

2007-2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ФОТОНИКА®

PHOTONICS RUSSIA



DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.2

Журнал: [www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)

Издательство: [www.technosphaera.ru](http://www.technosphaera.ru)



DOI: 10.22184/1993-7296.FROS.2023.T.17.26.44

## Микрооптические гироскопы на основе резонаторов мод шепчущей галереи

Ю. В. Филатов, А. С. Кукаев, В. Ю. Венедиктов, А. А. Северюгин, Е. В. Шалымов  
Кафедра лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Оптические гироскопы, такие как кольцевые лазерные и волоконно-оптические, стали основой для бесплатформенных инерциальных навигационных систем благодаря ряду преимуществ: большому диапазону измеряемых угловых скоростей, высокой стабильности масштабного коэффициента, нечувствительности к ускорению и перегрузке, меньшему времени готовности и т. д. Несмотря на успех в их разработке, такие гироскопы не пригодны для использования в системах управления небольшими портативными устройствами из-за своих больших размеров и веса. Поэтому миниатюризация оптических гироскопов сейчас является актуальной задачей. Статья посвящена разработке и исследованию микрооптического гироскопа.

Ключевые слова: микрооптические гироскопы, резонаторы галереи шепчущих мод, датчик угловой скорости, взаимный сдвиг частоты

Статья получена: 31.10.2022  
Статья принята: 21.11.2022

В течение последнего десятилетия основная деятельность в области разработки микрооптических гироскопов была сосредоточена на схеме устройства, основанной на использовании пассивных кольцевых одномодовых резонаторов, которые обычно изготавливаются с использованием планарных интегральных оптических технологий.

Также в качестве чувствительного элемента гироскопа вместо планарного одномодового резонатора могут быть использованы резонаторы мод шепчущей галереи. Это обусловлено их полезными свойствами: высочайшей добротностью, малым объемом собственных мод, компактностью и относительной простотой изготовления.

## Microoptical Gyros Based on Whispering Gallery Mode Resonators

Yu. V. Filatov, A. S. Kukayev, V. Yu. Venediktov, A. A. Severyugin, E. V. Shalymov  
Laser Measurement and Navigation Systems Department, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg, Russia

Optical gyros, such as ring laser gyros and fiber optical gyros, have become a basis for platform-free navigation systems due to a number of advantages (larger dynamic range of the measured velocities; high stability of scale factor, insensitivity to linear acceleration and G-stress; smaller readiness time, etc.). Despite success in its development, ring laser and fiber optic gyros are unsuitable for using in control systems of small portable devices because of its large size and weight. Now the actual task is miniaturization of optical gyros, or development and research of microoptical gyros.

Keywords: Microoptical Gyros, Whispering Gallery Mode Resonators, angular velocity sensor, Reciprocal frequency shift

Received on: 31.10.2022  
Accepted on: 21.11.2022

During the last decade main activities in the area of developing the microoptical gyro were concentrated on the scheme of device based on the use of passive ring single-mode cavities, which are usually produced with the use of planar integral optical technologies.

Whispering gallery modes resonators can be also used as the gyro sensitive element instead of planar single-mode resonator. This is due to their following properties: highest optical quality factors, small eigenmodes volume, compactness and relative ease of fabrication. In this work we consider effects arising in the whispering gallery modes resonator during its rotation and possible ways of their application as sensing element of microoptical gyro.

натора могут быть использованы резонаторы мод шепчущей галереи. Это обусловлено их полезными свойствами: высочайшей добротностью, малым объемом собственных мод, компактностью и относительной простотой изготовления.

В данной работе мы рассматриваем эффекты, возникающие в резонаторе мод шепчущей галереи при его вращении, и возможные способы их применения в качестве чувствительного элемента микрооптического гироскопа.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация – один из важнейших процессов, определяющих современные технологии, устройства и даже образ жизни. Если мы взглянем на историю развития гироскопов, то увидим, что механические гироскопы были изобретены раньше оптических, и их миниатюризация также была произведена раньше. МЭМС-гироскопы уже широко распространены и охватывают огромную часть рынка датчиков благодаря их использованию в БПЛА, робототехнике и даже смартфонах. Сегодня преимущества, которые позволяют оптическим гироскопам занять свое место, провозглашают идею разработки микрооптического гироскопа (МОГ).

Чувствительным элементом большинства МОГ является пассивный кольцевой резонатор (ПКР). Его тип определяет технологию изготовления всего прибора, потенциальную чувствительность, минимально возможные размеры и многие другие характеристики гироскопа. Таким образом, МОГ удобно классифицировать в зависимости от типа используемого ПКР (рис. 1).

Обычно в качестве чувствительного элемента используются волоконные ПКР [1]. Чаще всего они изготавливаются из плоских волноводов. Они также могут быть изготовлены из волокала или фотонных кристаллов. В этом случае используются только одномодовые волноводы. Как и во всех оптических гироскопических системах, использование многомодовых волноводов невозможно из-за дисперсии

### 1. INTRODUCTION

Miniaturization is one of the crucial processes that determines modern technologies, devices and even the lifestyle. If we have a glance at the history of gyroscope evolution, we can see that mechanical gyros were invented prior to the optical ones and their miniaturization was performed earlier as well. MEMS gyros are already widespread and cover the huge part of the sensors market owing to its usage in UAVs, robotics, and even smartphones. However, advantages that made optical gyros to take its place are pushing forward the idea of designing a microoptical gyro (MOC).

The sensing element of most MOCs is a passive ring resonator (PRR), its type determines the manufacturing technology of the entire instrument, the potential sensitivity, the minimum possible dimensions and many other characteristics of the gyroscope. Therefore, MOCs are conveniently classified based on the type of PRR used (see Fig. 1).

Usually waveguide PRRs are used as a sensitive element. Most often they are made of planar waveguides. They can also be made of fibre or photonic crystals. In this case, only single-mode waveguides



Рис. 1. Типы пассивных кольцевых резонаторов, рассматриваемые в качестве чувствительных элементов МОГ  
Fig. 1. Types of passive ring resonators, considered as sensitive elements of MOCs

PHOTONICS VOL. 17 №1 2023 27

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ISSN 1993-7296 (print) | ISSN 2686-844X (online)

## ФОТОНИКА<sup>®</sup> 1 2023

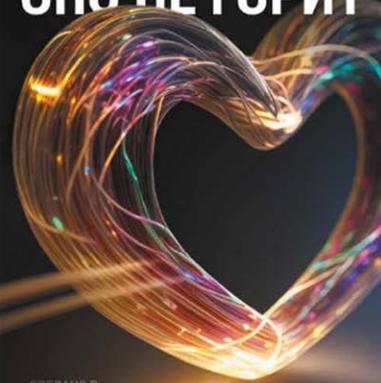
PHOTONICS RUSSIA

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ISSN 1993-7296 (print) | ISSN 2686-844X (online)

## ФОТОНИКА<sup>®</sup> 2 2023

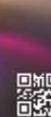
PHOTONICS RUSSIA

### ВОЛОКНО НЕ СЕРДЦЕ ОНО НЕ ГОРИТ



СДЕЛАНО В  
РОССИИ

LASSARD  
РОССИЙСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ



Том 17 № 2 2023



DOI: 10.22184/1993-7296.FROS.2023.T.17.2  
Журнал: www.photonics.ru  
Издательство: www.technosphera.ru

ТРОИЧНЫЕ  
КОМПЛЕКСЫ

ПРАВИЛА,  
ПРИЧИНА  
Где гироскопы  
направлен мод  
три

ЛИНИИ СВЯЗИ

ДЕНЬ —  
УЧЬ...  
ВАЗЬ  
И Т. ПОИ

ТЕХНОЛОГИИ

ПЕР  
ЕДИНЕ  
ИДТИТЬ ВЫБОРА  
ВОЛНОВОГО  
ИТА

ДЕЛОВЫЕ ЛЮДИ

ПЕРЕДЕЛ РОССИЙСКОГО  
РЫНКА ЛАЗЕРНЫХ СТАНКОВ  
Компания «ЛАСАРД» —  
отечественный  
производитель лазеров

ТЕХНОЛОГИИ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КИЛЛЕР  
«ЧИСТЫХ КОМНАТ»  
Секреты структурных  
и оптических свойств  
таких пленки

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ  
И УСТРОЙСТВА

НОВЫЕ ПОДРОБНОСТИ  
СТАРОЙ ИСТОРИИ  
Германий как материал фотоники

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В ИМЕНИ КРУПНОГО БРЕНДА  
ВСЕГДА ЧТО-ТО НАПИСАНО  
МЕЛКИМ ПОЧЕРКОМ  
Сравнение отечественных  
детекторов одиночных фотонов  
с их зарубежными аналогами

296.FROS.2023.T.17.1  
tonics.ru  
www.technosphera.ru

## Журнал «Фотоника»

Издаётся с 2007 года

Периодичность – 8 номеров в год

Объём – 120 страниц и более

Формат – А4+

Тираж – 4500 экз.

Главный редактор – Истомина Наталья Леонидовна, доктор физ.-мат. наук

Журнал выходит при поддержке Лазерной Ассоциации

Журнал входит в российские реферативные базы данных RSCI, РИНЦ (ядро),

РИЭПП «Российские научные журналы» и международные базы данных и системы цитирования CA(pt) и Scopus



**ФОТОНИКА**<sup>®</sup>  
PHOTONICS RUSSIA



Научно-технический журнал о новых оптических и фотонных технологиях и их использовании в научных исследованиях, промышленности, медицине и биологии; рассматривает широкий круг вопросов оптического материаловедения, оптических систем и элементов (лазерных, светотехнических, электрооптических, оптоволоконных, фотовольтаических), систем машинного зрения и навигации, контрольно-измерительной аппаратуры.

Журнал адресован тем, кто принимает решение - руководителям предприятий и ведомств, менеджерам разных уровней; тем, кто отвечает за технический уровень производства – инженерам, технологам и специалистам различного профиля; тем, кто хочет повысить свой технический и образовательный уровень – аспирантам и студентам старших курсов профильных вузов.

## Распространение

Способы распространения	
Рассылка по подписке	31%
Распространение на отраслевых выставках, конференциях, семинарах	57%
Продажа	4%
Распространение рекламодателями	6%
Резерв, редакция	2%
Регионы распространения	
Москва	44%
С-Петербург	16%
Новосибирск	9,5%
Екатеринбург	8%
Воронежская обл.	4%
Ростовская обл.	3,5%
Нижегородская обл.	2,5%
Республика Татарстан	1,5%
Республика Башкортостан	0,5%
Другие регионы	9%
Должностной статус читателей	
Руководители предприятий	18%
Инженеры-разработчики	53%
Научные сотрудники	9%
Начальники отдела закупок	16%
Студенты ВУЗов	4%

## Редакционная коллегия журнала

**Н.Л. Истомина**, д-р физ.-мат. наук, Московский авиационный институт, кафедра Управление инновациями, Московский университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов (Москва)

**А.В. Наумов**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт спектроскопии РАН, Московский педагогический государственный университет, заведующий кафедрой теоретической физики им. Э. В. Шпольского (Москва)

**А.С. Борейшо**, д-р техн. наук, Институт лазерной техники и технологий Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова (Санкт-Петербург)

**Г.Т. Микаелян**, д-р техн. наук, «НПП «ИНЖЕКТ», Институт магистратуры НИЯУ МИФИ (Саратов)

**Е.В. Земляков**, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Институт лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) (Санкт-Петербург)

**В.Ю. Венедиктов**, д-р физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург)

**О.А. Алексеева**, канд. физ.-мат. наук, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН (Москва)

**И.С. Шелемба**, канд. техн. наук, ООО «Инверсия-Сенсор» (Пермь)

## Научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым присуждаются ученые степени по результатам работ, опубликованных в журнале «ФОТОНИКА»:

**1.3.6.** Оптика (технические науки),

**1.3.6.** Оптика (физико-математические науки),

**1.3.8.** Физика конденсированного состояния (технические науки),

**1.3.8.** Физика конденсированного состояния (физико-математические науки),

**1.3.19.** Лазерная физика (технические науки),

**2.2.5.** Приборы навигации (технические науки),

**2.2.6.** Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),

**2.6.5.** Порошковая металлургия и композиционные материалы(технические науки)

**2.2.7.** Фотоника (технические науки)

**2.2.7.** Фотоника (физико-математические науки)

**2.6.5.** Порошковая металлургия и композиционные материалы(технические науки)

## Редакционный совет

**Председатель: И.Б. Ковш**, д-р физ.-мат. наук, президент Лазерной ассоциации

### **Редакционный совет:**

**Бабин С.А.**, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск)

**Бажанов Ю.В.**, д-р техн. наук, ОАО НПК «Системы прецизионного приборостроения» (Москва)

**Будаговский А.В.**, д-р техн. наук, ВНИИ генетики и селекции плодовых растений им. И.В. Мичурина (Тамбовская обл., Мичуринск)

**Долгих Г.И.**, академик РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (Владивосток)

**Казанский А.Г.**, д-р физ.-мат. наук, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва)

**Карменян А.В.**, д-р техн. наук, Государственный университет ДонгХва (Хуалинь), Исследовательский центр биофотоники и молекулярной визуализации, Национальный Ян Мин университет Тайпея (Тайпей)

**Крутиков В.Н.**, д-р техн. наук, ВНИИ оптико-физических измерений, Высшая школа экономики (Москва)

**Кузнецов Е.В.**, д-р техн. наук, НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

**Лутовинов А.А.**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт космических исследований РАН (Москва)

**Минаев В.П.**, канд. техн. наук, «НТО ИРЭ-Полюс», группа компаний IPG Photonics

**Осипов В.В.**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт электрофизики УрО РАН, Уральский физико-технический университет (Екатеринбург)

**Ромашко Р.В.**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН (Владивосток)

**Туричин Г.А.**, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Институт лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого (Санкт-Петербург)

**Чжу Сяо**, директор Национального исследовательского центра лазерных технологий Хуанжонского университета, президент Лазерной ассоциации оптической долины Китая, (Ухань, провинция Хубэй, Китай)

**Шур В.Я.**, д-р физ.-мат. наук, Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета им. БН. Ельцина, Уральский центр коллективного пользования «Современные нанотехнологии» (Екатеринбург)

**Щербаков И.А.**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Московский физико-технический институт (МФТИ) (Москва)

## Технические требования к рекламным макетам

Формат рекламы	Размер рекламных модулей, мм (ширина/высота)
2-я, 3-я, 4-я обложка	207×290*
1-я обложка	130×210
1-а полоса	207×290
0,5 полосы	180×114; 87×235
0,3 полосы	180×74
0,25 полосы	180×52; 87×114
0,125 полосы	87×52
Имиджевая статья	207×290 (5450 знаков)

\* 1. Дообрезной формат макета – 207×290 мм.

Обрезной формат макета – **217×300 мм. В печать сдается макет обрезного формата.**

2. Сумма красок – **не более 300%.**

3. Разрешение растровых изображений – **300 dpi.**

4. **Все шрифты в макетах должны быть предварительно переведены в кривые!**

**ВАЖНО!** Перед отправкой в печать все макеты проходят проверку у корректора. Клиент оставляет за собой право решать, будет ли вноситься корректорская правка или нет, а также будет ли править текст сам рекламодатель или дизайнер АО «РИЦ» «ТЕХНОСФЕРА». В случае, если клиент возлагает эту обязанность на издательство, вместе с рекламным модулем должны быть высланы все шрифты, используемые в макете! И сами шрифты, в данном случае, в кривые не переводятся.

5. **ВАЖНО!!!**

**Весь текст, а также элементы дизайна в макете, которые подразумеваются как черные или серые, должны быть 100% черными!!!, без примесей других красок (особенно это касается мелкокегельного текста на белом фоне).**

То есть сумма красок черного текста должна быть **C=0; M=0; Y=0; K=100.**

Сумма красок серых оттенков должна быть **C=0; M=0; Y=0; K – от 95 до 15%**

6. **ВАЖНО!** Расстояние от линии реза должно быть хотя бы **10-12 мм.**

В противном случае все важные информационные элементы могут уйти в «корень» или под обрез.

Пожалуйста, учитывайте это в своей работе.

7. Все макеты сдаются в печать в СМΥК. Макеты с использованием PANTONE-ов в печать не принимаются.

8. Типы файлов, принимаемые к печати: **PDF, TIFF, AI (CS6), IDML(CS6)** (пожалуйста, не забудьте про links). Мы будем Вам очень признательны, если Вы пришлете свои макеты в сляках.

Пожалуйста, внимательно перепроверяйте свои макеты на предмет технических и (или) иных ошибок перед отправкой в печать.

После окончательного согласования макета с клиентом и отправки его в типографию, АО «РИЦ» «ТЕХНОСФЕРА» не несет ответственности за результат, если не были соблюдены технические требования подготовки макетов.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ФОТОНИКА<sup>®</sup>

PHOTONICS RUSSIA

**Генеральный директор**  
**Казанцева Ольга Андреевна**  
тел.: (495) 234-01-10 (доб. 188),  
E-mail: koa@electronics.ru

**Менеджер проекта**  
**Карякина Лариса Викторовна**  
тел.: (495) 234-01-10 (доб.241); моб. 8-903-212-92-55,  
E-mail: rec-knigi@electronics.ru, larvictory@yandex.ru



DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.2  
Журнал: [www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)  
Издательство: [www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР