

- network traffic. *Problems of Information Transmission*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 63–70. DOI: 10.1134/S0032946023010064
4. Lichtzinder B.Ya., Moiseev V.I. Group Poisson and Hyperpoisson models of packet traffic. *I-methods*, 2022, vol. 14, no. 3. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49871213_30704781.pdf (accessed: 26.04.2024). (In Russ.)
 5. Likhttsinder B.Ya., Bakai Yu.O. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 28, № 3 (67), pp. 75–89.
 6. Likhttsinder B.Ya. Interval characteristics of group poisson models of telecommunication systems traffic. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 302–311. (In Russ.)
 7. Likhttsinder B.Ya. *Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)*. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2018, 290 p. (In Russ.)
 8. Blatov I.A., Likhttsinder B.Ya. About limit values queue lengths in queuing systems with burst flows. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 181–187. (In Russ.)
 9. Privalov A.Y., Likhttsinder B.Ya. Interval traffic analysis of multichannel queuing systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 56–69. (In Russ.)
 10. Likhttsinder B.Ya. Features of multi-channel processing of batch traffic. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*, 2017, vol. 11, no. 11, pp. 30–33. (In Russ.)

Received 08.05.2024

ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.39

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОД ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ МИКРОКОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Бакирова Л.И., Воронков Г.С., Любопытов В.С., Степанов И.В., Кутдуйров Р.В.,

Грахова Е.П., Багманов В.Х.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ

E-mail: bakirova.li@ugatu.su

Световые пучки с орбитальным угловым моментом, обладают уникальными свойствами, которые делают их ценными для исследований и практического применения. От революции в технологиях связи до передовой микроскопии и возможностей квантовых вычислений – эти лучи продолжают стимулировать инновации и открывать новые горизонты в оптике и фотонике. В данной работе исследуется зависимость мощности потока излучения оптического вихревого пучка от геометрии излучающей структуры. В качестве излучателя оптического вихревого пучка используется микрокольцевой резонатор с периодической структурой. В нашем исследовании оптимизация ширины кольцевого волновода приводит к увеличению мощности потока излучения до 30% для резонансной длины волны 1563 нм. Чтобы проанализировать, как моды шепчущей галереи распределяются в поперечном сечении кольцевого волновода, мы увеличили ширину последнего с 400 нм до 500 нм. Предложенный подход может быть применен к излучающим микрокольцевым резонаторам в различных приложениях.

Ключевые слова: оптический вихревой пучок, микрокольцевой резонатор, моды шепчущей галереи, орбитальный угловой момент, фотонная интегральная схема

Введение

Микрокольцевые резонаторы (МКР) являются одним из наиболее важных и незаменимых элементов при разработке фотонных интегральных схем (ФИС) [1]. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами, таких как высокая

добротность, малая занимаемая площадь, высокая эффективность и гибкость манипулирования светом, а также возможность использования в сенсорных системах [2–4]. МКР может быть использован в качестве биосенсоров для медицинской диагностики, электрооптических модуляторов, для применения в нелинейной и квантовой фотонике и

т.д. [5]. Более того, МКР нашел свое применение и в области генерации структурированных лучей. В частности, это относительно простая и эффективная структура для излучения и детектирования световых пучков, несущих орбитальный угловой момент (ОУМ), и также называемых оптически-вихревыми пучками [6; 7]. Такие МКР, специально разработанные для работы с ФИС вне плоскости, способны генерировать вихревые пучки над устройством в свободном пространстве (out-of-plane) [8]. Кроме того, МКР на основе ФИС, благодаря своей компактности, могут заменить традиционные спиральные фазовые пластины и пространственные модуляторы света при генерации ОУМ в маломодовых волокнах [9].

Излучающий МКР представляет собой кольцевой волновод с элементами решетки для излучения вихревого пучка. В одном из фундаментальных исследований был предложен компактный интегральный излучатель ОУМ на основе МКР с угловыми решетками [10]. Полное внутреннее отражение света в кольцевом волноводе МКР вызывает появление мод шепчущей галереи (МШГ), что приводит к излучению вихревого пучка [11]. МШГ – это тип волн, которые могут распространяться вдоль искривленных поверхностей [12]. В работе [10], авторы используют угловую решетку, нанесенную на внутреннюю поверхность кольца, для направления вихревых пучков в свободное пространство. Световая волна рассеивается элементами решетки, и энергия частично отклоняется в направлении, где наблюдается конструктивная интерференция. Поскольку волновод изогнут в форме круга и поддерживает МШГ, то, согласно принципу Гюйгенса, волновой фронт излучаемого света должен отклоняться в азимутальном направлении ϕ и представлять собой спираль. Именно поэтому, такой пучок будет переносить ОУМ.

Преимущества использования МКР для излучения вихревых пучков были показаны во многих исследованиях [10; 13; 14]. МКР компактны и просты в изготовлении, в частности, на кремниевых фотонных платформах, что обеспечивает простое и экономически эффективное решение для интегрированных оптических систем [15]. Однако, при распространении вихревого пучка в свободном пространстве важно получить минимально возможный угол расходимости [16] и максимальную мощность потока излучения. В данной работе предлагается рассмотреть эффективность излучения МКР, предназначенного для генерации оптических вихревых пучков.

Оптимизация и моделирование излучателя

В нашей предыдущей работе [17] мы предложили алгоритм оптимизации излучающего МКР на основе условия критической связи. Ширина кольцевого волновода в этом случае была равна λ . Такие резонаторы на основе кольцевого волновода способны пропускать свет с определенным порядком ОУМ. Однако, для обеспечения эффективного удержания света и контроля излучения необходимо тщательно продумать ширину волновода. Увеличивая ширину кольцевого волновода, можно настроить моды резонатора таким образом, чтобы они оставались в пределах волновода и при этом обеспечивали контролируемое излучение [18]. На рисунках 1, 2 показано поперечное сечение кольцевого волновода при различной ширине от 400 нм до 500 нм. Моделирование проводилось в программе Ansys Lumerical MODE, которая позволяет анализировать направляющие структуры. Можно заметить, что при ширине кольцевого волновода 400 нм МШГ выходят с боковых сторон кольца, а при увеличении ширины до 500 нм достигается минимизация потерь.

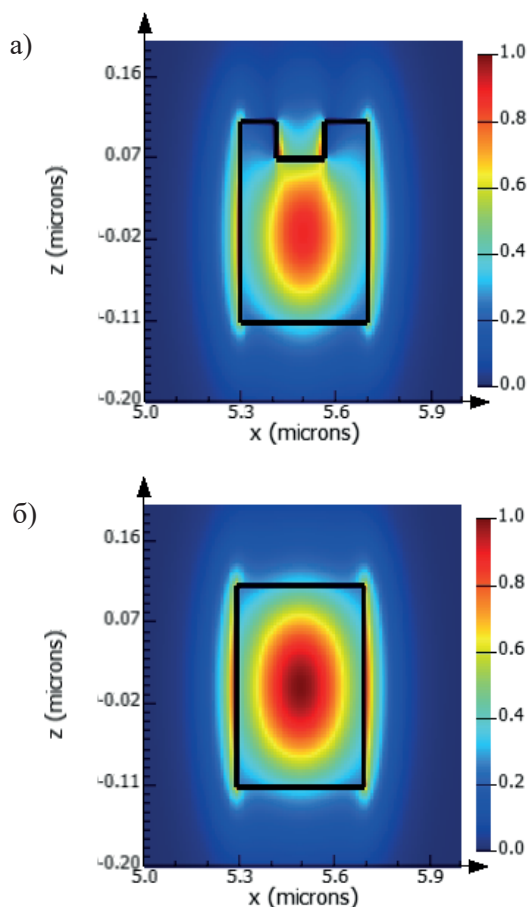


Рисунок 1. Распределение мощности в кольцевом волноводе шириной 400 нм: а) в центре отверстия; б) между отверстиями.

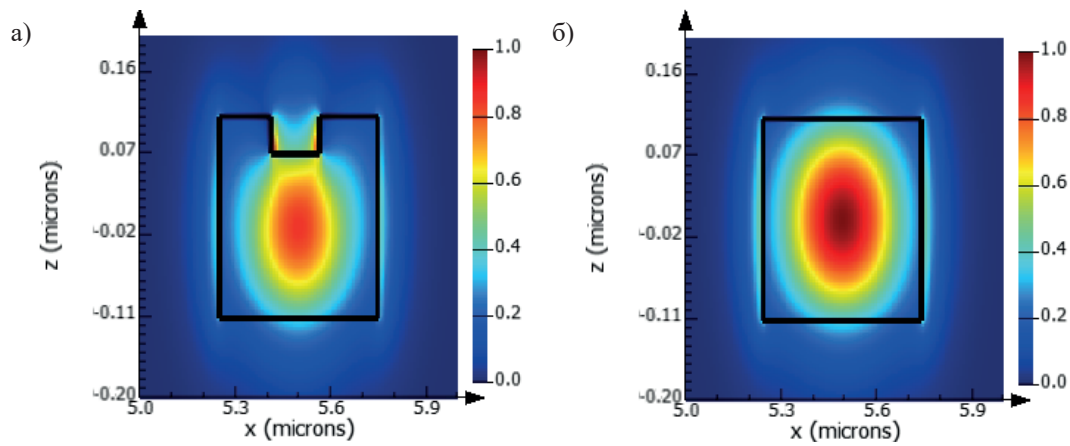


Рисунок 2. Распределение мощности в кольцевом волноводе шириной 500 нм:
а) в центре отверстия; б) между отверстиями.

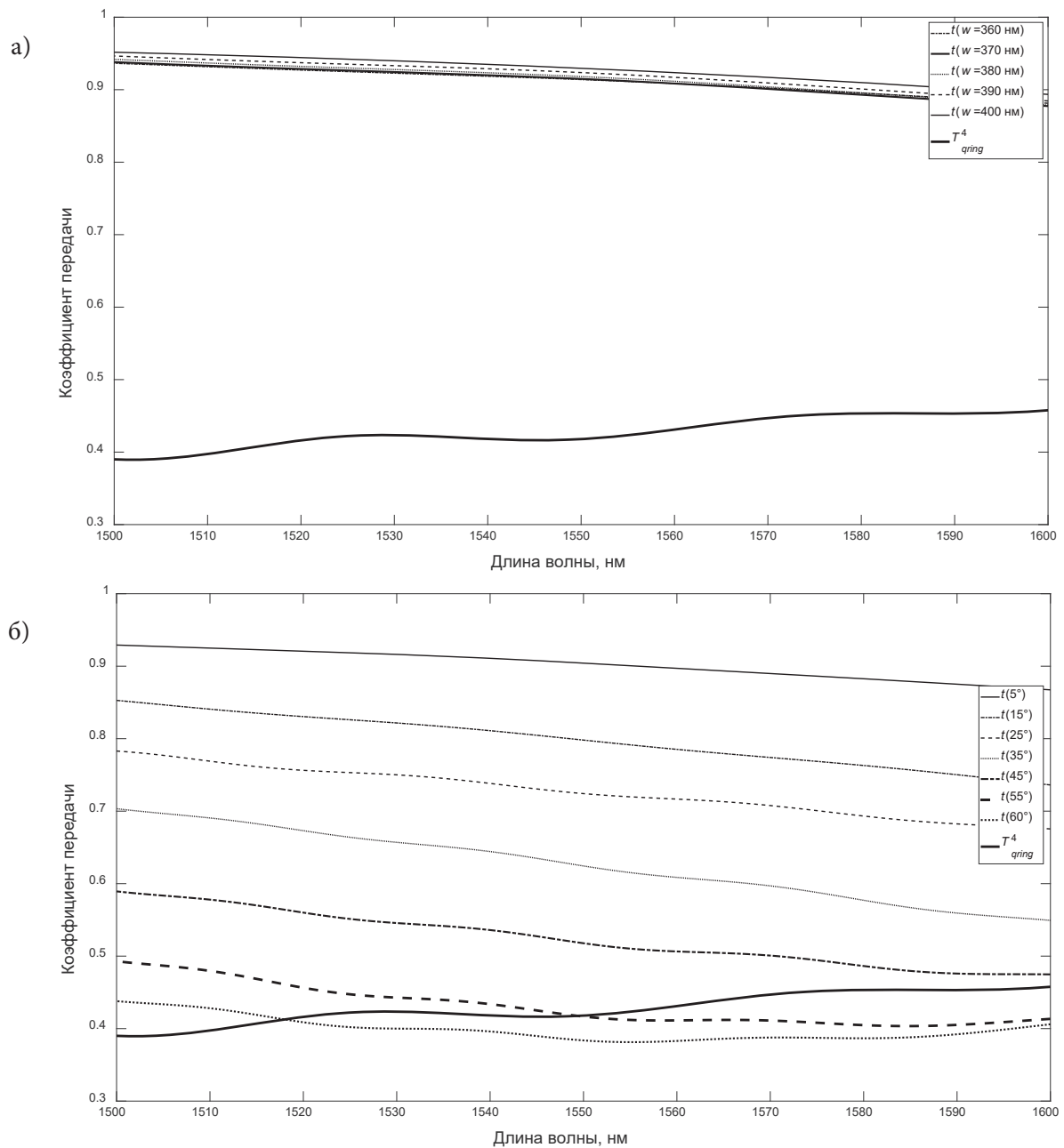


Рисунок 3. Изменение коэффициента передачи для МКР_2 в зависимости от: а) ширины подводящего волновода; б) угла изгиба подводящего волновода.

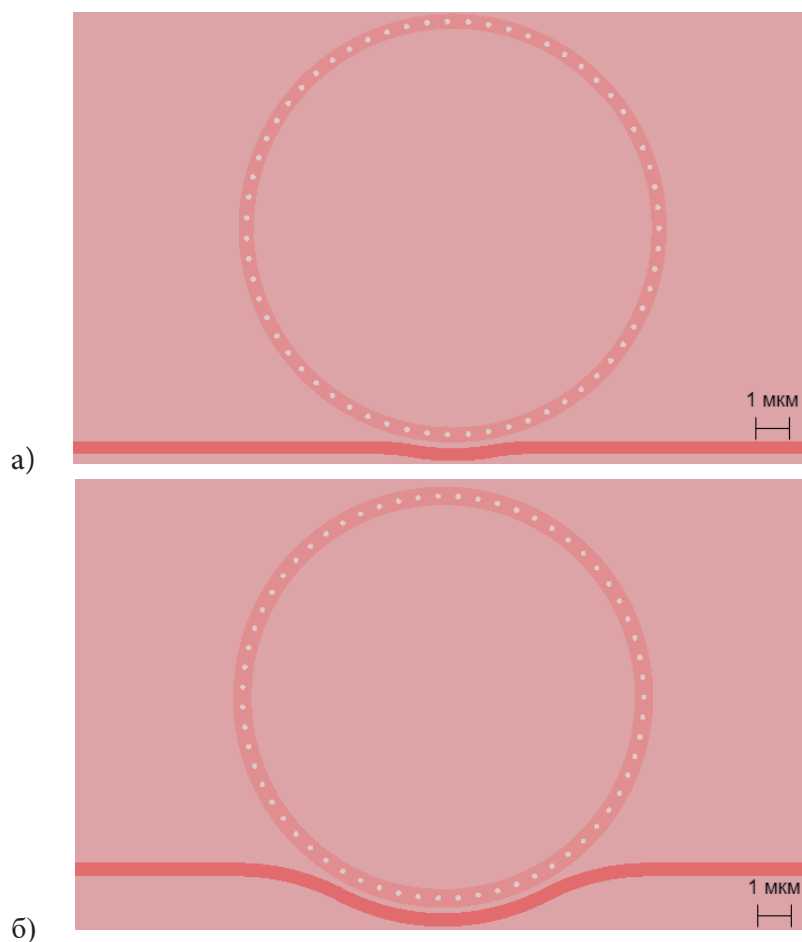


Рисунок 4. Вид сверху: а) МКР_1; б) МКР_2

В работе [17], мы оптимизировали параметры излучающего МКР с шириной кольцевого волновода 400 нм следующим образом: ширина подводящего волновода $w_{feed_wvg} = 340$ нм, угол изгиба подводящего волновода в схеме «pulley-coupling» $\theta = 20^\circ$ [19] (обозначим его МКР_1). Далее, используя тот же алгоритм, мы оптимизировали МКР_2 при ширине кольцевого волновода 500 нм. Для определения величины потерь во всем кольцевом волноводе A_{ring} была использована методика, описанная в работе [4]. Чтобы определить амплитудный коэффициент передачи кольцевого волновода T_{ring} мы моделируем $1/4$ часть кольца T_{qring} , а затем полученное значение возводим в четвертую степень.

Таким образом, условие критической связи для излучателя ОУМ может быть выражено как:

$$t = T_{qring}^4$$

где t – амплитудный коэффициент передачи на сквозном порту направленного ответвителя МКР.

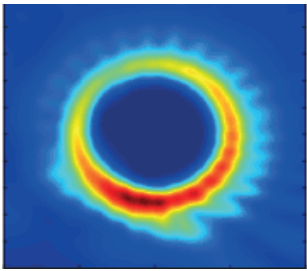
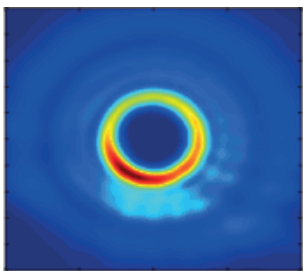
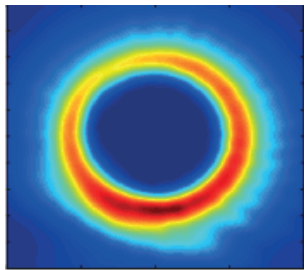
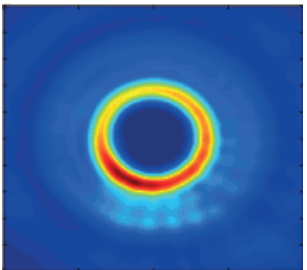
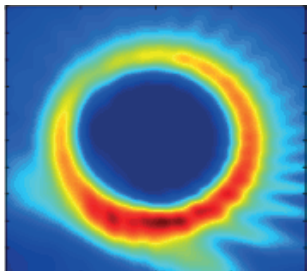
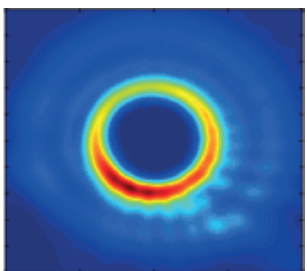
Мы получили следующие оптимизированные геометрические параметры для МКР_2, (рисунок 3): ширина подводящего волновода $w_{feed_wvg} = 370$ нм, угол изгиба подводящего волновода $\theta = 55^\circ$. Зазор

между кольцевым и подводящим волноводами был выбран $gap = 150$ нм (дальнейшее уменьшение зазора было бы сопряжено с технологическими сложностями при его изготовлении). Остальные параметры приведены в таблице 1, а вид сверху МКР_1 и МКР_2 показан на рисунке 4.

Таблица 1. Параметры МКР_1 и МКР_2

Наименование параметра	Значение	
	МКР_1	МКР_2
Ширина подводящего волновода	340 нм	370 нм
Угол подводящего волновода	20°	55°
Ширина кольцевого волновода	400 нм	500 нм
Радиус кольца (средний)	5,5 мкм	
Количество отверстий	63	
Глубина отверстий	70 нм	
Диаметр отверстий	150 нм	
Высота кольцевого волновода (Si)	220 нм	
Толщина SiO ₂	5 мкм	
Толщина подложки (Si)	2 мкм	

Таблица 2. Распределение интенсивности в зависимости от ширины кольцевого волновода

1) Длина волны, нм 2) Мощность потока излучения (а.е.) 3) Порядок ОУМ	Распределение интенсивности на расстоянии 5 мкм (МКР_1)	1) Длина волны, нм 2) Мощность потока излучения (а.е.) 3) Порядок ОУМ	Распределение интенсивности на расстоянии 5 мкм (МКР_2)
1529,64 33,06 13		1529,25 40,43 8	
1545,99 33,78 14		1546,39 38,903 9	
1562,7 25,11 15		1563,93 36,919 10	

Мы рассчитали мощность потока излучения для различных резонансных длин волн в оптимизированном МКР с помощью метода конечных разностей во времени (Finite Difference Time Domain, FDTD) в программе Ansys Lumerical 2020 R2.4. Результаты представлены в таблице 2.

Видно, что при ширине кольцевого волновода 400 нм пучок, переносящий ОУМ, расходится очень быстро. При ширине кольцевого волновода 500 нм мы уменьшили выход энергии с боковых сторон кольцевого волновода, направив луч вертикально вверх. В работе [20] авторы предлагают интегрировать металлические зеркала под кремниевую пленку для повышения эффективности оптической мощности. Чтобы минимизировать угол расхождения и повысить эффективность излучения оптического вихревого пучка, в исследовании используется отражающий элемент. Он отражает распространяющиеся компоненты, излучаемые на подложку, обратно в воздух. Отраженный луч далее интерферирует с исходным лучом, формируя вихревой пучок с высокой эффективностью. В нашей работе мы рассмотрели возможность увеличения

мощности потока излучения и уменьшения угла расходимости за счет оптимизации геометрических параметров кольца.

Заключение

Мы исследовали влияние ширины кольцевого волновода на распространение мод шепчущей галереи, что, в свою очередь, влияет на мощность выходного излучения пучка. Результаты показали, что такой подход приводит к значительному увеличению мощности потока излучения, причем в ближней зоне до 30%. При этом ширина кольцевого волновода была изменена с 400 нм до 500 нм, чтобы повлиять на распределение мод шепчущей галереи в поперечном сечении волновода. Это демонстрирует потенциал предложенного метода для эффективного управления плотностью потока мощности. Такие результаты свидетельствуют о том, что метод может быть полезен в приложениях, требующих точного контроля и увеличения плотности потока мощности, например, при освещении и высокоточном зондировании с использованием микрополостей с модами шепчущей галереи.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для Уфимского университета науки и технологий (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского научно-образовательного центра «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Литература

1. Silicon photonic microring resonators: a comprehensive design-space exploration and optimization under fabrication-process variations / A. Mirza [et al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2022. Vol. 41, no. 10. P. 3359–3372.
2. Silicon photonic micro-ring resonators for chemical and biological sensing: a tutorial / P. Steglich [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22, no. 11. P. 10089–10105.
3. Fallahi V., Kordrostami Z., Hosseini M. Sensitivity and quality factor improvement of photonic crystal sensors by geometrical optimization of waveguides and micro-ring resonators combination // Scientific Reports. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 2001.
4. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry / G. Voronkov [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 23. P. 9553.
5. Bawankar Y.R., Singh A. Microring resonators based applications in silicon photonics – a review // 5th Conference on Information and Communication Technology (CICT). India, Kurnool, 2021. P. 1–6.
6. Design and modeling of a photonic integrated device for optical vortex generation in a silicon waveguide / R.V. Kutluyarov [et al.] // Computer optics. 2021. Vol. 45, no. 3. P. 324–330.
7. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams – a review / D.M. Fatkhiev [et al.] // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 15. P. 4988.
8. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with PN depletion diode / I.V. Stepanov [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 929.
9. Method for determination of the principal modes in a few-mode optical fiber using a multibranch DOE / V.S. Lyubopytov [et al.] // Computer Optics. 2014. Vol. 38, no. 4. P. 727–736.
10. Integrated compact optical vortex beam emitters / X. Cai [et al.] // Science. 2012. Vol. 338, no. 6105. P. 363–366.
11. Whispering gallery mode optical microresonators: structures and sensing applications / L. Cai [et al.] // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials. 2020. Vol. 217, no. 6. P. 1900825.
12. Lu X., McClung A., Srinivasan K. High-Q slow light and its localization in a photonic crystal microring // Nature Photonics. 2022. Vol. 16, no. 1. P. 66–71.
13. An InP-based vortex beam emitter with monolithically integrated laser / J. Zhang [et al.] // Nature Communications. 2018. Vol. 9, no 1. P. 2652.
14. Radially polarized orbital angular momentum beam emitter based on shallow-ridge silicon microring cavity / R. Li [et al.] // IEEE Photonics Journal. 2014. Vol. 6, no. 3. P. 1–10.
15. Jian Y.-H., Chow C.-W. Design and analysis of a compact micro-ring resonator signal emitter to reduce the uniformity-induced phase distortion and crosstalk in orbital angular momentum (OAM) division multiplexing // Optics Express. 2023. Vol. 31, no. 2. P. 810.
16. Generation of E-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle / H. Chung [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 8289.
17. Micro-ring resonator-based tunable vortex beam emitter / L.I. Bakirova [et al.] // Micromachines. 2023. Vol. 15, no. 1. P. 34.
18. Acharyya N., Kozyreff G. Large Q factor with very small whispering-gallery-mode resonators // Physical Review Applied. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 014060.
19. Orbital angular momentum vector modes (de) multiplexer based on multimode micro-ring / S. Li [et al.] // Optics Express. 2018. Vol. 26, no. 23. P. 29895.
20. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring / S. Li [et al.] // Optics Letters. 2018. Vol. 43, no. 6. P. 1319.

Получено 29.03.2024

Бакирова Ляйсан Ильшатовна, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ). 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 919 146-96-48. E-mail: bakirova.li@ugatu.su

Воронков Григорий Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем (ТС), старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 942-00-02. E-mail: voronkov.gs@ugatu.su

Любобытов Владимир Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 944-88-99. E-mail: lyubopytov.vs@ugatu.su

Степанов Иван Васильевич, инженер-исследователь НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 335-56-19. E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Кутлугаров Руслан Владимирович, к.т.н., доцент кафедры ТС, старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 967-00-06. E-mail: kutluyarov.rv@ugatu.su

Грахова Елизавета Павловна, к.т.н., доцент кафедры ТС, заведующая НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 917 352-23-53. E-mail: grakhova.ep@ugatu.su

Багманов Валерий Хусаинович, д.т.н., профессор кафедры ТС УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 903-352-71-90. E-mail: bagmanov.v@rambler.ru

OPTIMIZATION OF MODE PROPAGATION FOR AN EMBEDDED OF OPTICAL VORTEX BEAMS BASED ON A MICRO-RING RESONATOR

*Bakirova L.I., Voronkov G.S., Lyubopytov V.S., Stepanov I.V., Kutluyarov R.V.,
Grakhova E.P., Bagmanov V. Kh.
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation
E-mail: bakirova.li@ugatu.su*

Light beams with orbital angular momentum have unique properties that make them valuable for research and practical applications. From revolutionizing communication technologies to enabling advanced microscopy and quantum computing possibilities, these beams continue to drive innovation and open up new frontiers in optics and photonics. In this paper, the dependence of the radiation flux density of an optical vortex beam on the geometry of the emitting structure is investigated. A micro-ring resonator with periodic structures is used as an optical vortex beam emitter structure. In our study, optimizing the width of the ring waveguide leads to an increase in the radiation flux power up to 30% for the resonant wavelength of 1563 nm. To analyze how the whispering gallery modes are distributed in the cross section of the annular waveguide, we increased the annular waveguide width from 400 nm to 500 nm. This proposed approach can be applied to radiating micro-ring resonators in various applications.

Keywords: *optical vortex beam, micro-ring resonator, whispering gallery mode, orbital angular momentum, photonic integrated circuit*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.05

Bakirova Liaisan Ilshatovna, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Junior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices». Tel. +7 919 146-96-48. E-mail: bakirova.li@ugatu.su

Voronkov Grigory Sergeevich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 942-00-02. E-mail: voronkov.gs@ugatu.su

Lyubopytov Vladimir Sergeevich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 944-88-99. E-mail: lyubopytov.vs@ugatu.su

Stepanov Ivan Vasilievich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Research Engineer of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 335-56-19. E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Kutluyarov Ruslan Vladimirovich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 967-00-06. E-mail: kutluyarov.rv@ugatu.su

Grakhova Elizaveta Pavlovna, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Head of Research Laboratory of «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 917 352-23-53. E-mail: grakhova.ep@ugatu.su

Bagmanov Valery Khusainovich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Professor of Telecommunication Systems Department, Doctor of Technical Science. Tel. +7 903 352-71-90. E-mail: bagmanov.v@rambler.ru

References

1. Mirza A. et al. Silicon photonic microring resonators: a comprehensive design-space exploration and optimization under fabrication-process variations. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2022, vol. 41, no. 10, pp. 3359–3372.
2. Steglich P. et al. Silicon photonic micro-ring resonators for chemical and biological sensing: a tutorial. *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 11, pp. 10089–10105.
3. Fallahi V., Kordrostami Z., Hosseini M. Sensitivity and quality factor improvement of photonic crystal sensors by geometrical optimization of waveguides and micro-ring resonators combination. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 2001.
4. Voronkov G. et al. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 23, pp. 9553.
5. Bawankar Y.R., Singh A. Microring resonators based applications in silicon photonics – a review. *5th Conference on Information and Communication Technology (CICT)*. India, Kurnool, 2021, pp. 1–6.
6. Kutluyarov R.V. et al. Design and modeling of a photonic integrated device for optical vortex generation in a silicon waveguide. *Computer optics*, 2021, vol. 45, no.3, pp. 324–330.
7. Fatkhiev D.M. et al. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams – a review. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 15, pp. 4988.
8. Stepanov I.V. et al. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with PN depletion diode. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 929.
9. Lyubopytov V.S. et al. Method for determination of the principal modes in a few-mode optical fiber using a multibranch DOE. *Computer Optics*, 2014, vol. 38, no. 4, pp. 727–736.
10. Cai X. et al. Integrated compact optical vortex beam emitters. *Science*, 2012, vol. 338, no. 6105, pp. 363–366.
11. Cai L. et al. Whispering gallery mode optical microresonators: structures and sensing applications. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials*, 2020, vol. 217, no. 6, pp. 1900825.
12. Lu X., McClung A., Srinivasan K. High-Q slow light and its localization in a photonic crystal microring. *Nature Photonics*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 66–71.

13. Zhang J. et al. An InP-based vortex beam emitter with monolithically integrated laser. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, no 1, pp. 2652.
14. Li R. et al. Radially polarized orbital angular momentum beam emitter based on shallow-ridge silicon microring cavity. *IEEE Photonics Journal*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 1–10.
15. Jian Y.-H., Chow C.-W. Design and analysis of a compact micro-ring resonator signal emitter to reduce the uniformity-induced phase distortion and crosstalk in orbital angular momentum (OAM) division multiplexing. *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 810.
16. Chung H. et al. Generation of E-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 8289.
17. Bakirova L.I. et al. Micro-ring resonator-based tunable vortex beam emitter. *Micromachines*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 34.
18. Acharyya N., Kozyreff G. Large Q factor with very small whispering-gallery-mode resonators. *Physical Review Applied*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 014060.
19. Li S. et al. Orbital angular momentum vector modes (de)multiplexer based on multimode micro-ring. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 23, pp. 29895.
20. Li S. et al. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 1319.

Received 29.03.2024

УДК 535.21

ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СТРУКТУРЕ ВОЛН ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ, МИНИМАЛЬНО ИСКАЖАЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ ФИМД-СИГНАЛЫ

Виноградова И.Л.¹, Головина Е.Ю.²

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ

² Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного
технического университета в г. Салавате, Салават, РФ

E-mail: egolovina82@mail.ru

В статье исследуется задача построения абонентских разветвленных сетей xPON/MAN/RoF, на базе волоконно-оптических линиях передачи, с возможностью нереляционного управления. А именно – с передачей управляющей информации в составе абонентского сигнала. Предложено в качестве параметра, переносящего управляющую информацию, задействовать функцию изменения мгновенной длины волны оптического сигнала. Предложен способ моделирования таких сегментов, проанализирован характер функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала, выработаны рекомендации по включению световодов Erbium Doped Fiber Amplifier, и по методам подведения накачки к ним с точки зрения поддержания положительного chirпирования для информационно-управляющего сигнала с функцией изменения мгновенной длины волны. Предполагалось, что обеспечение положительного chirпирования позволит минимизировать искажения при передаче последнего. Сделан вывод о значительном влиянии разветвлений на функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала. Получены рекомендательные параметры сегментов для различной степени их разветвленности.

Ключевые слова: *Passive Optical Networks, Metropolitan Area Networks, Radio-over-Fiber; волоконно-оптическая линия передачи, Y-разветвители, Erbium Doped Fiber Amplifier, chirпирование*

Введение и постановка задачи

Развитие роботизированных систем, концепций «Интернета Вещей» (Internet of Things, IoT) и «Промышленного Интернета Вещей» (Industrial Internet of Things, IIoT) привело к увеличению процессов обмена информацией в сети. При этом рост последних обусловлен в основном взаимодействием не между людьми, или человеком и устройством, а между самими устройствами (автоматизированное управление беспилотной техни-

кой, и, в том числе, беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), компьютеризация и телеметрия подвижных объектов, и т.д.), что повышает требования к скорости обработки сигналов и сообщений в системах связи. Отсюда возрастает актуальность задачи расширения возможностей управления сигналом, так как согласно [1], в настоящее время одним из весомых факторов задержки является продолжительность выполнения именно операций управления $\tau_{упр}$.