

ОБЗОР

Микрооптические гироскопы на основе пассивных кольцевых резонаторов

В.Ю.Венедиктов, Ю.В.Филатов, Е.В.Шалымов

Дан обзор современного состояния разработок пассивных микрооптических гироскопов. В течение последнего десятилетия основные усилия в области создания микрооптических гироскопов были сконцентрированы на схеме, основанной на использовании пассивного кольцевого одномодового резонатора, который, как правило, изготавливался с использованием технологии интегральной оптики. Размеры таких микрооптических гироскопов сравнимы с размерами микромеханических гироскопов (площадь 10–100 мм²), а их предельная чувствительность значительно превышает чувствительность последних и приближается к чувствительности лазерных и волоконных гироскопов. Кроме того, микрооптические гироскопы, как и микромеханические, могут быть изготовлены в виде единой интегральной схемы с использованием стандартной технологии, но, в отличие от микромеханических, они не имеют подвижных частей. Приведены также результаты разработки и исследования микрооптических гироскопов, полученные авторами обзора.

Ключевые слова: пассивный кольцевой резонатор, интерферометр, микрооптический гироскоп.

1. Введение

Лазерные (ЛГ) и волоконно-оптические (ВОГ) гироскопы стали основой для бесплатформенных инерциальных навигационных систем из-за ряда своих преимуществ (большой динамический диапазон измеряемых скоростей, нечувствительность к ускорениям и перегрузкам, малое время готовности и т. д.) перед традиционными механическими гироскопами. Несмотря на успехи в развитии, ЛГ и ВОГ не могут использоваться в навигационных системах для управления компактными портативными подвижными объектами из-за большого размера и веса. Еще одним недостатком оптических гироскопов является их довольно высокая стоимость. Развитие сравнительно дешевых и миниатюрных (размером порядка сантиметра или меньше) гироскопов для широкого диапазона применений – одна из важнейших задач в области разработки приборов ориентации и навигации. На сегодняшний день эта ниша занята различными видами микромеханических гироскопов, которые обязаны своим появлением в первую очередь успехам в развитии микроэлектромеханических технологий. Тем не менее чувствительность лучших микромеханических гироскопов по крайней мере на два порядка ниже чувствительности оптических гироскопов. Кроме того, они чувствительны

к линейным ускорениям и различным видам механических воздействий. Это объясняется тем, что схемы, по которым строятся микромеханические гироскопы, предполагают наличия инерционной массы подвешенной на торсионах. Таким образом, при ускорении или вибрации подвижная масса отклонится от исходного положения, что будет воспринято датчиком как изменение угловой скорости. При наличии значительных вибраций и ускорений (десятки-сотни единиц g) измерение угловой скорости микромеханическим датчиком невозможно [1]. Описанные недостатки ограничивают возможную область применения микромеханических гироскопов. Оптические гироскопы не имеют этих недостатков. Поэтому на сегодняшний день задача миниатюризации оптических гироскопов, т. е. работы, направленные на создание микрооптических гироскопов (МОГ), является несомненно актуальной.

Развитие интегральной оптики создало базу для проведения работ, направленных на существенное снижение стоимости и уменьшение габаритов оптических гироскопов. Последнее достигается, например, заменой зеркального кольцевого резонатора замкнутым волноводом или оптоволоконном. Генерация в волокне или волноводе может быть получена с использованием вынужденного бриллюэновского рассеяния [2] или за счет активирования сердцевинны волновода или волокна редкоземельными элементами [3]. Основным препятствием при создании МОГов с активным резонатором является эффект захвата, зона которого быстро растет с уменьшением периметра. Еще одно препятствие – большая ширина однородной линии усиления и, как следствие, целый ряд проблем, среди которых нужно отметить сложность получения устойчивой двунаправленной генерации, многомодовый режим генерации, нестабильность амплитуд встречных волн и т. д. Поэтому с точки зрения миниатюризации наиболее интересным вариантом построения оптического гироскопа является гироскоп на основе пассивного кольцевого резонатора (ПКР).

В.Ю.Венедиктов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, 198504 С.-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, 3; e-mail: vlad.venediktov@mail.ru

Ю.В.Филатов, Е.В.Шалымов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; e-mail: yvfilatov@mail.eltech.ru

Поступила в редакцию 19 сентября 2015 г., после доработки – 12 февраля 2016 г.

В отличие от резонатора ЛГ, в ПКР отсутствует активный элемент, обеспечивающий генерацию встречных волн. Впервые гироскоп на ПКР был предложен и исследован в конце 1970-х годов. Он реализовывался в зеркальном варианте и с габаритами, практически не отличающимися от габаритов ЛГ (обычная треугольная или квадратная конфигурация с периметром 20–60 см) [4].

Основной целью построения первых ПКР было создание оптического гироскопа с чувствительностью, аналогичной чувствительности ЛГ, но без зоны захвата. Первоначально считалось, что в случае ПКР синхронизация встречных волн принципиально невозможна из-за отсутствия генерации и соответственно нелинейных эффектов. Впоследствии зона захвата в ПКР была обнаружена, и поэтому ПКР в таком исполнении не нашел широкого применения. Спустя несколько лет выяснилось, что причиной наличия синхронизации частот в ПКР являются нелинейные эффекты, возникающие при использовании цепей обратной связи. Однако при грамотном проектировании цепей обратной связи появления зоны захвата можно избежать. С самого начала работ по созданию миниатюрных оптических гироскопов на базе интегрально-оптических технологий стало ясно, что такая модель ПКР является наиболее перспективным вариантом чувствительного элемента для МОГа [4].

2. Классификация пассивных МОГов в зависимости от схемы подключения чувствительного элемента

В зависимости от схемы подключения чувствительного элемента пассивные МОГи можно разделить на несколько типов (рис.1).

2.1. Резонаторные МОГи

Большинство разработанных на сегодняшний день прототипов МОГов на основе ПКР относятся к резонаторному типу. Скорость вращения такого прибора пропорциональна разности частот собственных мод резонатора для взаимно противоположных направлений его об-



Рис.1. Типы микрооптических гироскопов.

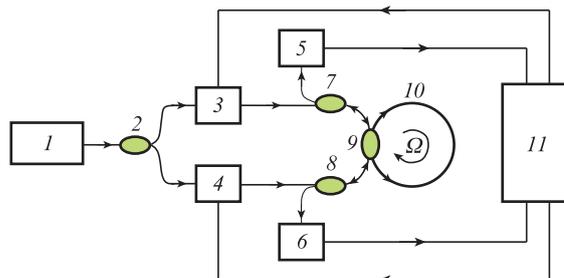


Рис.2. Принцип работы резонаторного МОГа.

хода. Собственные частоты ПКР определяются по амплитудной характеристике (по провалу или пику коэффициента пропускания) кольцевого многолучевого интерферометра, состоящего из резонатора и устройства ввода/вывода излучения [5].

На рис.2 иллюстрируется принцип работы резонаторного МОГа. Излучение от источника света (лазера) 1 делится разветвителем 2 на две волны, частоты которых регулируются при прохождении через фазовые модуляторы 3 и 4. Затем с помощью направленного ответвителя 9 излучение вводится в резонатор кольцевого интерферометра 10, причем свет из обоих каналов поступает в него во взаимно противоположных направлениях (по и против часовой стрелки). Через направленные ответвители 7, 8 и 9 свет попадает на фотоприемники 5 и 6, сигналы с которых направляются в вычислительную систему 11. Оптическая часть МОГа, как правило, выполняется в виде единой либо гибридной интегральной оптической схемы (в последнем случае оптические элементы изготавливаются на отдельных подложках, помещаются в корпус и соединяются волокном). Внешний вид резонаторов, используемых в прототипах МОГов, приведен на рис.3.

Если гироскоп неподвижен относительно инерциального пространства, то интенсивность света на фотоприемниках 5 и 6 вне зависимости от частоты излучения меняется одинаково. Амплитудные характеристики интерферометра (коэффициент пропускания) имеют провалы

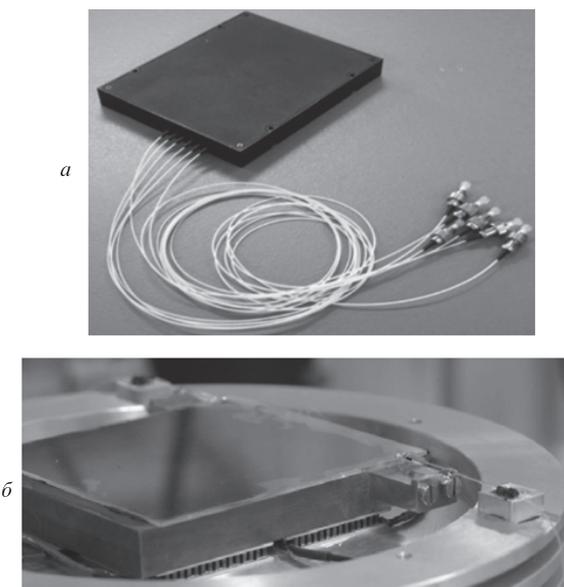


Рис.3. Внешний вид резонаторов МОГов: а – волноводный ПКР в герметичном корпусе [6]; б – ПКР в корпусе, позволяющем осуществлять термокомпенсацию, расположенный на центрифуге (перед испытаниями МОГа) [7].

на собственных (резонансных) частотах ПКР f_m , причем они равны для встречных направлений обхода ПКР:

$$f_m = mc/(nL), \tag{1}$$

где m – целое положительное число; c – скорость распространения света в вакууме; n – показатель преломления; L – периметр резонатора.

При вращении гироскопа в плоскости рис.2 собственные частоты ПКР расщепляются вследствие эффекта Саньяка. При этом разность собственных частот для встречных направлений обхода резонатора пропорциональна угловой скорости МОГа Ω :

$$\Delta f = f_{mCCW} - f_{mCW} = \frac{4S}{\lambda_m L} \Omega, \tag{2}$$

где f_{mCW} и f_{mCCW} – собственные частоты при обходе резонатора в направлении по и против часовой стрелки соответственно; S – площадь резонатора; $\lambda_m = c/f_m$; $4S/(\lambda_m L)$ – масштабный коэффициент.

Вычислительная система *И* определяет резонансные частоты ПКР по минимумам амплитудной характеристики и с помощью фазовых модуляторов подстраивает под них частоты волн. С использованием значений собственных частот ПКР и масштабного коэффициента вычисляется угловая скорость. Стоит отметить, что у гироскопа резонаторного типа ширина линии излучения источника света должна быть значительно меньше ширины провала коэффициента пропускания.

В рассмотренной выше схеме резонаторного гироскопа для ввода и вывода излучения из ПКР используется одна петля оптической связи (один вспомогательный волновод, связанный с резонатором). Существуют и другие конфигурации датчиков на основе кольцевого резонатора, различающиеся по способу ввода и вывода сигналов из резонатора. Почти во всех разработанных на сегодняшний день схемах резонаторных гироскопов для ввода и вывода излучения из резонатора используется один или два вспомогательных волновода. Наиболее распространенные конфигурации датчиков схематично показаны на рис.4.

Конфигурации, подобные изображенной на рис.4,а, рассматривались ранее (рис.2). Конфигурации (как на рис.4,б) представляют собой кольцевой интерферометр с двумя петлями оптической связи, одна из которых используется для ввода и вывода излучения, обходящего резонатор по часовой стрелке (CW), а другая – против нее (CCW) [8,9]. Гироскопы, в которых применяются датчики, соответствующие схемам на рис.4,а и б, называются отражающими. Также существуют датчики, в которых

одна петля оптической связи используется для ввода излучения в резонатор, а другая – для вывода (рис.4,в) [10]. Гироскопы на основе датчиков этой конфигурации называются пропускающими.

Кроме описанных выше конфигураций резонаторных гироскопов существуют варианты с частичной компенсацией потерь в резонаторе. Чем больше добротность ПКР, тем выше предельная чувствительность гироскопа на его основе [4]. Добротность резонатора может быть повышена за счет компенсации его потерь с помощью лазерного усиления. При этом поддерживается работа резонатора ниже порога генерации. В одной из первых схем пассивного резонаторного гироскопа с компенсацией потерь [11] было предложено симметрично разместить в волноводном кольцевом резонаторе два отдельных полупроводниковых оптических усилителя – У1 и У2 (рис.5). Применение полупроводниковых оптических усилителей позволяет компенсировать потери резонатора и существенно (на несколько порядков) повысить его добротность. Недостатком этой схемы является то, что в волноводный резонатор вводятся отдельные элементы с отличающимися показателями преломления. В результате торцы полупроводниковых оптических усилителей отражают часть проходящего через них света в обратном направлении. Чтобы этого избежать, используется конфигурация ПКР с частичной компенсацией потерь, в которой оптическое усиление обеспечивают атомы активного вещества, имплантированные в резонатор. Теоретическое и экспериментальное исследование такого резонатора проведено в [12]. Резонатор был выполнен из силикатного стекла с 2%-ной примесью оксида неодима (Nd₂O₃). Структура представляла собой кольцевой резонатор с двумя направленными ответвителями (рис.6). Один из вспомогательных волноводов использовался для ввода и вывода из-

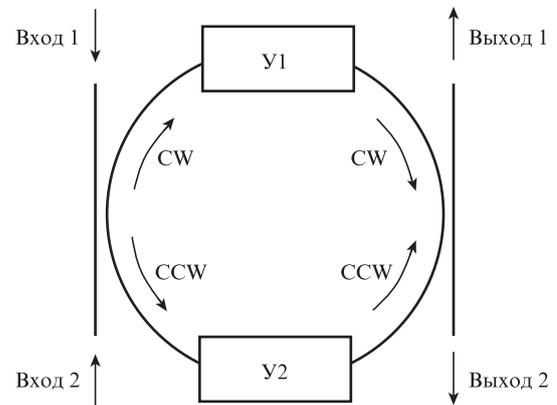


Рис.5. ПКР с интегрированными в него полупроводниковыми оптическими усилителями [11].

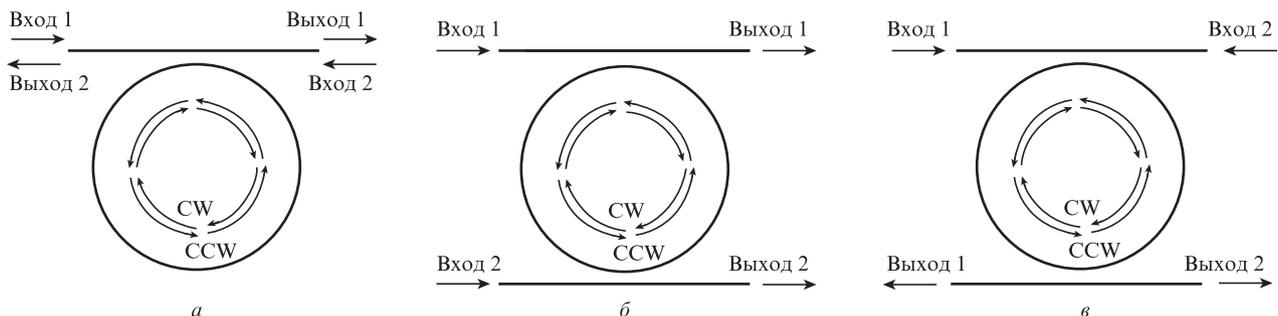


Рис.4. Конфигурации датчиков на основе ПКР.

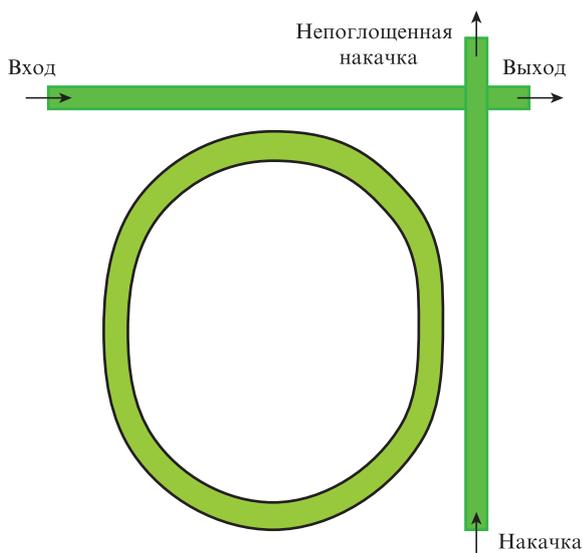


Рис.6. Резонатор с равномерно распределенной компенсацией потерь [12].

мерительного сигнала, другой – для накачки резонатора. Резонатор был составлен из двух полуколец с радиусами $R = 8$ мм, соединенных прямыми отрезками волновода длиной $L \sim 3$ мм. Резонатор-усилитель работал на длине волны 1.06 мкм. Для накачки использовался полупроводниковый лазер (150 мВт, 0.83 мкм). Благодаря компенсации потерь авторам [12] удалось повысить добротность резонатора более чем в 20 раз: с 8.32×10^5 (без накачки) до 1.89×10^7 (с накачкой).

2.2. МОГи, в которых используются амплитудная и фазовая характеристики многолучевого кольцевого интерферометра

Как уже отмечалось, большинство разработанных на сегодняшний день прототипов МОГов относится к резонаторному типу и предполагают использование только амплитудной характеристики многолучевого кольцевого интерферометра для определения разности собственных частот ПКР, пропорциональной угловой скорости. Однако при вращении интерферометра происходит расщепление не только его амплитудной, но и фазовой характеристики. Результаты анализа характеристик кольцевого интерферометра показывают, что фазовая характеристика имеет отличительные особенности около собственных частот резонатора [13]. А поскольку разность собственных частот пропорциональна скорости вращения (см. (2)), то фазовую характеристику можно использовать для ее определения. Недавно был разработан способ определения угловой скорости с использованием фазовой и амплитудной характеристик многолучевого кольцевого интерферометра [5]. Принцип работы и схема такого МОГа близки к резонаторному МОГу, но, в отличие от последнего, в рассматриваемом варианте каждый исходный пучок дополнительно делится на две части. С помощью ПКР изменяют параметры только одной из частей каждого исходного пучка. При этом на фотоприемники направляют как часть пучка, прошедшую через ПКР (измерительный сигнал), так и оставшуюся часть исходного пучка (опорный сигнал). Реализовать это можно, заменив в схеме на рис.2 направленный ответвитель 9 интерферометром Маха–Цендера. Таким образом, опорные сигналы и сиг-

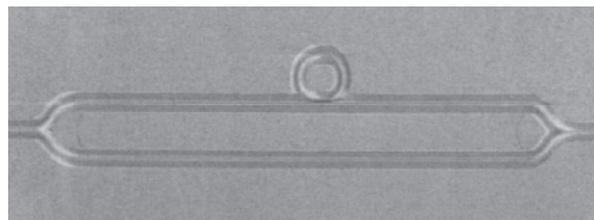


Рис.7. Волноводный интерферометр Маха–Цендера с ПКР в одном из плеч [14].

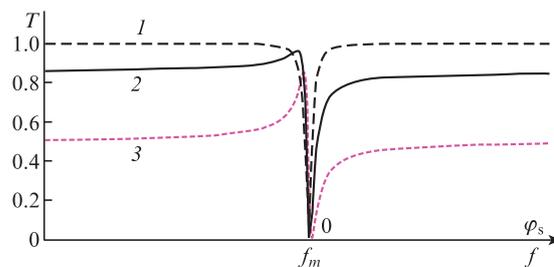


Рис.8. Относительная интенсивность излучения на фотоприемнике (коэффициент пропускания оптической системы $T = I/I_{in}$) при разности оптических длин опорного и измерительного плеч интерферометра Маха–Цендера, равной $\lambda_m N$ (1), $\lambda_m(N + 1/8)$ (2) и $\lambda_m(N + 1/4)$ (3); N – целое число.

налы измерительной информации будут разделяться и объединяться при помощи Y-образных разветвителей, образующих волноводный интерферометр Маха–Цендера (рис.7). При этом опорные и измерительные сигналы будут проходить по разным плечам интерферометра, а его измерительное плечо будет содержать ПКР.

Когда разность оптических длин опорного и измерительного плеч интерферометра Маха–Цендера пропорциональна целому числу длин волн λ_m , собственные частоты кольцевого резонатора соответствуют минимумам интенсивности оптического излучения (коэффициента пропускания оптической системы). По минимумам сигналов с фотоприемников вычислительная система $И$ определяет собственные частоты, а затем их разность Δf , пропорциональную угловой скорости. Если же указанная разность оптических длин не пропорциональна целому λ_m , форма выходной характеристики изменяется (рис.8).

Видно, что при любой разности оптических длин путей сохраняется возможность определения резонансных частот по характерным изменениям интенсивности регистрируемого излучения вблизи собственных частот резонатора. При сравнительно низких потерях в резонаторе кольцевого интерферометра использование фазовой характеристики позволяет увеличить предельную чувствительность микрооптического гироскопа на порядок [15].

2.3. Интерференционный МОГ

В качестве чувствительного элемента в интерференционном МОГе выступает многовитковая спиралевидная волноводная катушка, образующая двухлучевой интерферометр (в отличие от МОГов на ПКР, в которых используется многолучевой интерферометр). Принцип работы интерференционного МОГа такой же, как и обычного (интерференционного) ВОГа. Излучение заводится в катушку во взаимно противоположных направлениях, обходит ее и интерферирует на фотоприемнике. Сдвиг интерференционной картины пропорционален скорости

вращения, при этом точность измерения угловой скорости интерференционным МОГом зависит от длины катушки не однозначно. При малых размерах интерферометра (диаметр несколько сантиметров и менее) удельные потери намного больше, чем у обычного ВОГа, поскольку чем больше длина спиралевидного волновода, тем меньше энергии доходит до фотоприемника, и при достижении определенной критической длины спирали дальнейшее ее увеличение приводит не к росту, а к снижению чувствительности прибора. В работе [16] исследована зависимость оптимальной длины спирали (с точки зрения максимизации точности) от потерь. Так, при потерях 0.02 дБ/см оптимальная длина резонатора составила около 4.3 м.

На рис.9 показана конфигурация интерференционного МОГа, предполагающая использование достаточно широкополосного (с длиной когерентности, немногим большей длины спиралевидного волновода) источника света для минимизации влияния обратного рассеяния в волноводе на результаты измерений. Фотоприемник на входе используется для контроля интенсивности входного излучения, а другой фотоприемник – для выходного сигнала. Рассмотренная конфигурация интерференционного гироскопа относительно недавно исследовалась в статье [17]. Анализировался гироскоп со спиралевидным резонатором длиной 10 м с шагом спирали 50 мкм и минимальным радиусом изгиба 1 мм. Предельная чувствительность такого гироскопа (площадь около 10 см²) составила 19 °/ч при потерях 1 дБ/м. При снижении потерь до 0.1 дБ/м чувствительность возрастает до 4.2 °/ч.

Также известны конфигурации интерферометрических МОГов, в которых вместо волноводной спиральной катушки используется кольцевой волновод (кольцевой резонатор) [18, 19], служащий не резонатором, а линией задержки. Регистрируется результат интерференции двух волн, обходящих замкнутый контур во взаимно противоположных направлениях (рис.10). Пучок от источника света ИС делится направленным ответвителем НО1 на две части и проходит через модуляторы М1 и М2, которые создают управляемый фазовый сдвиг между встречными волнами. Излучение вводится в кольцевой волновод через направленный ответвитель НО2 в направлении

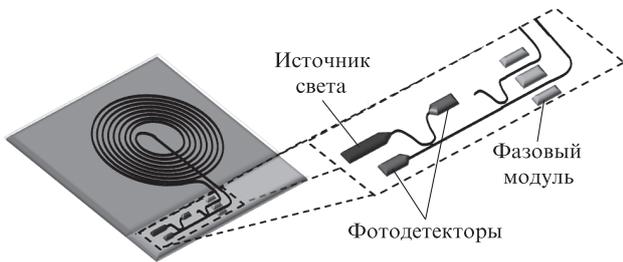


Рис.9. Интерференционный МОГ со спиралевидной волноводной катушкой [17].

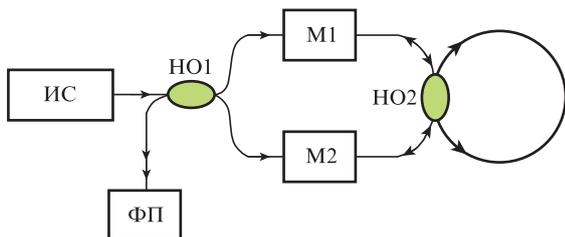


Рис.10. Интерференционный МОГ с кольцевым волноводом [18].

по и против часовой стрелки. Обошедшие волновод сигналы выводятся из него и направляются на фотоприемник ФП, который регистрирует их двухлучевую интерференцию. Волновод в данном случае играет роль многовитковой катушки, эквивалентное число витков которой N соответствует числу обходов световой волной ПКР. Число обходов определяется потерями в волноводе и его периметром. Для того чтобы световые потоки, приходящие после разного количества обходов, не перекрывались друг с другом (во избежание многолучевой интерференции), используется импульсная фазовая модуляция, причем ширина импульса выбирается равной времени обхода светом контура, а период частоты повторения в $N + 1$ раз больше [18].

МОГ, схема которого показана на рис.10, относится к МОГам отражающего типа. Возможны также МОГи пропускающего типа. Интерференционные конфигурации МОГов, в которых вместо спиралевидной волноводной катушки используется замкнутый волновод, иногда называют интерференционно-резонаторными, или возвратными.

3. Классификация пассивных МОГов по устройству их чувствительного элемента

Основным элементом микрооптического гироскопа является ПКР. Именно им определяются технология изготовления всего прибора, предельная чувствительность, минимальные габариты и многие другие характеристики гироскопа. Пассивные МОГи можно разделить по устройству их чувствительного элемента (рис.11).

3.1. Планарные резонаторы

Большинство экспериментальных установок и прототипов пассивных МОГов проектируются и изготавливаются из элементов, произведенных с использованием планарной (интегральной) оптики. Это обусловлено тем, что применение технологий интегральной оптики позволяет снизить вес, габариты, потребление энергии, стоимость прибора и облегчает контроль температуры. Кроме того, гироскопы в планарном исполнении могут быть изготовлены в виде единой интегрально-оптической схемы, что повышает надежность прибора.

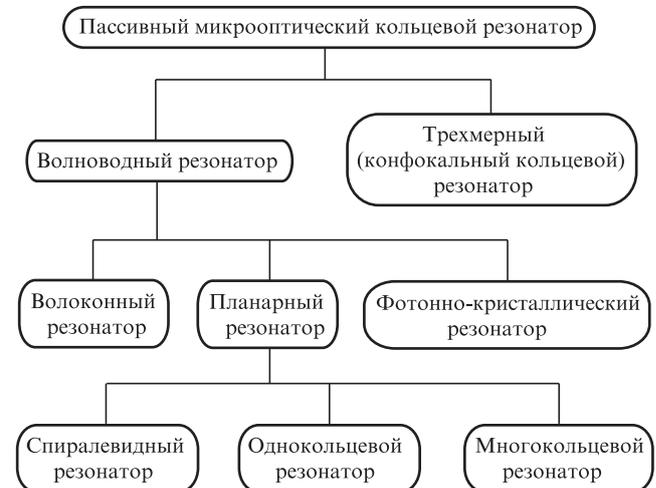


Рис.11. Классификация МОГов по устройству чувствительных элементов.

3.1.1. Однокольцевые резонаторы. Чаще всего в пассивных МОГах в качестве чувствительного элемента используются высокодобротные ($Q > 10^5$) резонаторы, состоящие из одного замкнутого одномодового волновода с диаметром от нескольких сантиметров и менее (однокольцевые резонаторы). При этом чувствительность гироскопа фактически определяется добротностью резонатора (потерями в резонаторе) и его площадью [4]. На сегодняшний день волноводные высокодобротные кольцевые резонаторы изготавливают из различных материалов: оксида кремния на кремнии (SOS), нитрида кремния (Si_3N_4), ниобата лития (LiNbO_3), стекла, фосфида индия (InP), полимеров и т. д.

Достичь очень низких потерь в кольцевом резонаторе позволяет, например, применение SOS-технологии. Для формирования SOS-волноводов обычно используются методы парофазного химического осаждения, осаждения пламенным гидролизом или ВЧ плазменное химическое парофазное осаждение в сочетании с методами ионного травления. При использовании SOS-технологии были получены резонаторы с потерями менее 0.01 дБ/см и добротностью более 10^7 [20]. Позже возможности SOS-структуры были продемонстрированы в работе [21]. Предельная чувствительность гироскопа на основе SOS-резонатора оказалась равной 1.6 °/ч.

Известны и другие технологии, позволяющие получить изогнутые волноводы с малыми потерями. Например, подходящие для МОГов резонаторы можно получить при помощи ионного обмена в стекле или диффузии титана в LiNbO_3 . С точки зрения минимизации потерь эти материалы несколько уступают SOS. Однако процесс изготовления стеклянных волноводов путем ионного обмена проще и дешевле, а также позволяет ввести в волновод специальные примеси (например, Nd_2O_3), необходимые для компенсации потерь [12]. Аналогичные преимущества имеют волноводы из LiNbO_3 [22].

Относительно недавно вышло несколько публикаций о высокодобротных резонаторах из Si_3N_4 на кремниевой подложке (см., напр., [23, 24]). В работе [23] исследуется добротность кольцевых резонаторов из Si_3N_4 на различных длинах волн. При ширине 5.3 мкм, толщине 50 нм и радиусе кольцевого волновода 5 мм добротности резонаторов составили 1×10^6 , 28×10^6 и 19×10^6 для длин волн 1550, 1310 и 1060 нм соответственно. Позже в [24] исследовался резонатор, образованный кольцевым волноводом шириной 7 мкм, толщиной 45 нм и радиусом 9.8 мм. Его добротность составила 3.5×10^7 .

Еще одним материалом, который может использоваться при создании чувствительных элементов МОГов, является InP. В [25] впервые был продемонстрирован кольцевой резонатор с добротностью $\sim 10^6$, состоящий из кольцевого InGaAsP-волновода шириной 2 мкм, толщиной 0.3 мкм и радиусом 13 мм, расположенного на подложке из InP. Резонатор был изготовлен с использованием методов металлоорганической газовой эпитаксии, фотолитографии и реактивного ионного травления. По оценкам авторов [25] предельная чувствительность гироскопа на основе полученного резонатора составила 10 °/ч.

Для создания пассивных кольцевых резонаторов могут применяться и другие материалы, например некоторые полимеры. Использование полимерных материалов позволяет снизить стоимость производства интегрально-оптических приборов. Однако большинство полимеров не подходит для изготовления из них чувствительных эле-

ментов МОГов из-за высоких потерь света. В работе [26] рассматривается резонатор на полимерной основе с добротностью $\sim 10^5$. Ширина, толщина и радиус кривизны кольцевого волновода составляли 0.5 мкм, 0.5 мкм и 5 мм соответственно. Предельная чувствительность МОГов на основе современных полимерных ПКР ограничена десятками °/ч.

3.1.2. Многокольцевые резонаторы. В последнее время микрооптические многокольцевые резонаторы все чаще рассматривают в качестве чувствительного элемента МОГа [27–38]. При этом различают две базовые структуры. Первая (рис.12,а) представляет собой цепочку оптически связанных резонаторов (далее цепочкообразный резонатор), вторая (рис.12,б) состоит из нескольких кольцевых резонаторов, оптически связанных с одним вспомогательным волноводом (далее бусообразный резонатор).

Как правило, цепочкообразные резонаторы состоят из массива высокодобротных миниатюрных (диаметром от нескольких до десятков мкм) ПКР. Соседние резонаторы массива туннельно связаны друг с другом, что объединяет всю структуру в единый волновод (так называемый CROW). Единая точка зрения относительно чувствительности гироскопов на основе таких структур в настоящее время отсутствует. Существует мнение, что она не превышает чувствительности МОГа на однокольцевом резонаторе с той же, что и у цепочкообразного резонатора, площадью [27, 28]. Однако есть работы, в которых явно или неявно говорится обратное [29–31]. Сравнение чувствительностей МОГов на этих резонаторах осложняется огромным многообразием цепочкообразных структур [32, 33].

Известны различные конфигурации гироскопов на основе цепочкообразных резонаторов. Часто исследуется простейшая конфигурация, показанная на рис.13,а [29, 30, 34]. Также большое внимание уделяется структуре, состоящей из цепочки одинаковых ПКР, изогнутых по дуге (рис.14), с одинаковыми коэффициентами связи. Вспомогательные волноводы, оптически связанные с крайними резонаторами, оканчиваются направленными ответвителями. Входной сигнал разделяется ответвителем на две волны, обходящие резонатор по встречным направлениям. Возвратившись на ответвитель, встречные волны интерферируют и направляются на выход из структуры [31]. В датчике используется интерферометрическая схема подключения чувствительного элемента. Предельная чувствительность гироскопа на основе такой структуры, состоящей из девяти колец радиусом 25 мкм, составляет около 1 °/ч, причем для достижения такого значения добротность каждого кольцевого резонатора должна быть рав-

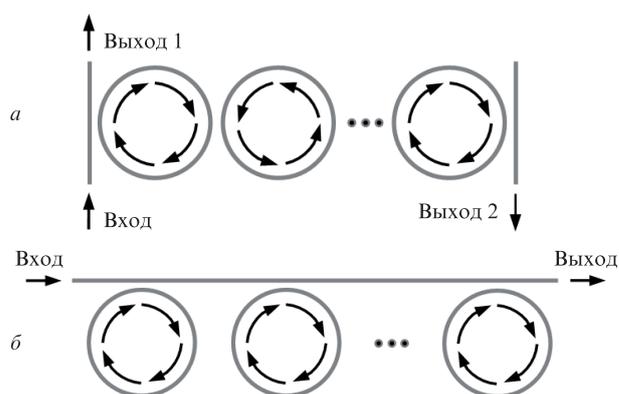


Рис.12. Цепочкообразный (а) и бусообразный (б) резонаторы.

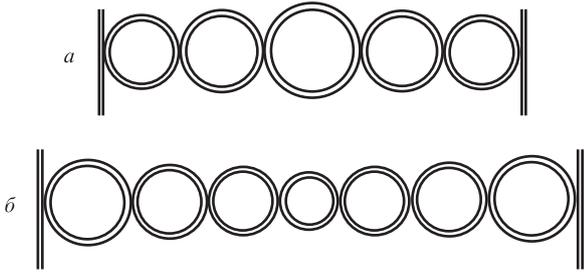


Рис.13. Цепочкообразный резонатор из ПКР, отличающихся друг от друга на целое число длин волн, с периметром резонаторов, равномерно уменьшающимся (а) и увеличивающимся (б) от центра к периферии [32].

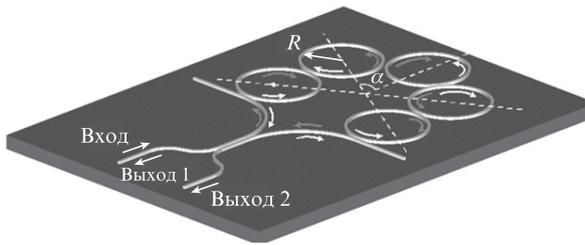


Рис.14. Датчик на основе цепочкообразного резонатора [31].

на $\sim 10^7$. Однако типичная для микрооптических волноводных кольцевых резонаторов радиусом 25 мкм добротность $10^4 - 10^5$ значительно снижает чувствительность датчика [35].

В схеме, рассмотренной в [33], одинаковые оптически связанные кольцевые резонаторы выстроены в прямую линию. Коэффициенты связи между волноводами различны (принимают одно из двух значений) и чередуются, начиная от центра, как показано на рис.15 (темными прямоугольниками обозначена более сильная, а светлыми – менее сильная оптическая связь). Такое распределение коэффициентов связи, в отличие от равномерного, позволяет увеличить чувствительность прибора к вращению на несколько порядков. Авторы работы [33] отмечают, что при использовании такой конфигурации можно получить предельную чувствительность МОГа 0.002 °/ч (CROW из 21 кольца с радиусами 50 мкм).

Интерес представляют также конфигурации цепочкообразных резонаторов, составленные из ПКР разного размера [32,36]. В работе [32] сравниваются структуры, состоящие из идентичных резонаторов (рис.12,а) и аналогичные массивы, составленные из резонаторов различного размера (рис.13). Рассматриваемые конфигурации включают в себя нечетное число ПКР, симметричных относительно центра структуры. Периметры двух любых соседних резонаторов различаются на целое число длин волн. Такие конфигурации, по сравнению со стандартной (рис.12,а), позволяют повысить чувствительность к вращению. Так, чувствительность прибора из пяти связанных резонаторов с периметрами, отличающимися друг от

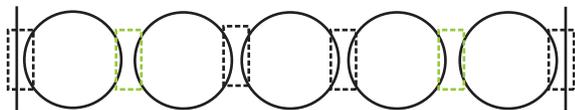


Рис.15. Цепочкообразный резонатор с чередующимися значениями коэффициента связи [33].

друга на λ , соответствует чувствительности гироскопа стандартной структуры из 35 резонаторов [32].

Тем не менее, несмотря на многообещающие результаты теоретических расчетов, существует ряд проблем, связанных с реализацией на практике гироскопов с цепочкообразными резонаторами. Дело в том, что при изготовлении таких структур неизбежны случайные отклонения размеров кольцевых резонаторов и коэффициентов связи между ними. При этом чувствительность гироскопа на цепочкообразных резонаторах при вариациях коэффициентов связи не меняется, но даже небольшие колебания размеров кольцевых резонаторов существенно снижают ее [30].

Другой тип многокольцевых (бусообразных) резонаторов не столь чувствителен к колебаниям размеров составляющих его ПКР: колебания в пределах 0.1 мкм практически не влияют на чувствительность структуры [37]. Рассмотрим насколько варианты таких резонаторов. Теоретически рассмотренная в [38] бусообразная структура состояла из вспомогательного волновода, изогнутого в форме кольца, и большого числа высокодобротных микрооптических резонаторов, расположенных с двух сторон от вспомогательного волновода (рис.16,а), оба конца которого использовались для ввода и вывода сигнала. В качестве составляющих структуру высокодобротных микрооптических резонаторов авторы предлагали использовать резонаторы типа «шепчущей галереи».

Еще одна схема компактной бусообразной структуры, предназначенной для измерения угловой скорости, представлена в [37]. В отличие от предыдущей, в ней все кольцевые резонаторы связаны только с одной стороной вспомогательного волновода (рис.16,б). К сожалению, данных о предельной чувствительности гироскопов на основе рассмотренных структур в [37, 38] не приводится.

Большинство наиболее перспективных конструкций многокольцевых резонаторов на практике пока не реализованы. Но последние теоретические работы [27–36] показали, что предельная точность гироскопов на основе таких резонаторов может быть на несколько порядков выше, чем у микромеханических систем сравнимых размеров.

3.1.3. Спиралевидные резонаторы. Еще одним перспективным типом чувствительного элемента МОГа является спиралевидный волноводный резонатор. Идея использовать спиралевидную волноводную катушку для создания дешевого и компактного гироскопа появилась относительно давно [4]. Однако до недавнего времени данный тип резонаторов активно не исследовался. Это связано с тем, что изготовление высокодобротной миниатюрной спиралевидной волноводной катушки представляет со-

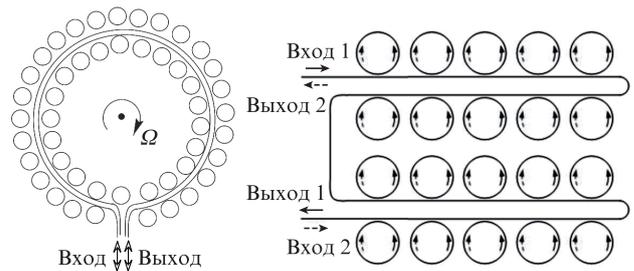


Рис.16. Бусообразные структуры, в которых ПКР размещены по обоим сторонам (а) [38] и только с одной стороны (б) [37] вспомогательного волновода.

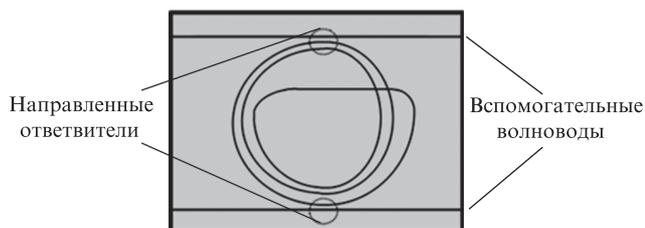


Рис.17. Датчик на основе спиралевидного ПКР [39].

бой весьма сложную технологическую задачу и возможно только с применением современных интегрально-оптических технологий.

Рассмотрим две конфигурации спиралевидного резонатора [17, 39]. Первая (рис.9) представляет собой двухлучевой резонатор. Концы спиралевидного волновода образуют направленный ответвитель. Коэффициент связи между ними должен быть близок к 50%, что обеспечивает наибольшую чувствительность гироскопа к вращению. Предельная чувствительность гироскопа на основе волноводного спиралевидного резонатора составила $19\text{ }^\circ/\text{ч}$ [17]. Также рассматривался вариант резонатора, состоящего из нескольких слоев последовательно соединенных спиралевидных волноводов, уложенных стопкой друг на друга и соединенных при помощи вертикальных направленных ответвителей. Такая конструкция позволяет уменьшить площадь, занимаемую датчиком. Однако при ее применении увеличиваются потери в резонаторе за счет потерь, возникающих при переходах света между соседними слоями (0.02 дБ за один переход), что снижает чувствительность прибора [17]. В будущем, вследствие развития интегрально-оптических технологий, потери света на переход между слоями могут быть существенно снижены, и использование многослойной топологии может стать оправданным.

Спиралевидный волноводный резонатор другой конфигурации (рис.17) является многолучевым кольцевым резонатором [39]. Исследовалась схема, состоящая из ПКР в виде спиралевидного замкнутого волновода и двух вспомогательных замкнутого волновода, связанных с ним направленными ответвителями. Использовались одномодовые (сечение $6 \times 6\text{ мкм}$) кремниевые волноводы с примесью германия ($n = 1.457$). Длина спиралевидного волновода была равна 42 см, площадь занятого им на подложке участка – 20 см². Потери на распространение в замкнутом волноводе составляли 0.1 дБ/см, а дополнительные потери из-за пересечения спирали – менее 0.01 дБ. Экспериментально определенная добротность описанного резонатора превысила 1.5×10^6 , что соответствует чувствительности гироскопа на его основе $156\text{ }^\circ/\text{ч}$. Отмечено [39], что чувствительность такого датчика можно повысить до $10\text{ }^\circ/\text{ч}$, если снизить потери на распространение в спиралевидном волноводе до 0.05 дБ/см (в настоящее время это достижимо) и потери ввода/вывода до 1–2 дБ (типичное значение).

3.2. Фотонно-кристаллический резонатор

Фотонные кристаллы – это материалы с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн в видимом и ближнем ИК диапазонах. Любая неоднородность в фотонном кри-

сталле называется дефектом. В таких областях сосредотачивается электромагнитное поле, что используется в микрорезонаторах и волноводах, построенных на основе фотонных кристаллов [40].

Высокодобротный фотонно-кристаллический ПКР может быть изготовлен из различных видов одномерных фотонных кристаллов. В работе [41] рассматривается ПКР, выполненный по SOS-технологии и представляющий собой кольцевую брэгговскую дифракционную решетку (рис.18,а). Расчеты показали, что при современном уровне развития интегральной оптики можно изготовить такие резонаторы с диаметром около 5 см и добротностью более 10^9 . Другой вид одномерных фотонных кристаллов, из которых может быть изготовлен ПКР, представляет собой замкнутый планарный полупроводниковый волновод, перфорированный одномерной периодической системой отверстий (рис.18,б) [42].

Весьма перспективна для изготовления высокодобротных ($Q > 10^6$) микрооптических ПКР фотонно-кристаллическая структура, представляющая собой планарный полупроводниковый волновод, перфорированный периодической двумерной системой отверстий. Также легко сформировать фотонно-кристаллический ПКР, введя в структуру дефект в форме равностороннего шестиугольника (рис.19), толщина и размер которого определяют состав собственных мод и добротность резонатора [45].

Аналитическое исследование проявления эффекта Саньяка в фотонно-кристаллических резонаторах выявило [46], что его вращение вызывает расщепление резонансных частот встречных волн. Оценка величины эффекта для конкретных фотонных кристаллов показала, что масштабный коэффициент в них ($1.6 \times 10^{-2}\text{ рад/с}$) много меньше, чем для пассивных МОГов (расчеты проводились для фотонно-кристаллического ПКР с радиусом около 0.93 мкм и добротностью 10^4). В работе [46] отмечено, что чувствительность таких резонаторов пока недостаточна для практической реализации МОГов. Однако на сегодняшний день разработаны фотонно-кристаллические ПКР

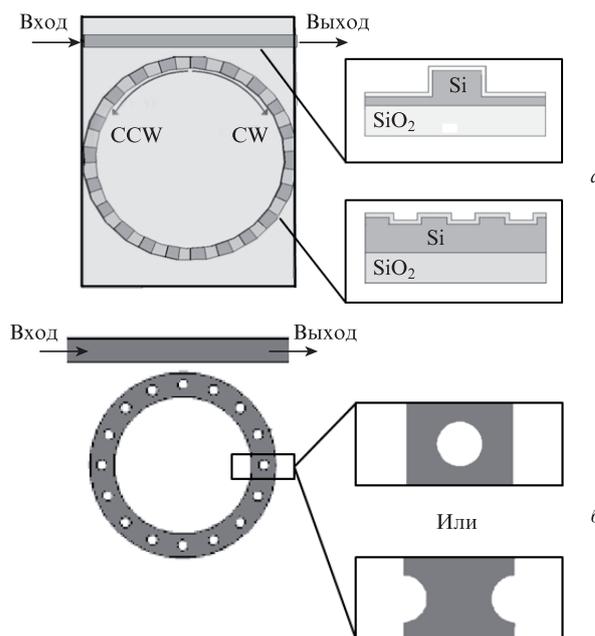


Рис.18. Фотонно-кристаллические одномерные ПКР в виде замкнутой брэгговской дифракционной решетки (а) [44] и замкнутого перфорированного волновода (б) [43].

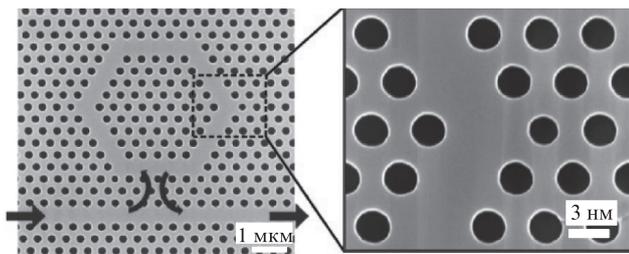


Рис.19. Фотонно-кристаллический ПКР [45].

с гораздо большей добротностью ($Q > 10^6$) [41, 45], причем размер такого резонатора также может быть увеличен. В связи с этим фотонно-кристаллические ПКР являются перспективными чувствительными элементами для МОГов.

3.3. Петлеобразный резонатор

Классические волоконные резонаторы (многовитковая волоконная катушка) не подходят в качестве чувствительного элемента МОГа, что обусловлено резким ростом потерь в них резонаторах при уменьшении диаметра катушки до нескольких сантиметров и менее. Однако относительно недавно был разработан, изготовлен и исследован компактный высокодобротный волоконный ПКР [47], представляющий собой миниатюрную версию волоконного резонатора, который был разработан еще в 1982 г. [48] и состоял из одного витка одномодового волокна, соединенного концами с направленным ответвителем (рис.20,а). Особенность миниатюрной версии заключается в том, что роль направленного ответвителя выполняет область резонатора, на которой совмещаются участки волокна (рис.20,б).

На сегодняшний день созданы микрооптические волоконные резонаторы с радиусом около 0.5 мм и добротностью более 6×10^6 при диаметре волокна ~ 1 мкм (рис.21). Процесс производства таких резонаторов состоит из вытягивания микроволокна и скручивания его в оптически связанную петельку. Вытягиваемое микроволокно помещается внутрь сапфирового капилляра, который нагревается пучком излучения промышленного лазера (например, CO₂-лазера). В такой микроскопической печи волокно вытягивают до тех пор, пока его диаметр не достигнет требуемой величины (~ 1 мкм или менее) (рис.22,а). Затем при помощи нескольких манипуляторов волокно скручивают в оптически связанную петельку (рис.22,б). Совместить концы петельки помогают поверхностные силы (ван-дер-ваальсовы и электростатические).

Для защиты от механических воздействий такой резонатор может быть покрыт полимером с низким показателем преломления [49]. Достоинствами микрооптических волоконных петлеобразных резонаторов по сравнению с

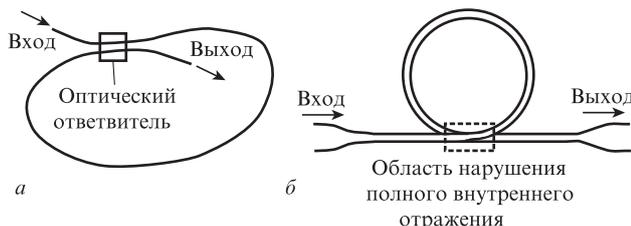


Рис.20. Петлеобразный ПКР в макрооптическом (а) [48] и микрооптическом (б) [47] исполнении.

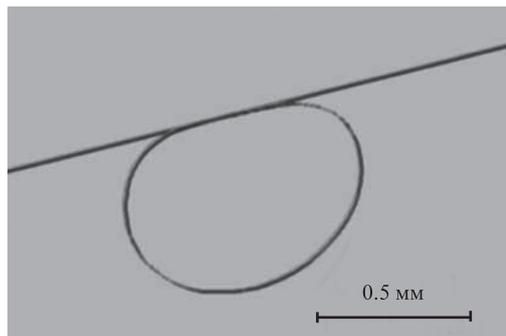


Рис.21. Микрооптический волоконный резонатор [47].

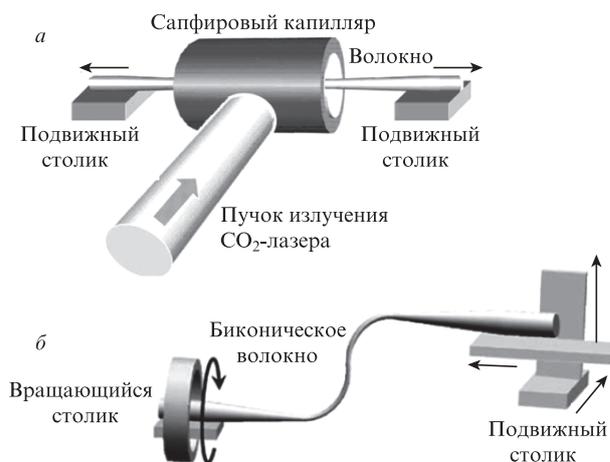


Рис.22. Изготовление микрооптических волоконных резонаторов [47] методами вытягивание волокна (а) и скручивания микрооптического петлеобразного резонатора (б).

волноводными являются малая трудоемкость и низкая стоимость их изготовления.

3.4. Кольцевой конфокальный резонатор

В большинстве статей, посвященных МОГам, в качестве подходящих чувствительных элементов рассматриваются преимущественно планарные одномодовые волноводные резонаторы. Как и во всех пассивных оптических гироскопических системах, использование многомодовых волноводов в этом случае невозможно из-за дисперсии мод. По той же причине нельзя использовать большинство трехмерных резонаторов. Тем не менее можно реализовать кольцевой конфокальный резонатор – трехмерный ПКР, фокальные точки которого будут совмещены, а его спектр будет характеризоваться вырождением частот его высших поперечных мод (набором эквидистантно распределенных мод) [50]. Резонатор, обладающий такими свойствами, может служить чувствительным элементом МОГа.

В параксиальном приближении можно получить кольцевой конфокальный резонатор с помощью плоских и вогнутых торообразных отражающих поверхностей [51]. Однако при расчете микрооптического резонатора использовать параксиальное приближение недопустимо. При непараксиальном подходе кольцевой конфокальный резонатор можно получить с помощью плоских и вогнутых параболических астигматических отражающих поверхностей [51]. Одна из возможных его конфигураций приведена на рис.23. Отражающие поверхности 1, 3 и 4 яв-

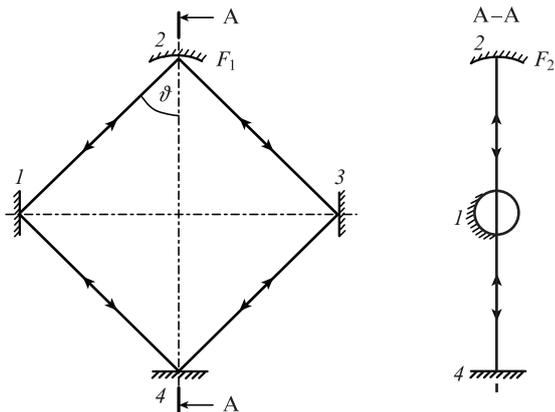


Рис.23. Кольцевой конфокальный резонатор.

ляются плоскими; 2 – параболические астигматические отражающие поверхности с различными главными фокусными расстояниями: $F_1 = 2a/\cos\theta$ в плоскости падения и $F_2 = 2a\cos\theta$ в ортогональной плоскости.

Таким образом, трехмерный пассивный кольцевой резонатор может быть использован в качестве чувствительного элемента микрооптического гироскопа вместо кольцевого планарного одномодового резонатора. Конфокальный резонатор обладает некоторыми преимуществами перед планарным. При малых размерах резонатора (диаметр несколько сантиметров и менее) планарный кольцевой резонатор характеризуется большими потерями, т.к. из-за большой кривизны кольцевого волновода нарушается полное внутреннее отражение. Потери кольцевого конфокального резонатора при уменьшении его размера не увеличиваются. При диаметре резонатора в несколько сантиметров его потери на один-четыре порядка меньше (в зависимости от качества исполнения отражающих поверхностей). Недостаток кольцевого конфокального резонатора – относительно сложная технология изготовления его параболической астигматической отражающей поверхности. Изготовить такой резонатор можно, например, с помощью технологии алмазного точения.

4. Заключение

Представлен обзор современного состояния разработки пассивных МОГов. В течение последнего десятилетия основные усилия в области их разработки были сконцентрированы на схеме, основанной на использовании пассивного кольцевого одномодового резонатора, который, как правило, изготавливается с применением технологии интегральной оптики. Были рассмотрены и другие технологии, позволяющие изготовить пассивные резонаторы, подходящие для МОГов. На сегодняшний день уже изготовлено и исследовано несколько прототипов микрооптических гироскопов. Анализ современного состояния разработок МОГов позволяет надеяться на то, что в течение ближайших десяти лет на рынке появятся микрооптические датчики с чувствительностью порядка $10^\circ/\text{ч}$ и менее.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант РФФ № 14-19-00693). В.Ю.В. является также исполнителем базовой части госзадания Минобрнауки РФ «Организация и проведение научных исследований».

1. Ciminelli C., Dell'Olio F., Campanella C.E., Armenise M.N. *Adv. Opt. Photon.*, **2** (3), 370 (2010).

2. Culshaw B. *Meas. Sci. Technol.*, **17** (1), R1 (2006).
 3. Liu K., Zhang W., et al. *J. Micromech. Microeng.*, **19**, 113001 (2009).
 4. Боронахин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.Ф. *Оптические и микромеханические инерциальные приборы* (СПб.: ЭЛмор, 2008).
 5. Венедиктов В.Ю., Филатов Ю.В., Шалымов Е.В. *Квантовая электроника*, **44** (12), 1145 (2014).
 6. Liang N., Lijun G., et al. *J. Semicond.*, **35** (12), 124008 (2014).
 7. Vannahme C., Suche H., Reza S., Ricken R., Quiring V., Sohler W. *Proc. Europ. Conf. Integrated Optics* (WEI, 2007).
 8. Chevalier J.R. European Patent, EP 0744594 (1996).
 9. Strandjord L.K., Salit M.K. European Patent, EP 2813815 (2014).
 10. Feng L., Wang J., Zhi Y., et al. *Opt. Express*, **22** (22), 27565 (2014).
 11. Ciminelli C., Peluso F., Armenise M.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5728**, 93 (2005).
 12. Hsiao H.K., Winick K.A. *Opt. Express*, **15** (26), 17783 (2007).
 13. Filatov Y.V., Shalymov E.V., Venediktov V.Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9141**, 91411B (2014).
 14. Absil P.P., Hryniewicz J.V., Little B.E., Wilson R.A., Joneckis L.G., Ho P.-T. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12** (4), 398 (2000).
 15. Venediktov V.Y., Filatov Y.V., Shalymov E.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9506**, 95061N (2015).
 16. Wei W., Junlei X., Yuxin X. *Proc. IEEE*, **10478339**, 1 (2008).
 17. Srinivasan S., Moreira R., et al. *Opt. Express*, **22** (21), 24988 (2014).
 18. Zhang Y.S., Ding H.G. *Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Ser. Priborostroeniye*, **2005** (4), 109 (2005).
 19. Carroll R. United States Patent, US 5420684 (1995).
 20. Adar R., Serbin M.R., Mizrahi V. *J. Lightwave Technol.*, **12** (8), 1369 (1994).
 21. Guo L., Shi B., Chen C., Zhao M. *Optik*, **123** (4), 302 (2012).
 22. Das B., Ricken R., Quiring V., et al. *Opt. Lett.*, **29** (2), 165 (2004).
 23. Tien M.C., Bauters J.F., Heck M.J.R., Spencer D.T., Blumenthal D.J., Bowers J.E. *Opt. Express*, **19** (14), 13551 (2011).
 24. Spencer D.T., Tang Y., Bauters J.F., Heck M.J.R., Bowers J.E. *Proc. IEEE*, **13149871**, 141 (2012).
 25. Ciminelli C., Dell'Olio F., Armenise M.N., Soares F.M., Passenberg W. *Opt. Express*, **21** (1), 556 (2013).
 26. Qian G., Tang J., Zhang X.Y., Li R.Z., Lu Y., Zhang T. *J. Nanomater.*, **2014**, 146510 (2014).
 27. Terrel M.A., Dignonnet M.J.F., Fan S. *J. Lightwave Technol.*, **27** (1), 47 (2009).
 28. Terrel M.A., Dignonnet M.J.F., Fan S. *Laser Photon. Rev.*, **3** (5), 452 (2009).
 29. Kalantarov D., Search C.P. *Opt. Lett.*, **39** (4), 985 (2014).
 30. Florio F., Kalantarov D., Search C.P. *J. Lightwave Technol.*, **32** (21), 4020 (2014).
 31. Scheuer J., Yariv A. *Phys. Rev. Lett.*, **96** (5), 053901 (2006).
 32. Toland J.R.E., Kaston Z.A., et al. *Opt. Lett.*, **36** (7), 1221 (2011).
 33. Sorrentino C., Toland J.R.E., Search C.P. *Opt. Express*, **20** (1), 354 (2012).
 34. Peng C., Li Z., Xu A. *Opt. Express*, **15** (7), 3864 (2007).
 35. Armenise M.N., Ciminelli C., Dell'Olio F., Passaro V.M.N. *Advances in Gyroscope Technologies* (Heidelberg: Springer, 2010).
 36. Zhang Y., Wang N., et al. *Phys. Lett. A*, **372** (36), 5848 (2008).
 37. Tian H., Zhang Y., Zhang X., Wu H., Yuan P. *Opt. Express*, **19** (10), 9185 (2011).
 38. Matsko A.B., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S., Maleki L. *Opt. Commun.*, **233** (1), 107 (2004).
 39. Ciminelli C., Dell'Olio F., Armenise M.N. *IEEE Photon. J.*, **4** (5), 1844 (2012).
 40. Akahane Y., Asano T., Song B.S., Noda S. *Nature*, **425** (6961), 944 (2003).
 41. Ciminelli C., Campanella E.C., Armenise M.N. *Europ. Patent*, EP 2917691 (2013).
 42. Goldring D., Levy U., Mendlovic D. *Opt. Express*, **15** (6), 3156 (2007).
 43. Zhang Y., Zeng C., Li D., Gao G., et al. *Opt. Lett.*, **39** (5), 27 (2014).
 44. Leonardi F.D., Campanella C.E., et al. *Sensors*, **14**, 16017 (2014).
 45. Zhang Y., Zeng C., Li D., Gao G., et al. *Opt. Lett.*, **39** (5), 1282 (2014).
 46. Steinberg B.Z., Boag A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24** (1), 142 (2007).
 47. Sumetsky M., Dulashko Y., Fini J.M., Hale A., DiGiovanni D.J. *J. Lightwave Technol.*, **24** (1), 242 (2006).
 48. Stokes L.F., Chodorow M., Shaw H.J. *Opt. Lett.*, **7** (6), 230 (1982).
 49. Xu F., Pruneri V., Finazzi V., Brambilla G. *Opt. Express*, **16** (2), 1062 (2008).
 50. Шалымов Е.В. *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, **4**, 64 (2015).
 51. Filatov Y.V., Sevryugin A.A., et al. *Opt. Eng.*, **54** (4), 044107 (2015).