cite this article in English as: Ushakov N.A., Markvart A.A., Petrov A.V., Liokumovich L.B. Application of pairs of coupled microresonators for control of optical radiation: theoretical analysis // Applied photonics, 2023, no. 6, pp. 78-91.