

УДК 535.015

**А.А. Кондаков<sup>1</sup>, У.О. Салгаева<sup>2</sup>, С.С. Мушинский<sup>3</sup>, Е.Д. Вобликов<sup>3</sup>,  
Е.В. Моисеева<sup>4</sup>, Р.С. Пономарев<sup>2</sup>, В.П. Первадчук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>3</sup> Пермская научно-производственная приборостроительная компания,  
Пермь, Россия

<sup>4</sup> Университет Луисвилля, Луисвилл, США

## **ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА. ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Критическим параметром работы интегрально-оптического гироскопа (ИОГ) является температурная нестабильность его характеристик. Впервые выведены аналитические формулы для оценки погрешности измерения угловой скорости резонансного ИОГ, индуцированной изменением температуры, проведены оценки данной величины и проанализирована её зависимость от температуры. Оценки приведены для ИОГ на основе различных материалов:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SOI и InGaAsP/InP. Они позволят заложить в алгоритм обработки и управления ИОГ поправки для повышения точности измерения угловой скорости в условиях изменяющейся температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** интегральная оптика, гироскоп, температурная стабильность, термо-оптический эффект, коэффициент теплового расширения.

**A.A. Kondakov<sup>1</sup>, U.O. Salgaeva<sup>2</sup>, S.S. Mushinskii<sup>3</sup>, E.D. Voblikov<sup>3</sup>,  
E.V. Moiseeva<sup>4</sup>, R.S. Ponomarev<sup>2</sup>, V.P. Pervadchuk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm State University, Perm, Russian Federation

<sup>3</sup> Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company,  
Perm, Russian Federation

<sup>4</sup> University of Louisville, Louisville, USA

## **PROBLEMS OF REALIZATION OF INTEGRATED OPTICAL GYROSCOPE: TEMPERATURE STABILITY OF PERFORMANCE**

Critical parameter of integrated optical gyroscope (IOG) is the thermal instability of its characteristics. In this paper for the first time the analytical formulas are derived for evaluation of accuracy at the

angular velocity measurements with resonant IOG in the case of temperature changing. The analysis of measuring error and its behavior with temperature was carried out. Such analysis was done for IOG based on different materials: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SOI and InGaAsP/InP. The results allow insert in processing algorithm of IOG corrections to improve the accuracy of measurement of the angular velocity in case of changing the temperature.

**Keywords:** integrated optics, gyroscope, temperature stability, thermo-optic effect, thermal expansion coefficient.

Одним из перспективных направлений развития современного навигационного приборостроения является разработка интегрально-оптического гироскопа, обладающего существенными преимуществами как перед волоконно-оптическим (ВОГ) и кольцевым лазерным гироскопами (КЛГ) по массогабаритным характеристикам, так и по точностным характеристикам перед гироскопами, построенными на основе технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Точностные и массогабаритные характеристики гироскопов определяют область их применения (рис. 1). Интегрально-оптические гироскопы могут использоваться в робототехнике, медицинском приборостроении, автомеханике и навигационном приборостроении.

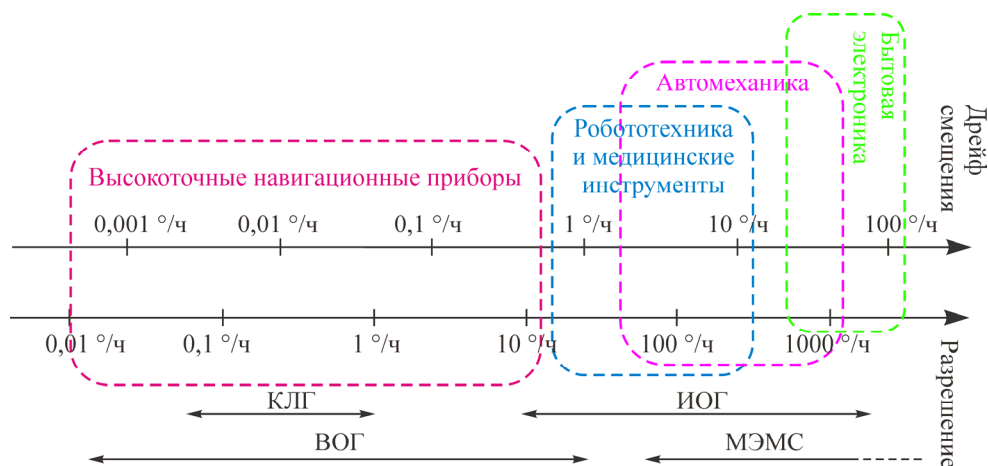


Рис. 1. Области применения и точностные характеристики гироскопов различных видов [1]

Чувствительным элементом ИОГ или интегрально-оптического датчика угловой скорости является оптический кольцевой резонатор, интегрированный на одной подложке с другими функциональными элементами, входящими в состав ИОГ. В зависимости от того, используется ли в конструкции ИОГ внешний источник оптического излуче-

ния или генерация излучения осуществляется в чувствительном элементе (кольцевом лазере), ИОГ подразделяются на пассивные и активные соответственно.

Активные и пассивные ИОГ обладают рядом преимуществ и недостатков. Так, в случае активного ИОГ все функциональные элементы интегрированы на одной подложке. Такое устройство характеризуется малыми размерами (порядка нескольких мм<sup>2</sup>), а при размещении в корпусе не требует стыковки с оптическими волокнами и, следовательно, наиболее устойчиво к ударам, механическим и вибрационным нагрузкам. Однако в работе активного ИОГ имеют место эффекты, отрицательно сказывающиеся на его работе, такие как захват частот, эффект синхронизма и другие характерные для КЛГ [2]. Пассивные ИОГ более трудоемки при сборке, так как требуется стыковка с оптическим волокном для ввода излучения от внешнего источника, но лишены недостатков активных ИОГ. Основными паразитными эффектами, встречающимися при работе как активных, так и пассивных ИОГ, являются дробовый шум фотодетектора, флуктуация поляризации встречных оптических сигналов, эффект обратного рассеяния и эффект Керра [2, 3].

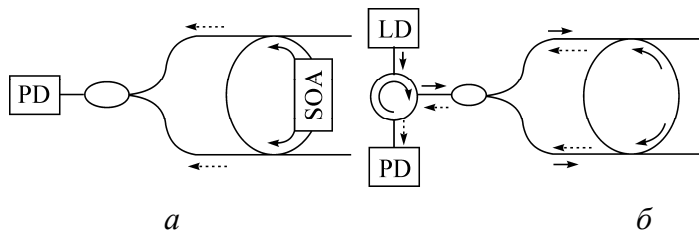


Рис. 2. Схема ИОГ с указанием направления распространения оптического излучения: а – активный ИОГ; б – пассивный ИОГ: PD – фотодетектор; LD – лазерный диод; SOA – полупроводниковый оптический усилитель;  $\rightarrow$  – направление распространения входного оптического излучения;  $\cdots\rightarrow$  – направление распространения выходного оптического излучения

Оптическая схема ИОГ в самом общем случае может быть представлена следующим образом: замкнутый волноводный контур (кольцевой резонатор) оптически связан с набором оптических волноводов, выполняющих функции ввода-вывода излучения. В случае активного ИОГ (рис. 2, а) два встречных когерентных оптических сигнала возбуждаются непосредственно в чувствительном контуре, а в пассивном ИОГ (рис. 2, б) оптическое излучение внешнего источника делится по

мощности (50/50) между двумя подводщими оптическими волноводами и посредством оптической связи вводится в чувствительный контур. Таким образом, в чувствительном контуре образуются два встречных оптических сигнала, совпадающих с различными направлениями вращения в плоскости кольцевого резонатора. При вращении чувствительного элемента с угловой скоростью  $\Omega$  благодаря эффекту Саньяка [4, 5] оптическая длина пути для встречных оптических сигналов, распространяющихся по замкнутому контуру, становится различна (рис. 3). В результате из-за изменения длины оптических путей изменяются характерные резонансные частоты, соответствующие вращению по часовой стрелке ( $v_{cw}$ ) и против часовой стрелки ( $v_{ccw}$ ). Разница двух резонансных частот (саньяковская частота биений) пропорциональна скорости вращения  $\Omega$  [6]:

$$\Delta v = v_{cw} - v_{ccw} = \frac{2R}{\lambda_m} \Omega, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кольца;  $\lambda_m$  – рабочая (резонансная) длина волны ИОГ, соответствующая  $m$ -му резонансному порядку оптического излучения фундаментальной моды в кольцевом резонаторе. На этом эффекте основан принцип работы ИОГ.

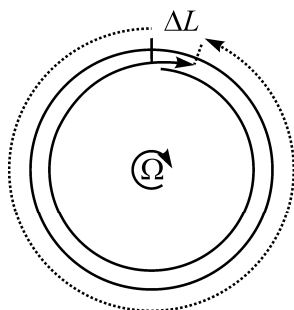


Рис. 3. Принцип работы ИОГ: стрелками обозначены два оптических сигнала, один из них совпадает с направлением вращения, второй распространяется в противоположном направлении; в результате для двух сигналов, распространяющихся во встречных направлениях, наблюдается изменение оптического пути на  $\Delta L$ : для совпадающего с направлением  $L + \Delta L$ , для несовпадающего  $L - \Delta L$

Через области оптической связи сигналы с разными резонансными частотами перекачиваются в отводящие волноводы и взаимодействуют на оптическом сумматоре. Результат их взаимодействия фикси-

руется на фотодетекторе и преобразуется в электрический сигнал, путем анализа частоты биений которого может быть получена информация об угловой скорости объекта.

Факторами, лимитирующими использование как пассивного, так и активного ИОГ, являются чувствительность устройства к изменениям условий окружающей среды и состояние подложки; рабочие характеристики чувствительного элемента ИОГ напрямую зависят от изменения температуры, давления или наличия механических деформаций. Влияние факторов окружающей среды может быть минимизировано путем размещения чувствительного элемента ИОГ в защитном герметичном корпусе. Однако корпусирование устройства не решает проблем, которые могут возникнуть при эксплуатации ИОГ в условиях различных климатических зон, где вариация температур происходит в пределах от  $-60$  до  $+60$  °С. Кроме того, интегрированный на подложке источник оптического излучения активного ИОГ в ходе работы приводит к локальному нагреву элементов устройства и, следовательно, к ухудшению точностных и рабочих характеристик датчика.

Изменение условий окружающей среды и локальный нагрев чувствительного элемента вызывают смещение резонансной длины волны из-за изменения оптического пути сигнала в кольцевом резонаторе за счет термооптического эффекта и температурного расширения материала, на основе которого изготовлен ИОГ [7]. Как уже было описано выше, угловая скорость объекта определяется резонансной длиной волны ИОГ, следовательно, изменение  $\lambda_m$  в кольцевом резонаторе ИОГ от температуры приводит к неверному определению угловой скорости.

Для оценки влияния изменения температуры  $T$  на точность определения угловой скорости объекта продифференцируем выражение (1) по  $dT$  и получим

$$\frac{d\Delta\nu}{dT} = \frac{2\Omega}{\lambda_m^2} \left( \lambda_m \frac{dR}{dT} - R \frac{d\lambda_m}{dT} \right). \quad (2)$$

Изменение радиуса кольцевого резонатора при изменении температуры зависит от коэффициента температурного расширения ( $\alpha_{sub}$ ):

$$\frac{dR}{dT} = \alpha_{sub} R. \quad (3)$$

Изменение резонансной длины волны кольцевого резонатора, вызванное изменением температуры, описывается формулой [8]

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \left( \frac{1}{L} \frac{dS}{dT} \right) \frac{\lambda_m}{n_{eff}}, \quad (4)$$

где  $L$  – длина замкнутого волновода чувствительного контура;  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления оптического волновода;  $S$  – длина оптического пути,  $S = n_{eff}L$ .

Изменение длины оптического пути в волноводе, зависящее от температуры, выражается формулой [9]

$$\frac{1}{L} \frac{dS}{dT} = \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \alpha_{sub}, \quad (5)$$

где  $\frac{dn_{eff}}{dT}$  – термооптический коэффициент материала волновода.

Подставив в выражение (4) уравнение (5), получим зависимость резонансной длины волны от температуры:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \left( \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \alpha_{sub} \right) \frac{\lambda_m}{n_{eff}}. \quad (6)$$

Подставив в уравнение (2) формулы (6) и (3), получим температурную зависимость саньяковской частоты биений:

$$\frac{d\Delta\nu}{dT} = \frac{2\Omega}{\lambda_m^2} \left( \lambda_m \alpha_{sub} R - \frac{\lambda_m R}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} - \lambda_m \alpha_{sub} R \right). \quad (7)$$

Из выражения (7) получаем, что изменение саньяковской частоты биений при изменении температуры не зависит от коэффициента температурного расширения (КТР) материала волновода, так как изменение радиуса резонатора одинаково влияет на оба встречно направленных оптических сигнала в чувствительном контуре. В результате имеем температурную зависимость частоты биений только от термооптического эффекта:

$$\frac{d\Delta\nu}{dT} = -\frac{2\Omega R}{\lambda_m n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} = -w\Omega, \quad (8)$$

где за  $w$  обозначено  $\frac{2R}{\lambda_m n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT}$ . Далее  $w$  именуется температурным коэффициентом.

Из уравнения (8) видно, что на зависимость саньяковской частоты биений от температуры влияют эффективный показатель преломления оптического волновода и радиус резонатора. При этом знак «минус» в формуле (8) говорит о том, что вследствие увеличения температуры чувствительного элемента ИОГ измеренная угловая скорость будет ниже реальной скорости вращения объекта.

Разделив уравнение (8) на частоту биений, получаем относительную ошибку измерения саньяковской частоты биений:

$$\frac{d\Delta\nu}{\Delta\nu} \frac{1}{dT} = - \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT}. \quad (9)$$

Исходя из уравнений (8) и (9), относительная ошибка измерения саньяковской частоты биений, вносимая изменением температуры, зависит от характеристик материала ИОГ и конструкции оптических волноводов ( $n_{eff}$ ).

Для оценки изменения частоты биений под влиянием температуры были выбраны кольцевые резонаторы заданного радиуса из оптических материалов  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SOI (Silicon-On-Insulator) и InGaAsP/InP, эффективный показатель преломления которых рассчитывался с учетом конструкции волновода. Конструкции волноводов на основе указанных выше материалов описаны в источниках [10–14]. С помощью метода распространяющегося луча [15] нами были рассчитаны значения эффективного показателя преломления фундаментальной TE-моды для каждого типа волноводов из указанных материалов на длине волны 1550 нм (табл. 1). На SOI были выбраны два различных типа волноводов – приподнятый и гребенчатый, для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – два волновода различного поперечного сечения. Все выбранные конструкции волноводов обеспечивают распространение оптического излучения в одномодовом режиме при длине волны 1550 нм.

Уточним резонансные длины волн ИОГ из выбранных материалов. Для этого зададим радиус кольцевого резонатора 500 мкм (изгибные потери при выбранном радиусе минимальны для волноводов из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SOI и GaInAsP/InP):

$$\lambda_m = \frac{2\pi R n_{eff}}{m}, \quad (10)$$

где  $m$  – резонансный порядок оптического излучения заданной моды в кольцевом резонаторе.

Все величины, требующиеся для оценки изменения частоты биений под влиянием температуры в ИОГ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материалы и габаритные параметры волноводов  
кольцевых резонаторов

Материал волновода	Тип волновода	Термооптический коэффициент, $1/^\circ\text{K}$	Ширина волновода, мкм	Высота волновода, мкм	$n_{eff}$	Резонансная длина волны, мкм
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> [10]	Приподнятый	2,45·10 <sup>-5</sup> [16]	5,3	0,050	1,4582	1,5503
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> [11]	Приподнятый		0,9	0,300	1,5659	1,5503
SOI [12]	Приподнятый	2·10 <sup>-4</sup> [17]	0,5	0,220	2,3678	1,5500
SOI [13]	Гребенчатый		0,5	0,220 (0,050 основание)	2,4379	1,5500
InGaAsP/ InP [14]	Гребенчатый	5,4·10 <sup>-4</sup> [18]	1,8	1,220 (0,380 основание)	3,1985	1,5502

Подставив значения из табл. 1 в формулы (8) и (9), получим температурный коэффициент и относительную ошибку измерения саньяковской частоты биений для каждого ИОГ на основе выбранных материалов (табл. 2).

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что значение ошибки частоты биений составит  $-0,054\Omega$  Гц на каждый градус изменения температуры схемы ИОГ на SOI, а для ИОГ на InGaAsP/InP  $-0,10891\Omega$  при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ . При увеличении температуры величина ошибки будет накапливаться.

Используя результаты вычислений, приведенные в табл. 2, из выражения (8) получим зависимость изменения частоты биений ( $d\Delta\nu$ ) при изменении температуры ( $dT$ ) при фиксированной угловой скорости  $1^\circ/\text{с}$  (рис. 4).



Таблица 2

Температурный коэффициент и величина относительной ошибки измерения саньяковской частоты биений при изменении температуры

Волновод	Температурный коэффициент $w$	Относительная ошибка измерения саньяковской частоты биений, $\cdot 10^{-5}$
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> [10]	-0,01084	1,7
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> [11]	-0,01009	1,6
SOI [12]	-0,05449	8,4
SOI [13]	-0,05293	8,2
InGaAsP/InP [14]	-0,10891	16,9

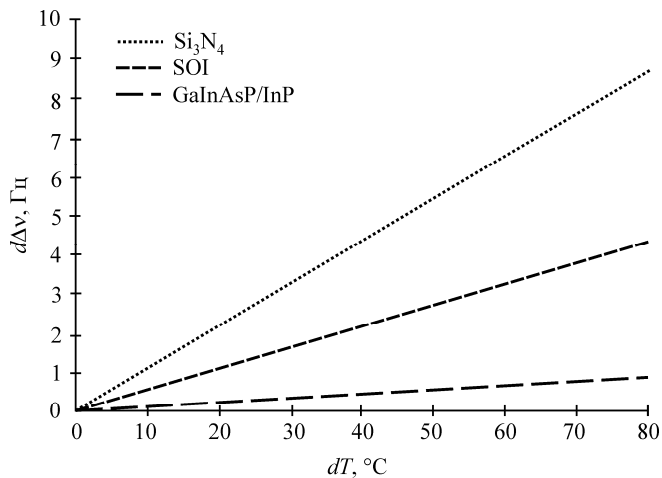


Рис. 4. Зависимость изменения частоты биений ( $d\Delta\nu$ ) при изменении температуры ( $dT$ ) для ИОГ из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SOI и InGaAsP/InP при фиксированной угловой скорости 1 °/с

Минимальной чувствительностью к температуре обладает кольцевой резонатор на нитриде кремния, но на нем невозможно изготовить активные элементы (источники лазерного излучения и фотодетекторы), как на InGaAsP/InP, который показал максимальную чувствительность к температуре.

Изменяя конструкцию волновода, уменьшить чувствительность к температуре можно лишь незначительно. Из рис. 5 видно, что при изменении температуры на 80 °С ошибка в частоте биений для различных геометрий, вносимая за счет изменения температуры, отлича-

ется лишь на 1 Гц. Аналогичная ситуация с чувствительными элементами на SOI.

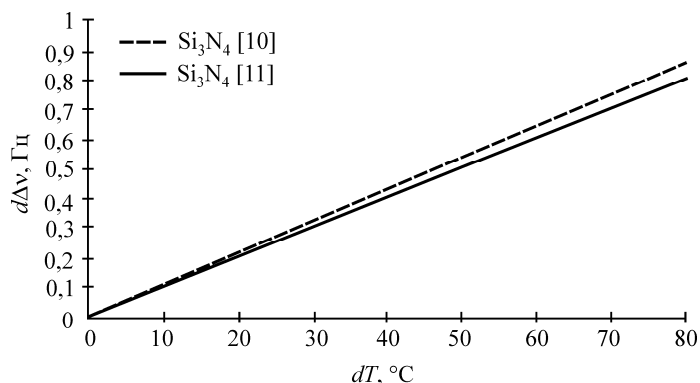


Рис. 5. Зависимость изменения частоты биений ( $d\Delta\nu$ ) при изменении температуры ( $dT$ ) для ИОГ из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при фиксированной угловой скорости  $1^\circ/\text{с}$  с различной геометрией волноводов

При этом из приведенных нами оценок видно, что относительная ошибка измерения саньяковской частоты биений (см. формулу (9), табл. 2) при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$  составит для ИОГ на SOI  $8,4 \cdot 10^{-3} \%$ . Если характерные частоты биений  $\Delta\nu$  при  $\Omega$  от 1 до  $10\,000^\circ/\text{с}$  составляют от 0,27 до  $2,7 \cdot 10^3$  кГц (для ИОГ на SOI радиусом 500 мкм), то относительная ошибка определения саньяковской частоты биений будет иметь низкочастотный характер и составлять 0,002–22,7 кГц.

Таким образом, достижение нечувствительности элементов интегрально-оптических схем ИОГ к температуре является важной задачей. В данной работе впервые выведена формула и оценена ошибка измерения саньяковской частоты биений и угловой скорости вращения объекта, связанной с изменением температуры ИОГ. Из полученных данных видно, что добиться повышения температурной стабильности возможно путем выбора материала с меньшим термооптическим коэффициентом либо путем уменьшения радиуса кольцевого резонатора, но это неизбежно приведет к уменьшению чувствительности к изменению угловой скорости. Среди рассмотренных нами ИОГ на основе различных материалов наименьшая ошибка при изменении температуры индуцируется в ИОГ на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Для уменьшения ошибки изме-

рения саньяковской частоты биений необходимо вносить поправки в получаемые данные, зная величину  $dT$ . Такой способ компенсации ошибки возможен для любого вида ИОГ.

*Данная работа выполнена в рамках Программы государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, договор № 02.G25.31.0004, а также при поддержке Министерства образования и науки Пермского края (С-26/004.02).*

### **Список литературы**

1. Recent advances in miniaturized optical gyroscopes / F. Dell'Olio, T. Tatoli, C. Ciminelli [et al.] // Journal of the European Optical Society-Rapid Publications. – 2014. – Vol. 9.
2. Сахаров В.К. Модель захвата частот в кольцевом лазере и полупроводниковый лазерный гироскоп // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 8.
3. Test and analysis of the optical Kerr-effect in resonant micro-optic gyros / X. Li, J. Zhang, H. Ma, Z. Jin // IEEE Photonics Journal. – 2014. – Vol. 6, № 5. – P. 1–7.
4. The ring laser gyro / W.W. Chow, J. Gea-Banacloche, L.M. Pedrotti [et al.] // Reviews of Modern Physics. – 1985. – Vol. 57, № 1. – P. 61.
5. Recent advances in integrated photonic sensors / V. Passaro, C. Tullio, B. Troia [et al.] // Sensors. – 2012. – Vol. 12, № 11. – P. 15558–15598.
6. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. – Artech House, 2014.
7. Rabus D.G. Integrated ring resonators. – Berlin: Springer, 2007.
8. Kokubun Y., Yoneda S., Tanaka H. Temperature-independent narrow-band optical filter by an athermal waveguide // IEICE Transactions on Electronics. – 1997. – Vol. 80, № 5. – P. 632–639.
9. Padmaraju K., Bergman K. Resolving the thermal challenges for silicon microring resonator devices // Nanophotonics. – 2014. – Vol. 3, № 4–5. – P. 269–281.
10. Ultra-high quality factor planar Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ring resonators on Si substrates / M.C. Tien, J.F. Bauters, M.J.R. Heck [et al.] // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, № 14. – P. 13551–13556.

11. High quality optical microring resonators in  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  / A. Kaźmierczak, L. Vivien, K.B. Gylfason [et al.] // 14th European Conf. on Integrated Optics ECIO. – 2008. – P. 313–316.

12. Silicon microring resonators / W. Bogaerts, P. De Heyn, Van Vaerenbergh [et al.] // Laser & Photonics Reviews. – 2012. – Vol. 6, № 1. – P. 47–73.

13. The resonance frequency shift in an SOI nano-waveguide microring resonator / Z. Junbin, X. Chenyang, W. Liping [et al.] // Journal of Semiconductors. – 2013. – Vol. 34, № 4. – P. 044009.

14. Rabus D.G. Realization of optical filters using ring resonators with integrated semiconductor optical amplifiers in GaInAsP/InP. – 2002.

15. Van Roey J., Van der Donk J., Lagasse P. E. Beam-propagation method: analysis and assessment // JOSA. – 1981. – Vol. 71, № 7. – P. 803–810.

16. Arbabi A., Goddard L.L. Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{SiO}_x$  using microring resonances // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38, № 19. – P. 3878–3881.

17. Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures / H. Xu, M. Hafezi, J. Fan [et al.] // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, № 3. – P. 3098–3104.

18. Direct measurement of substrate refractive indices and determination of layer indices in slab-guiding structures / N.A. Paraire, N. Moresmau, S. Chen [et al.] // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36, № 12. – P. 2545–2553.

## References

1. F Dell'Olio, T Tatoli, C Ciminelli et al. Recent advances in miniaturized optical gyroscopes // Journal of the European Optical Society-Rapid publications. 2014. T. 9.

2. Sakharov V.K. Model' zakhvata chastot v kol'tsevom lazere i poluprovodnikovyy lazernyy giroskop // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2011. T. 81. № 8.

3. X Li, J Zhang, H Ma, Z Jin. Test and analysis of the optical Kerr-effect in resonant micro-optic gyros // IEEE Photonics Journal. 2014. T. 6. № 5. S. 1-7.

4. WW Chow, J Gea-Banacloche, LM Pedrotti et al. The ring laser gyro // Reviews of Modern Physics. 1985. T. 57. № 1. S. 61.

5. V Passaro, C Tullio, B Troia et al. Recent advances in integrated photonic sensors // Sensors. 2012. T. 12. № 11. – S. 15558-15598.

6. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. Artech house, 2014.
7. Rabus D.G. Integrated ring resonators. Berlin: Springer, 2007. S. 46-178.
8. Kokubun Y., Yoneda S., Tanaka H. Temperature-independent narrow-band optical filter by an athermal waveguide // IEICE transactions on electronics. 1997. T. 80. № 5. S. 632-639.
9. Padmaraju K., Bergman K. Resolving the thermal challenges for silicon microring resonator devices // Nanophotonics. 2014. T. 3. № 4-5. S. 269-281.
10. MC Tien, JF Bauters, MJR Heck et al. Ultra-high quality factor planar Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ring resonators on Si substrates // Optics express. 2011. T. 19. № 14. – S. 13551-13556.
11. A Kaźmierczak, L Vivien, KB Gylfason et al. High quality optical microring resonators in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> // 14th European Conf. on Integrated Optics ECIO. – 2008. – S. 313-316.
12. Bogaerts, W., De Heyn, P., Van Vaerenbergh et al. Silicon microring resonators // Laser & Photonics Reviews. 2012. T. 6. № 1. S. 47-73.
13. Z Junbin, X Chenyang, W Liping et al. The resonance frequency shift in an SOI nano-waveguide microring resonator // Journal of Semiconductors. 2013. T. 34. № 4. S. 044009.
14. Rabus D. G. Realization of optical filters using ring resonators with integrated semiconductor optical amplifiers in GaInAsP/InP. – 2002.
15. Van Roey J., Van der Donk J., Lagasse P. E. Beam-propagation method: analysis and assessment // JOSA. 1981. T. 71. № 7. S. 803-810.
16. Arbabi A., Goddard L. L. Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>x</sub> using microring resonances // Optics letters. 2013. T. 38. № 19. S. 3878-3881.
17. H Xu, M Hafezi, J Fan et al. Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures // Optics express. 2014. T. 22. № 3. S. 3098-3104.
18. NA Paraire, N Moresmau, S Chen et al. Direct measurement of substrate refractive indices and determination of layer indices in slab-guiding structures // Applied optics. 1997. T. 36. № 12. S. 2545-2553.

Получено 12.06.2017