

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ КОЛЬЦЕВОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

И.Н. Чуприна^{1,2}, А.А. Калачёв^{1,2}¹ Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия,² Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, Казань, Россия

Аннотация

Работа посвящена проблеме создания интегральных однофотонных источников на основе спонтанного четырёхволнового смешения в кольцевых микрорезонаторах. На примере резонатора из нитрида кремния рассчитана дисперсия групповой скорости в широком диапазоне длин волн для случая, когда кольцевой резонатор состоит из прямых и изогнутых участков, и показано, что для различных длин волн излучения накачки можно найти оптимальное соотношение высоты и ширины волновода, при котором достигается нулевая дисперсия групповой скорости при минимальной высоте резонатора. Такие волноводы, обеспечивающие нулевую дисперсию и обладающие минимальной высотой, являются оптимальными для создания кольцевых микрорезонаторов, позволяющих генерировать однофотонные состояния в режиме невырожденного спонтанного четырёхволнового смешения.

Ключевые слова: кольцевой микрорезонатор, спонтанное четырёхволновое смешение, однофотонный источник, групповая скорость.

Цитирование: Чуприна, И.Н. Оптимизация дисперсионных свойств кольцевого микрорезонатора / И.Н. Чуприна, А.А. Калачёв // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 155-159. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-155-159.

Введение

Одной из актуальных проблем современной квантовой оптики и информатики, решение которой необходимо для широкого внедрения квантовых криптографических сетей, реализации оптических квантовых компьютеров, а также для проведения поисковых исследований, является проблема создания эффективных источников однофотонных состояний света [1–4]. В частности, высококачественные однофотонные источники необходимы для реализации эффективных протоколов дальнедействующей квантовой связи, использующих квантовые повторители [5, 6]. Внедрение последних позволит преодолеть существующий предел радиуса действия квантовой сети (порядка 100 км) и создать в результате квантовый Интернет, обладающий безусловной стойкостью. Кроме того, такие источники необходимы для реализации аппаратно-независимой квантовой криптографии (см., например, [7]) и линейных оптических квантовых вычислений [8]. Перспективным подходом к решению проблемы является создание однофотонных источников на основе нелинейных оптических явлений с использованием интегральных оптических схем (фотонных чипов) [9, 10]. Миниатюризация источника позволит реализовать сложные оптические схемы с очень высокой стабильностью и низкими потерями, повысить скорость срабатывания оптических модуляторов и уменьшить потребляемую мощность. В настоящее время активно ведутся исследования процесса генерации однофотонных состояний в режиме спонтанного параметрического рассеяния [11–16] и спонтанного четырёхволнового смешения (СЧВС) [17–19] в нелинейных волноводах. Возможность объединения в одном чипе параметрического рассеяния и полупроводникового лазера накачки была недавно продемонстрирована в работе [20]. Более сложный вариант, подразумевающий объединение на одном чипе процессов генерации и детектирования однофотонных состояний, позволяет ре-

ализовать мультиплексирование нескольких источников [21]. Использование фотонных чипов даёт возможность, с одной стороны, добиться максимальной эффективности и детерминированности однофотонного источника с оповещением (*heralded single-photon source*), а с другой – создать эффективные источники многофотонных состояний. В целом, объединение на одном фотонном чипе генераторов и детекторов квантовых состояний света, а также линейных оптических элементов является необходимым этапом создания масштабируемых оптических квантовых компьютеров [22, 23] и актуальным направлением развития современной квантовой оптики [24].

В настоящей работе теоретически рассматриваются кольцевые микрорезонаторы из нитрида кремния, который является одним из самых перспективных материалов для реализации квантовых оптических интегральных схем [25], и определяются условия, позволяющие достичь нулевой дисперсии групповой скорости на длинах волн, соответствующих оптоволоконным каналам связи. Использование кольцевых микрорезонаторов [26], обладающих высокой добротностью и малым объёмом моды, позволяет достичь высокой эффективности однофотонных источников на основе СЧВС и существенным образом снизить мощность накачки, а также реализовать генерацию узкополосных фотонов, соответствующих полосе поглощения устройств квантовой памяти. Нулевая дисперсия групповой скорости позволяет реализовать невырожденный режим СЧВС, который необходим для разделения испускаемых фотонов по длине волны в процессе условного приготовления однофотонных состояний, а также для повышения детерминированности источника за счёт мультиплексирования. Целью настоящей работы является определение параметров кольцевых микрорезонаторов, при которых, с одной стороны, реализуется невырожденное СЧВС, а

с другой – достигается наименьшая высота волноводов, что облегчает задачу их изготовления.

Модель и основные уравнения

Основная задача настоящей работы состояла в компьютерном моделировании спектра СЧВС в кольцевом микрорезонаторе на основе нитрида кремния. Процесс СЧВС представляет собой результат взаимодействия излучения накачки с нелинейной средой, в ходе которого случайным образом уничтожаются два фотона в моде резонатора, которая соответствует полю накачки, и рождаются два фотона в других модах резонатора, соответствующих сигнальному и холостому полям. Расчёты выполнялись для кольцевого микрорезонатора с одним входом/выходом, который образуется за счёт связи резонатора с прямолинейным волноводом (шиной) посредством ближнего (эванесцентного) поля. Численные расчёты осуществлялись в пакете Lumerical. Дисперсионные свойства нитрида кремния описывались с помощью формулы Сельмейера из работы [27]:

$$n^2 = 1 + \frac{3,0249\lambda^2}{\lambda^2 - 135,3406^2} + \frac{40314\lambda^2}{\lambda^2 - 1239842^2} \quad (1)$$

Для того, чтобы в резонаторе наблюдалось невырожденное СЧВС, необходима эквидистантность спектра пропускания нелинейного резонатора. В противном случае нельзя реализовать тройной резонанс для сигнального, холостого полей и поля накачки. Поэтому необходимо найти такие параметры кольцевого микрорезонатора (ширина и высота волновода), при которых достигается наименьшая (в идеале нулевая) дисперсия групповой скорости на частоте рождающихся фотонов. При наличии ненулевой дисперсии разность соседних областей дисперсии (свободных спектральных зон) будет отлична от нуля и может оказаться больше ширины моды, что не позволит достичь тройного резонанса. В ходе работы для разных сечений волновода были рассчитаны зависимости эффективных показателей преломления n_{eff} для фундаментальной моды волновода от длины волны. Затем, по формуле

$$D = \frac{1}{c} \frac{\partial n_g}{\partial \lambda}, \quad n_g = n_{eff} - \lambda \frac{\partial n_{eff}(\lambda)}{\partial \lambda} \quad (2)$$

рассчитывалась дисперсия групповой скорости D . В общем случае кольцевой микрорезонатор состоит из двух изогнутых волноводов, имеющих форму полукольца, и двух прямолинейных волноводов, которые их соединяют. Важно отметить, что эффективные показатели преломления для прямолинейного и изогнутого волноводов отличаются друг от друга, так что общий эффективный показатель преломления для микрорезонатора рассчитывается путём усреднения вкладов от участков различной кривизны.

Основные результаты

В качестве примера рассмотрим кольцевой резонатор с двумя прямыми и двумя изогнутыми участками и возьмём радиус кривизны изогнутого участка 31 мкм, а длину прямого участка 80 мкм. На рис. 1

приведено пространственное распределение поля фундаментальной моды для прямолинейного и изогнутого волноводов, а на рис. 2 приведены значения дисперсии на длине волны 1,55 мкм для результирующего кольцевого резонатора.

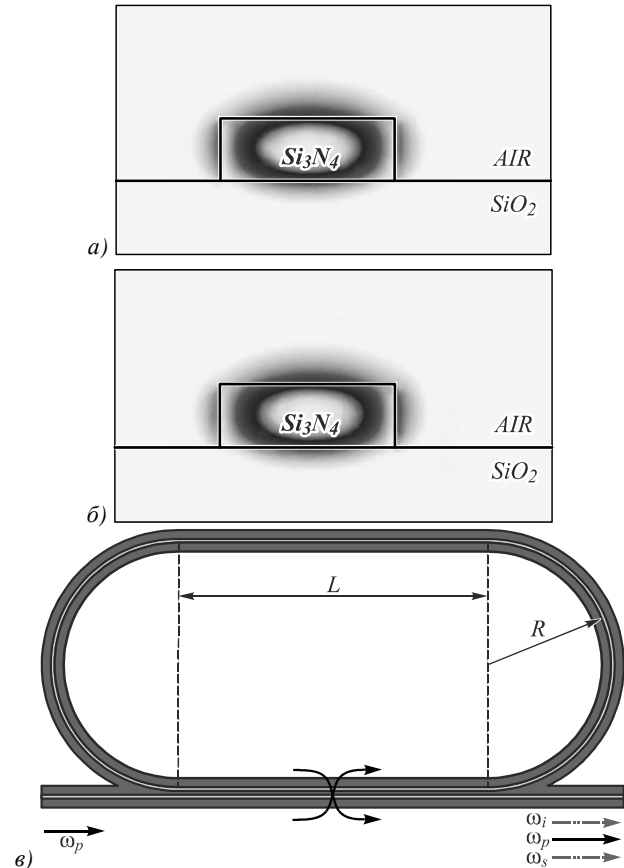


Рис. 1. Распределение интенсивности для фундаментальной моды на длине волны 1,55 мкм в случае прямого волновода (а) и изогнутого волновода с радиусом кривизны 31 мкм (б) (негативное изображение). В обоих случаях сечение 0,5×1,2 мкм. Общая схема кольцевого микрорезонатора (в)

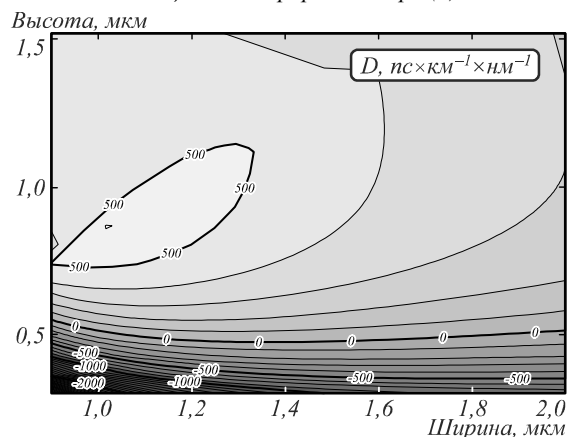


Рис. 2. Значение дисперсии для кольцевого резонатора, состоящего из двух изогнутых участков радиуса 31 мкм и двух прямых участков 80 мкм на длине волны 1,55 мкм. Изолинии нарисованы с шагом 100 пс/км/нм

На рис. 3 приведены изолинии нулевой дисперсии для различных длин волн накачек. Как видно из графи-

ка, при увеличении длины волны линия нулевой дисперсии смещается в область больших высот волновода. Кроме того, для каждой длины волны существует определённое соотношение высоты и ширины волновода, при котором нулевая дисперсия групповой скорости достигается с минимальной высотой.

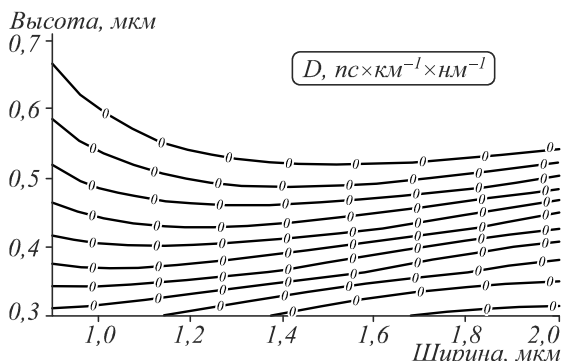


Рис. 3. Кривые нулевой дисперсии как функции ширины и высоты волновода на разных длинах волн. Верхняя линия соответствует нулевой дисперсии на длине волны 1,8 мкм.

Остальные линии отображают нулевую дисперсию на меньших длинах волн с шагом по длине волны 0,1 мкм

Поскольку изготовление полосковых резонаторов с большой высотой является трудной технологической задачей, реализация нулевой дисперсии при минимальной высоте является оптимальным решением при изготовлении кольцевых резонаторов. На основании проведённого расчёта выбрана геометрия волновода (0,5×1,05 мкм), соответствующая практически нулевой дисперсии на длине волны 1,55 мкм, когда разность соседних областей дисперсии получается гораздо меньше ширины на полувысоте моды резонатора. Этого достаточно для эффективного рождения фотонов в соседних от накачки модах резонатора. Пример спектра пропускания соответствующего кольцевого резонатора приведён на рис. 4.

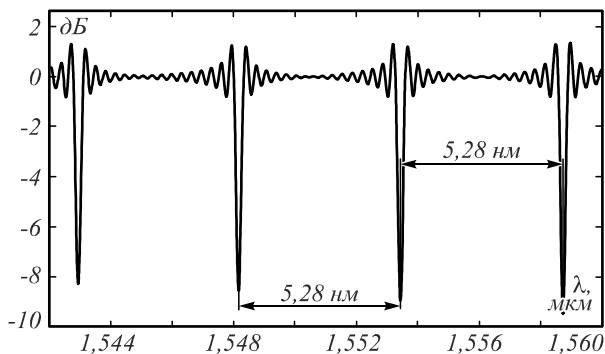


Рис. 4. Спектр пропускания кольцевого резонатора в случае сечения 0,5×1,05 мкм, радиуса изогнутых участков 31 мкм и длины прямых участков 80 мкм

Как видно из рис. 4, спектр получается близким к эквидистантному. Спектральная ширина моды резонатора может регулироваться зазором между волноводом для ввода/вывода излучения и кольцом. При уменьшении зазора коэффициент связи растёт и спектральная ширина мод увеличивается. Численные расчёты поз-

волили таким образом достичь значений резкости резонатора, которая равна отношению области дисперсии к спектральной ширине моды, порядка 50.

Заключение

В настоящей работе выполнена оптимизация параметров кольцевого микрорезонатора на основе нитрида кремния и показано, что для различных длин волн излучения накали можно найти оптимальное соотношение высоты и ширины волновода, при котором достигается нулевая дисперсия групповой скорости, позволяющая наблюдать невырожденное спонтанное четырёхволновое смешение при минимальной высоте резонатора. Демонстрация возможности нахождения минимальной высоты волновода, обеспечивающего нулевую дисперсию, представляет практический интерес, поскольку изготовление волноводов с большой высотой является сложной технологической задачей.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 16-12-00045).

Литература

1. **Eisaman, M.D.** Invited review article: Single-photon sources and detectors / M.D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S.V. Polyakov // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82, Issue 7. – 071101. – DOI: 10.1063/1.3610677.
2. **Chunnillall, C.J.** Metrology of single-photon sources and detectors: A review / C.J. Chunnillall, I.P. Degiovanni, S. Kück, I. Müller, A.G. Sinclair // Optical Engineering. – 2014. – Vol. 53, Issue 8. – 081910. – DOI: 10.1117/1.OE.53.8.081910.
3. **Takeuchi, S.** Recent progress in single-photon and entangled-photon generation and applications / S. Takeuchi // Japanese Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 53, Issue 3. – 030101. – DOI: 10.7567/JJAP.53.030101.
4. **Bertolotti, M.** Quantum state engineering. Generation of single and pairs of photons / M. Bertolotti, F. Bovino, C. Sibilina // Progress in Optics. – 2015. – Vol. 60. – P. 1-117. – DOI: 10.1016/bs.po.2015.02.001.
5. **Sangouard, N.** Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics / N. Sangouard, Ch. Simon, H. de Riedmatten, N. Gisin // Reviews of Modern Physics. – 2011. – Vol. 83, Issue 1. – P. 33-80. – DOI: 10.1103/RevModPhys.83.33.
6. **Munro, W.J.** Inside quantum repeaters / W.J. Munro, K. Azuma, K. Tamaki, K. Nemoto // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 21, Issue 3. – P. 78-90. – DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2392076.
7. **Sangouard, N.** What are single photons good for? / N. Sangouard, H. Zbinden // Journal of Modern Optics. – 2012. – Vol. 59, Issue 17. – P. 1458-1464. – DOI: 10.1080/09500340.2012.687500.
8. **Kok, P.** Linear optical quantum computing with photonic qubits / P. Kok, W.J. Munro, K. Nemoto, T.C. Ralph, J.P. Dowling, G.J. Milburn // Reviews of Modern Physics. – 2007. – Vol. 79, Issue 1. – P. 135-174. – DOI: 10.1103/RevModPhys.79.135.
9. **Tanzilli, S.** On the genesis and evolution of Integrated Quantum Optics / S. Tanzilli, A. Martin, F. Kaiser, M.P. De Micheli, O. Alibart, D.B. Ostrowsky // Laser & Photonics Reviews. – 2012. – Vol. 6, Issue 1. – P. 115-143. – DOI: 10.1002/lpor.201100010.
10. **Meany, T.** Laser written circuits for quantum photonics / T. Meany, M. Gräfe, R. Heilmann, A. Perez-Leija, S. Gross, M.J. Steel, M.J. Withford, A. Szameit // Laser & Photonics Reviews. – 2015. – Vol. 9, Issue 4. – P. 363-384. – DOI: 10.1002/lpor.201500061.

11. **Kaiser, F.** High-quality polarization entanglement state preparation and manipulation in standard telecommunication channels / F. Kaiser, A. Issautier, L.A. Ngah, O. Danila, H. Herrmann, W. Sohler, A. Martin, S. Tanzilli // *New Journal of Physics*. – 2012. – Vol. 14, Issue 8. – 085015. – DOI: 10.1088/1367-2630/14/8/085015.
12. **Karpiński, M.** Dispersion-based control of modal characteristics for parametric down-conversion in a multimode waveguide / M. Karpiński, C. Radzewicz, K. Banaszek // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37, Issue 5. – P. 878-880. – DOI: 10.1364/OL.37.000878.
13. **Solntsev, A.S.** Spontaneous parametric down-conversion and quantum walks in arrays of quadratic nonlinear waveguides / A.S. Solntsev, A.A. Sukhorukov, D.N. Neshev, Y.S. Kivshar // *Physical Review Letters*. – 2012. – Vol. 108, Issue 2. – 023601. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.023601.
14. **Krapick, S.** An efficient integrated two-color source for heralded single photons / S. Krapick, H. Herrmann, V. Quiring, B. Brecht, H. Suche, Ch. Silberhorn // *New Journal of Physics*. – 2013. – Vol. 15, Issue 3. – 033010. – DOI: 10.1088/1367-2630/15/3/033010.
15. **Solntsev, A.S.** Generation of nonclassical biphoton states through cascaded quantum walks on a nonlinear chip / A.S. Solntsev, F. Setzpfandt, A.S. Clark, Ch.W. Wu, M.J. Collins, Ch. Xiong, A. Schreiber, F. Katzschmann, F. Eilenberger, R. Schiek, W. Sohler, A. Mitchell, Ch. Silberhorn, B.J. Eggleton, T. Pertsch, A.A. Sukhorukov, D.N. Neshev, Yu.S. Kivshar // *Physical Review X*. – 2014. – Vol. 4, Issue 3. – 031007. – DOI: 10.1103/PhysRevX.4.031007.
16. **Kruse, R.** Dual-path source engineering in integrated quantum optics / R. Kruse, L. Sansoni, S. Brauner, R. Ricken, C.S. Hamilton, I. Jex, Ch. Silberhorn // *Physical Review A*. – 2015. – Vol. 92, Issue 5. – 053841. – DOI: 10.1103/PhysRevA.92.053841.
17. **Spring, J.B.** On-chip low loss heralded source of pure single photons / J.B. Spring, P.S. Salter, B.J. Metcalf, P.C. Humphreys, M. Moore, N. Thomas-Peter, M. Barbieri, X.-M. Jin, N.K. Langford, W.S. Kolthammer, M.J. Booth, I.A. Walmsley // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 11. – P. 13522-13532. – DOI: 10.1364/OE.21.013522.
18. **Kumar, R.** Controlling the spectrum of photons generated on a silicon nanophotonic chip / R. Kumar, J.R. Ong, M. Savanier, Sh. Mookherjea // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – 5489. – DOI: 10.1038/ncomms6489.
19. **Jiang, W.C.** Silicon-chip source of bright photon pairs / W.C. Jiang, X. Lu, J. Zhang, O. Painter, Q. Lin // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, № 16. – P. 20884-20904. – DOI: 10.1364/OE.23.020884.
20. **Boitier, F.** Electrically injected photon-pair source at room temperature / F. Boitier, A. Orioux, C. Autebert, A. Lemaître, E. Galopin, Ch. Manquest, C. Sirtori, I. Favero, G. Leo, S. Ducci // *Physical Review Letters*. – 2014. – Vol. 112, Issue 18. – 183901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.183901.
21. **Collins, M.J.** Integrated spatial multiplexing of heralded single-photon sources / M.J. Collins, C. Xiong, I.H. Rey, T.D. Vo, J. He, S. Shahnian, C. Reardon, T.F. Krauss, M.J. Steel, A.S. Clark, B.J. Eggleton // *Nature Communications*. – 2013. – Vol. 4. – 2582. – DOI: 10.1038/ncomms3582.
22. **O'Brien, J.L.** Photonic quantum technologies / J.L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vučković // *Nature Photonics*. – 2009. – Vol. 3(12). – P. 687-695. – DOI: 10.1038/nphoton.2009.229.
23. **Ladd, T.D.** Quantum computers / T.D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, J.L. O'Brien // *Nature*. – 2010. – Vol. 464, Issue 7285. – P. 45-53. – DOI: 10.1038/nature08812.
24. **Walmsley, I.A.** Quantum optics: Science and technology in a new light / I.A. Walmsley // *Science*. – 2015. – Vol. 348, Issue 6234. – P. 525-530. – DOI: 10.1126/science.aab0097.
25. **Moss, D.J.** New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics / D.J. Moss, R. Morandotti, A.L. Gaeta, M. Lipson // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7, Issue 8. – P. 597-607. – DOI: 10.1038/nphoton.2013.183.
26. **Rabus, D.G.** Integrated Ring Resonators / D.G. Rabus. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – 258 p. – ISBN: 978-3-540-68786-3.
27. **Luke, K.** Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si₃N₄ microresonator / K. Luke, Y. Okawachi, M.R.E. Lamont, A.L. Gaeta, M. Lipson // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 21. – P. 4823-4826. – DOI: 10.1364/OL.40.004823.

Сведения об авторах

Чуприна Илья Николаевич, 1995 года рождения, студент Казанского (Приволжского) федерального университета. Область научных интересов: квантовая и интегральная оптика. E-mail: ilya.chuprina@gmail.com.

Калачёв Алексей Алексеевич, 1969 года рождения, д.ф.-м.н., врио директора Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН. Область научных интересов: квантовая и нелинейная оптика, взаимодействие излучения с веществом, квантовая информатика. E-mail: a.a.kalachev@mail.ru.

ГРНТИ: 29.31.21.

Поступила в редакцию – 20 января 2017 г. Окончательный вариант – 7 марта 2017 г.

OPTIMIZING THE DISPERSION PROPERTIES OF A RING MICRORESONATOR

I.N. Chuprina^{1,2}, A.A. Kalachev^{1,2}

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia,

²Zavoisky Physical-Technical Institute of RAS, Kazan, Russia

Abstract

The work is devoted to the problem of developing integrated single-photon sources based on spontaneous four-wave mixing in ring microresonators. Considering the silicon nitride microresonator as an example, we calculate the group velocity dispersion in a wide wavelength range for the case when the ring resonator is composed of straight and curved sections, and show that for different pump wavelengths it is possible to find an optimal ratio of the height and width of the waveguide, thereby achieving zero group velocity dispersion at a minimum height. Such waveguides, which provide zero dispersion and have a minimum height, are optimal for creating ring microresonators that generate single-photon states via non-degenerate spontaneous four-wave mixing.

Keywords: ring microresonator, spontaneous four wave-mixing, single-photon sources, group velocity.

Citation: Chuprina IN, Kalachev AA. Optimizing the dispersion properties of a ring microresonator. *Computer Optics* 2017; 41(2): 155-159. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-155-159.

Acknowledgements: The work was partially funded by Russian Science Foundation (project No. 16-12-00045).

References

- [1] Eisaman MD, Fan J, Migdall A, Polyakov SV. Invited review article: Single-photon sources and detectors. *Review of Scientific Instruments* 2011; 82(7): 071101. DOI: 10.1063/1.3610677.
- [2] Chunnillal CJ, Degiovanni IP, Kück S, Müller I, Sinclair AG. Metrology of single-photon sources and detectors: A review. *Opt Eng* 2014; 53(8): 081910. DOI: 10.1117/1.OE.53.8.081910.
- [3] Takeuchi S. Recent progress in single-photon and entangled-photon generation and applications. *Japanese Journal of Applied Physics* 2014; 53(3): 030101. DOI: 10.7567/JJAP.53.030101.
- [4] Bertolotti M, Bovino F, Sibilica C. Quantum state engineering. Generation of single and pairs of photons. *Progress in Optics* 2015; 60: 1-117. DOI: 10.1016/bs.po.2015.02.001.
- [5] Sangouard N, Simon Ch, de Riedmatten H, Gisin N. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. *Rev Mod Phys* 2011; 83(1): 33-80. DOI: 10.1103/RevModPhys.83.33.
- [6] Munro WJ, Azuma K, Tamaki K, Nemoto K. Inside quantum repeaters. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2015; 21(3): 78-90. DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2392076.
- [7] Sangouard N, Zbinden H. What are single photons good for? *J Mod Opt* 2012; 59(17): 1458-1464. DOI: 10.1080/09500340.2012.687500.
- [8] Kok P, Munro WJ, Nemoto K, Ralph TC, Dowling JP, Milburn GJ. Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Rev Mod Phys* 2007; 79(1): 135-174. DOI: 10.1103/RevModPhys.79.135.
- [9] Tanzilli S, Martin A, Kaiser F, De Micheli MP, Alibart O, Ostrowsky DB. On the genesis and evolution of Integrated Quantum Optics. *Laser & Photonics Reviews* 2012; 6(1): 115-143. DOI: 10.1002/lpor.201100010.
- [10] Meany T, Gräfe M, Heilmann R, Perez-Leija A, Gross S, Steel MJ, Withford MJ, Szameit A. Laser written circuits for quantum photonics. *Laser & Photonics Reviews* 2015. 9(4): 363-384. DOI: 10.1002/lpor.201500061.
- [11] Kaiser F, Issautier A, Ngah LA, Danila O, Herrmann H, Sohler W, Martin A, Tanzilli S. High-quality polarization entanglement state preparation and manipulation in standard telecommunication channels. *New Journal of Physics* 2012; 14(8): 085015. DOI: 10.1088/1367-2630/14/8/085015.
- [12] Karpiński M, Radzewicz C, Banaszek K. Dispersion-based control of modal characteristics for parametric down-conversion in a multimode waveguide. *Opt Lett* 2012; 37(5): 878-880. DOI: 10.1364/OL.37.000878.
- [13] Solntsev AS, Sukhorukov AA, Neshev DN, Kivshar YS. Spontaneous parametric down-conversion and quantum walks in arrays of quadratic nonlinear waveguides. *Phys Rev Lett* 2012; 108(2): 023601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.023601.
- [14] Krapick S, Herrmann H, Quiring V, Brecht B, Suche H, Silberhorn Ch. An efficient integrated two-color source for heralded single photons. *New Journal of Physics* 2013; 15(3): 033010. DOI: 10.1088/1367-2630/15/3/033010.
- [15] Solntsev AS, Setzpfandt F, Clark AS, Wu ChW, Collins MJ, Xiong Ch, Schreiber A, Katschmann F, Eilenberger F, Schiek R, Sohler W, Mitchell A, Silberhorn Ch, Eggleton BJ, Pertsch T, Sukhorukov AA, Neshev DN, Kivshar YuS. Generation of nonclassical biphoton states through cascaded quantum walks on a nonlinear chip. *Phys Rev X* 2014; 4(3): 031007. DOI: 10.1103/PhysRevX.4.031007.
- [16] Kruse R, Sansoni L, Brauner S, Ricken R, Hamilton CS, Jex I, Silberhorn Ch. Dual-path source engineering in integrated quantum optics. *Phys Rev A* 2015; 92(5): 053841. DOI: 10.1103/PhysRevA.92.053841.
- [17] Spring JB, Salter PS, Metcalf BJ, Humphreys PC, Moore M, Thomas-Peter N, Barbieri M, Jin X-M, Langford NK, Kolthammer WS, Booth MJ, Walmsley IA. On-chip low loss heralded source of pure single photons. *Opt Express* 2013; 21(11): 13522-13532. DOI: 10.1364/OE.21.013522.
- [18] Kumar R, Ong JR, Savanier M, Mookherjeea Sh. Controlling the spectrum of photons generated on a silicon nanophotonic chip. *Nature Communications* 2014; 5: 5489. DOI: 10.1038/ncomms6489.
- [19] Jiang WC, Lu X, Zhang J, Painter O, Lin Q. Silicon-chip source of bright photon pairs. *Opt Express* 2015; 23(16): 20884-20904. DOI: 10.1364/OE.23.020884.
- [20] Boitier F, Orioux A, Autebert C, Lemaître A, Galopin E, Manquest Ch, Sirtori C, Favero I, Leo G, Ducci S. Electrically injected photon-pair source at room temperature. *Phys Rev Lett* 2014; 112(18): 183901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.183901.
- [21] Collins MJ, Xiong C, Rey IH, Vo TD, He J, Shahnia S, Reardon C, Krauss TF, Steel MJ, Clark AS, Eggleton BJ. Integrated spatial multiplexing of heralded single-photon sources. *Nature Communications* 2013; 4: 2582. DOI: 10.1038/ncomms3582.
- [22] O'Brien JL, Furusawa A, Vučković J. Photonic quantum technologies. *Nature Photonics* 2009; 3(12): 687-695. DOI: 10.1038/nphoton.2009.229.
- [23] Ladd TD, Jelezko F, Laflamme R, Nakamura Y, Monroe C, O'Brien JL. Quantum computers. *Nature* 2010; 464(7285): 45-53. DOI: 10.1038/nature08812.
- [24] Walmsley IA. Quantum optics: Science and technology in a new light. *Science* 2015; 348(6234): 525-530. DOI: 10.1126/science.aab0097.
- [25] Moss DJ, Morandotti R, Gaeta AL, Lipson M. New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics. *Nature Photonics* 2013; 7(8): 597-607. DOI: 10.1038/nphoton.2013.183.
- [26] Rabus DG. *Integrated Ring Resonators*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007. ISBN: 978-3-540-68786-3.
- [27] Luke K, Okawachi Y, Lamont MRE, Gaeta AL, Lipson M. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si₃N₄ microresonator. *Opt Lett* 2015; 40(21): 4823-4826. DOI: 10.1364/OL.40.004823.

Authors' information

Ilya Nikolaevich Chuprina (b. 1995) student of Kazan Federal University Institute of Physics. He works as lab research assistant at Zavoisky Physical-Technical Institute. Research interests are quantum optics and integrated optics. E-mail: ilya.chuprina@gmail.com.

Alexey Alexeevich Kalachev (b. 1969), Doctor of science, director of E.K. Zavoisky Kazan Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russia Academy of Science. Research interests: quantum and nonlinear optics, light-matter interaction, quantum information. E-mail: a.a.kalachev@mail.ru.

Received January 20, 2017. The final version – March 7, 2017.