

УДК 621.366.6

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В МОБИЛЬНЫХ ГРАВИМЕТРАХ И АКСЕЛЕРОМЕТРАХ

**И.В. Балакирева, П.С. Ананьев, М.Л. Восканов, А.А. Раков,
В.И. Павлов, Н.П. Хатырев, И.Ю. Блинов**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
balakireva@vniiftri.ru*

Одним из наиболее перспективных направлений развития современной навигации является создание систем, основанных на измерении параметров гравитационного поля Земли. Перспективной физической основой для создания датчиков гравитационного поля являются оптические резонаторы с модами шепчущей галереи в качестве чувствительного элемента гравиметра. В статье представлен обзор работ научных групп, исследующих возможность создания аппаратуры на оптических резонаторах с волнами шепчущей галереи для применения в навигационных устройствах по гравитационному полю.

Ключевые слова: гравитационное поле, оптические резонаторы, моды шепчущей галереи, мобильные гравиметры, акселерометры.

POSSIBILITY OF APPLYING THE OPTICAL RESONATORS WITH WHISPERING GALLERY MODES IN MOBILE GRAVIMETERS AND ACCELEROMETERS

**I.V. Balakireva, P.S. Ananey, M.L. Voskanov, A.A. Rakov, V.I. Pavlov,
N.P. Khatyrev, I.Yu. Blinov**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
balakireva@vniiftri.ru*

One of the most promising directions in the development of modern navigation is the development of systems based on measuring the parameters of the Earth's gravitational field. Optical resonators with whispering gallery modes as a sensitive element of a gravimeter are a promising physical basis for developing gravitational field sensors. The article provides an overview of the work of scientific groups investigating the possibility of developing equipment on the basis of optical resonators with whispering gallery waves for application in navigation devices by gravitational field.

Key words: gravitational field, optical resonators, whispering gallery modes, mobile gravimeters, accelerometers.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития в современной навигации является создание систем, основанных на измерении градиента гравитационного поля Земли. Гравитационное поле Земли невозможно исказить или перехватить, оно является стабильным и надежным ориентиром, поэтому разработка датчиков гравитационного поля является актуальной задачей. При этом наиболее важными параметрами датчиков, предназначенных для регистрации градиента гравитационного поля, являются высокая чувствительность и работоспособность при воздействии внешних влияющих факторов. Одним из перспективных вариантов датчиков гравитационного поля Земли являются устройства с использованием в качестве чувствительного элемента оптических резонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ - резонаторы).

МШГ - резонаторы представляют собой небольшие сферы, диски или кольца из оптического материала с характерными размерами порядка нескольких миллиметров или микрон в диаметре [1]. Лазерное излучение накачки распространяется внутри такого резонатора благодаря наличию полного внутреннего отражения от его внешней поверхности. Это излучение концентрируется в пределах тонкой кольцевой области пространства внутри резонатора около его границы с окружающей средой. Для ввода лазерного излучения в резонатор используется соединительный элемент, расположенный на небольшом расстоянии у внешней поверхности резонатора. В качестве такого элемента для ввода и вывода излучения в резонатор чаще всего используются призмы или растянутое оптическое волокно. Коэффициентом связи этих элементов с резонатором можно управлять, изменяя расстояние между ними. Увеличение зазора приводит к уменьшению так называемой добротности соединения Q_{ext} , что в свою очередь уменьшает суммарную добротность Q_{tot} . На выходе устройства это приводит к изменению параметров моды резонатора. Таким образом, регистрируя изменение моды, можно отслеживать изменение зазора между резонатором и соединительным элементом.

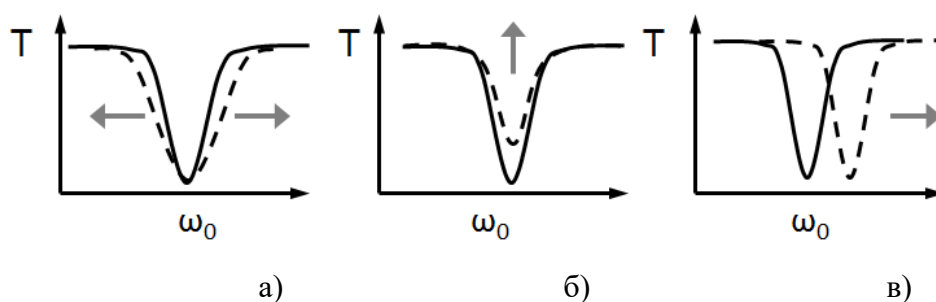


Рис. 1. Изменения моды резонатора: а) уширение; б) изменение амплитуды; в) сдвиг

1. МШГ резонаторы

МШГ резонаторы – это миниатюрные устройства в форме сферы, диска или кольца диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Для их изготовления используются различные материалы, такие как плавленый кварц, MgF_2 , CaF_2 , $LiNbO_3$, Al_2O_3 , и др. В качестве соединительного элемента с лазером чаще всего используются призмы, полированные и растянутые оптические волокна. Введённое в резонатор лазерное излучение из-за наличия полного внутреннего отражения распространяется внутри резонатора около его границ, образуя тонкое кольцо света. Набор частот, которые могут распространяться в резонаторе, называется собственными модами резонатора. Частоты собственных мод резонатора равноудалены друг от друга, а расстояние между ними в первую очередь зависит от диаметра резонатора и составляет десятки ГГц – единицы ТГц, поэтому МШГ резонаторы активно используются для генерации «оптических гребёнок» - набора квазиэквидистантных спектральных линий.

Основным параметром резонатора является добротность, характеризующая потери в резонаторе: чем меньше потерь в резонаторе, тем выше его добротность. В среднем в настоящее время практически достижимая добротность резонаторов составляет 10^8 - 10^9 [2]. Общая добротность Q_{tot} включает в себя добротность самого резонатора Q_{in} , характеризующую потери при распространении света внутри резонатора, и добротность соединения Q_{ext} , характеризующую потери на соединении:

$$\frac{1}{Q_{tot}} = \frac{1}{Q_{in}} + \frac{1}{Q_{ext}}.$$

При увеличении расстояния между соединительным элементом и резонатором увеличиваются потери, уменьшается Q_{ext} и, соответственно, Q_{tot} .

2. Моды резонатора

Мода резонатора имеет три параметра: центральная частота, ширина и амплитуда [3]. Из-за влияния внешних факторов, например, температуры, при которой увеличивается диаметр резонатора, механического воздействия, при котором деформируется резонатор, или изменения расстояния между соединительным элементом и резонатором, возможны сдвиг центральной частоты, уширение моды или изменение её амплитуды (рис. 1). По измерениям этих параметров можно узнать, какое именно внешнее воздействие было произведено на резонатор. В гравиметрах на МШГ резонаторах чаще всего используется изменение расстояния между резонатором и соединительным элементом, что приводит к изменению добротности резонатора. При этом наблюдается уширение моды, поскольку её ширина $\Delta\omega$ зависит от добротности резонатора Q_{tot} :

$$\Delta\omega(\Delta x) = \frac{\omega}{Q_{tot}(\Delta x)}.$$

Здесь Δx - расстояние между соединительным элементом и резонатором, ω – центральная частота моды. При изменении добротности также изменяется амплитуда моды ΔA [4]:

$$\Delta A = \frac{4Q_{in}Q_{ext}(\Delta x)\Gamma^2}{(Q_0 + Q_c(\Delta x))^2},$$

где Γ описывает соответствие моды резонатора и соединительного элемента.

$\Gamma = 1$ соответствует идеальному совпадению мод.

3. Резонатор как акселерометр

Для измерения ускорения через детектирование изменения расстояния между резонатором и соединительным элементом могут применяться различные конструкции. Чаще всего резонатор помещается на горизонтальную подвижную консоль или подвешивается вертикально на пружинном элементе, а соединительный элемент располагается на неподвижной поверхности (рис. 2) снизу или сверху резонатора.

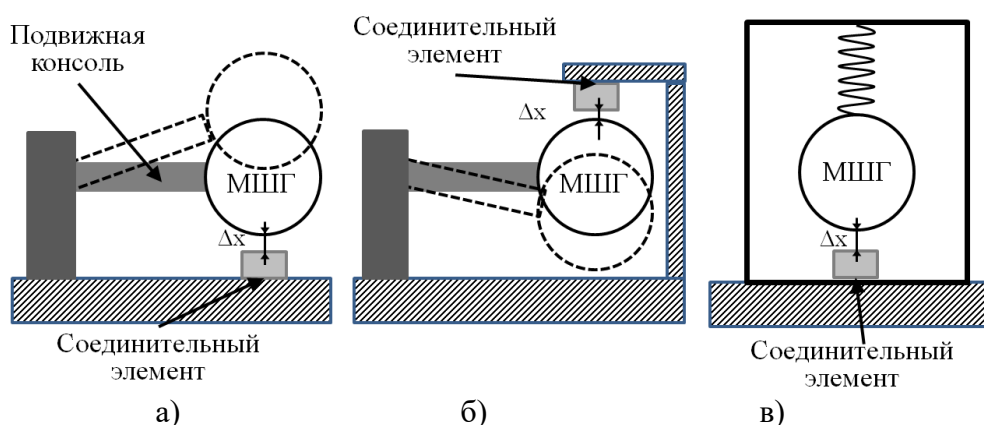


Рис. 2. Возможные конструкции гравиметра: а) резонатор закреплён на подвижной консоли, соединительный элемент находится снизу; б) резонатор закреплён на подвижной консоли, соединительный элемент находится сверху; в) резонатор подвешен на пружине

При конструкции таких устройств возникает много проблем, одной из которых является выбор элемента крепления резонатора. В случае горизонтального крепления консоль должна быть из гибкого материала для реагирования на слабые воздействия, при этом она должна быть прочной, чтобы удерживать резонатор. Очевидно, что в таких случаях миллиметровые резонаторы не применимы, и необходимо использовать резонаторы диаметром в несколько мкм. При окончании воздействия, крепёжный элемент должен возвращаться на первоначальную позицию.

В случае вертикального подвеса возникает возможность перемещения резонатора не только по вертикали, но и его отклонения в сторону от соединительного элемента вплоть до полной потери соединения с лазером. Кроме того, при долгой эксплуатации или при чрезмерно интенсивном внешнем воздействии возможна деградация материала консоли или пружины. Также при проектировании подобных устройств необходимо учитывать влияния вибрации и ударов. При ударе резонатора о соединительный элемент возможно повреждение поверхности резонатора, что приведёт к уменьшению добротности, и повреждение соединительного элемента.

В случае вертикального подвеса возникает проблема крепления резонатора с пружиной. Место соединения находится на пути распространения пучка света, поэтому необходимо учитывать изменения поверхности резонатора из-за наличия клея. Выходом может стать П-образная конструкция, прикрепляющаяся к бокам резонатора.

Для введения излучения лазера в резонатор чаще всего применяются призма или растянутое оптическое волокно. Группа учёных из США [4] представила акселерометр, в котором используется полосковой антирезонансный отражающий оптический волновод (англ. -stripline pedestal anti-resonant reflecting optical waveguide - SPARROW). Он представляет собой интегральный волновод сложной структуры. Его главным преимуществом по сравнению с хрупким растянутым оптическим волокном является устойчивость к внешним воздействиям. Для крепления резонатора использовалась консоль длиной 12 мм и шириной 125 мкм. Кварцевый резонатор был диаметром 350 мкм и добротностью около 10^6 .

При проведении эксперимента измерялись как ширина, так и амплитуда моды резонатора (рис. 3). Результаты измерений показали, что ширина моды в большей степени чувствительна для детектирования небольших изменений расстояния между резонатором и соединительным элементом, а для измерения больших расстояний лучше использовать амплитуду моды. Также было показано совпадение результатов измерения амплитуды моды с результатами, полученными от обычного акселерометра (рис. 4).

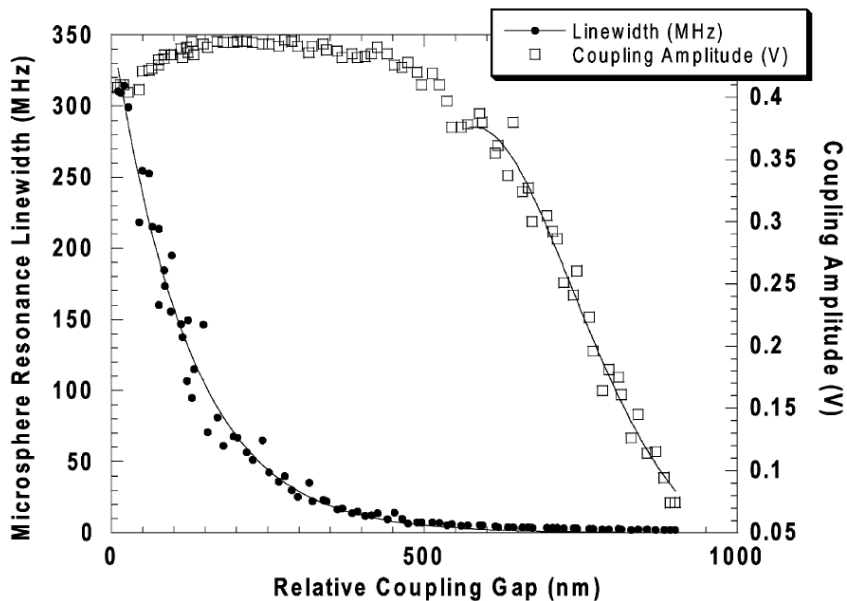


Рис. 3. График изменения ширины (точки) и амплитуды (квадраты) моды резонатора от расстояния между резонатором и соединительным элементом. Результаты были получены одновременно при проведении одного эксперимента [4]

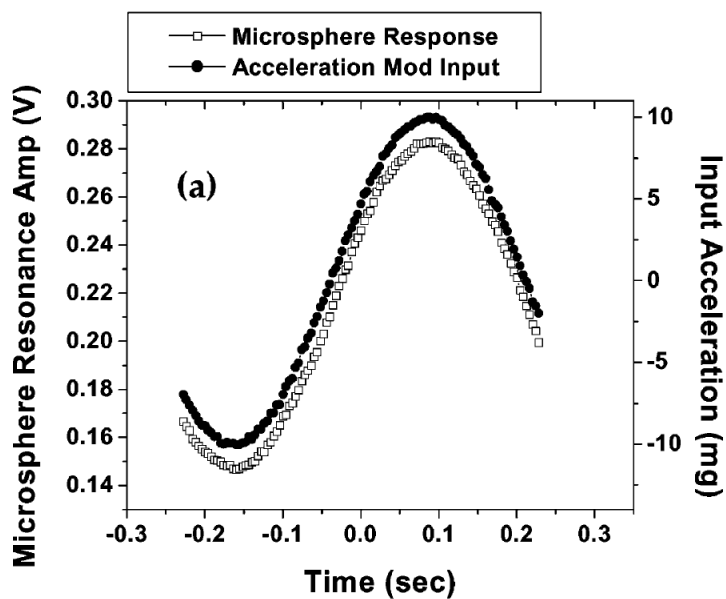


Рис. 4. График зависимости амплитуды моды резонатора (левая ось y) и ускорения (правая ось y) от времени [4]

Похожую конструкцию исследовали учёные из Великобритании [5,6]. В качестве чувствительного элемента использовался резонатор, изготовленный на конце кварцевого оптического волокна путём его плавления, таким образом, получалось единое устройство резонатор-кантилевер. Кантилевер имел длину 22 мм и диаметр 80 мкм, диаметр резонатора составлял 120 мкм. В качестве соединительного элемента использовалось растянутое оптоволокно. Другим концом кантилевер крепился к пьезоэлементу, при помощи которого кантилевер с резонатором перемещались по вертикали. Для сравнения результатов использовался коммерческий сенсор. Измеряемым параметром была выбрана трансмиссия T электромагнитного поля через резонатор:

$$T = \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2,$$

где A_{in} и A_{out} – это электромагнитное поле на входе и выходе резонатора соответственно. Изменение трансмиссии зависит от $dy(t)$ – изменения расстояния d_0 между резонатором и соединительным элементом: $dT(t) = f(dy(t))$, и как видно из результатов измерений, представляет собой прямую линию (рис. 5). Чувствительность устройства позволяет детектировать сигнал в $0,7 \cdot 10^{-6}$ g.

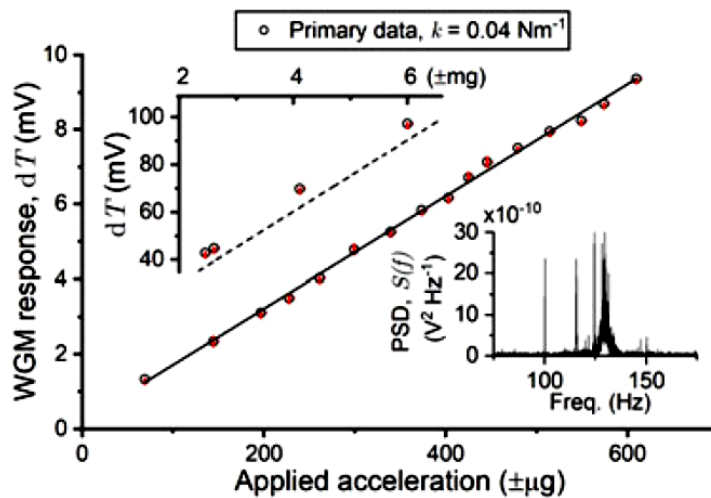


Рис. 5. Зависимость изменения трансмиссии T от ускорения, действующего на резонатор. На верхней вставке показаны результаты для больших ускорений, на нижней – спектральная плотность мощности выходного сигнала акселерометра

Ещё одним вариантом сенсора является изменения параметров самого резонатора, а именно его формы. В этом случае резонатор изготавливается из специального мягкого материала. Резонатор располагается на подвижной поверхности, при движении которой происходит деформация резонатора (рис. 6). Изменение формы резонатора влияет на параметры его моды. На выходе резонатора по изменениям моды можно узнать приложенное к поверхности ускорение.

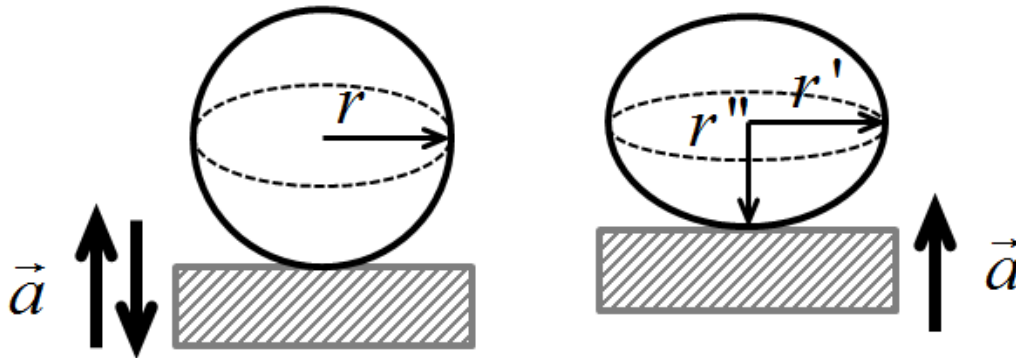


Рис. 6. Деформация формы резонатора при приложении ускорения \vec{a} к подвижной платформе, на которой резонатор расположен

Устройство на этом принципе было предложено в 2011 году группой учёных из США [7]. Диаметр сферы составил 900 мкм. Для ввода лазерного излучения в резонатор использовалось растянутое оптическое волокно. Резонатор помещался на пьезопривод. На той же платформе размещался коммерческий акселерометр для сравнения измерений. Теоретически сдвиг моды может быть найден как [8]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{dn_0}{n_0} + \frac{dR}{R}.$$

Здесь $\Delta\lambda$ - сдвиг длины волны λ моды, dn_0 - изменение индекса преломления n_0 , dR - изменение радиуса сферы R .

Результаты теоретических и экспериментальных исследований находятся в согласии с результатами измерений, полученными при помощи обычного акселерометра (рис. 7). Это говорит о применимости предложенных устройств в качестве акселерометра.

Учёные также исследовали три материала для изготовления резонаторов: кремний, полиметилметаакрилат (ПММА) и полидиметилсилоксан (ПДМС). В результате проведённых исследований было выяснено, что для поставленных целей лучше всего подходит материал ПДМС. Его модуль Юнга меньше двух других материалов и равен 100 кПа, и достаточно применить ускорение в $4 \cdot 10^{-3} g$ для детектируемого сдвига моды.

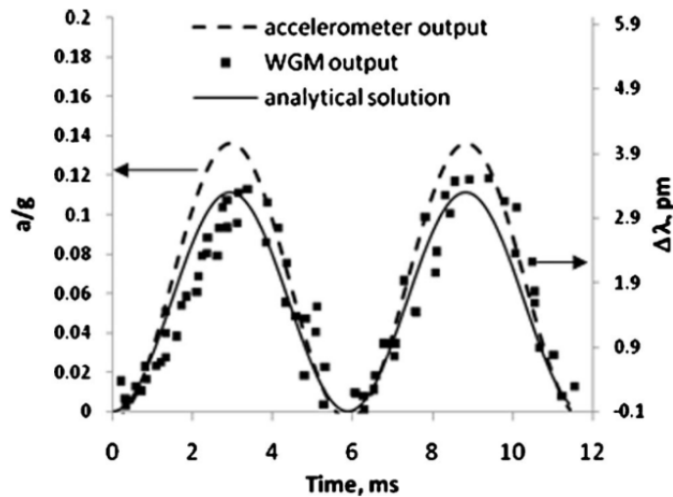


Рис. 7. Результаты эксперимента и теоретических исследований (Iorolo и др. [7]). Сплошной линией обозначены теоретические результаты, экспериментальные результаты отмечены квадратами, прерывистой линией обозначены результаты измерений при помощи акселерометра

Главным недостатком предложенного устройства является усталость материала и, как следствие, неизбежная деградация добротности резонатора во времени. У подобных материалов может присутствовать неупругая деформация, и форма резонатора при значительных ее изменениях может не восстановиться до первоначальной. Также остаются вопросы к способам закрепления резонатора на поверхности и к вводу лазерного излучения. В случае изменения расстояния между соединительным элементом и резонатором будут присутствовать дополнительные сдвиги моды, искажающие результаты измерения. Возможно также перемещение соединительного элемента вдоль края резонатора, что приведёт к потере фундаментальной моды и возбуждению других геометрических мод резонатора. Для избежания подобных случаев необходимо закреплять соединительный элемент на той же подвижной поверхности, что и в случае применения хрупкого растянутого волокна может привести к его разрушению.

4. Резонатор как гироскоп

Отдельно необходимо упомянуть применение интегральных микрорезонаторов. Интегральные схемы имеют ряд преимуществ, в первую очередь – это компактность таких устройств по сравнению с устройствами на кристаллических микрорезонаторах. Группа учёных из Италии предложила схему

гироскопа на интегральном кольцевом резонаторе [9]. В отличие от рассмотренных выше устройств, в которых детектирование проводилось по изменению расстояния между резонатором и соединительным элементом, в данном случае это расстояние должно оставаться неизменным, поскольку используется другой принцип детектирования. В интегральных устройствах резонатор и соединительный элемент находятся на одной подложке, при этом они фиксированы друг относительно друга, что убирает влияние на конечный результат изменения этого расстояния.

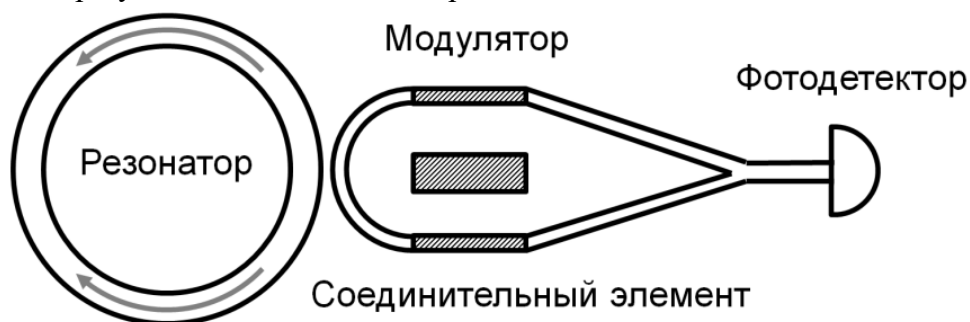


Рис. 8. Схема интегрального гироскопа на кольцевом микрорезонаторе [9]

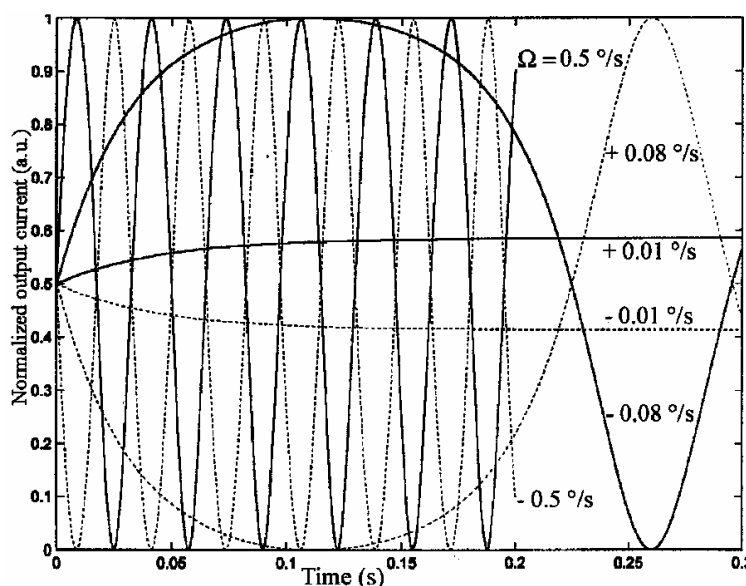


Рис. 9. Нормализованный выходной ток для трёх скоростей вращения: 0,01°/с, 0,08°/с и 0,5°/с. Сплошными линиями обозначены результаты для позитивных значений, пунктирными — для негативных [9]

Сенсор состоит из кольцевого резонатора, соединительного элемента, электрооптического фазового модулятора и фотодетектора (рис. 8). В кольцевом резонаторе генерируются два противоположно направленных луча с ТЕ-поляризацией. Эти лучи проходят через отдельные ветви соединительного элемента и сдвигаются модулятором на $\pi/2$, после чего детектируются фотодетектором. При повороте элемента происходит сдвиг фазы между двумя лучами (эффект Саньяка [10]).

По этому сдвигу возможно узнать о повороте устройства. Полученные результаты показывают, что возможно детектирование скорости вращения $0,01^\circ/\text{с}$ (рис. 9).

Выводы

Появившиеся в последние годы научные публикации говорят о том, что МШГ резонаторы могут успешно и эффективно применяться в качестве высокочувствительных датчиков линейных и угловых ускорений. Такие устройства могут использоваться в решении навигационных задач с регистрацией градиента гравитационного поля Земли. Также МШГ-резонаторы имеют перспективы использования в качестве гироскопов. Применение МШГ-резонаторов в качестве высокочувствительных датчиков линейных и угловых ускорений является новым прикладным направлением фотоники, которое появилось в последние годы и быстро прогрессирует. В то же время, проводимые исследования пока не привели к созданию коммерческих продуктов такого типа. Это объясняется тем, что требуются дополнительные исследования существующих и поиск новых принципов построения таких приборов. Кроме того, поскольку перечисленные устройства на МШГ-резонаторах относятся к средствам измерений, данное направление нуждается помимо прочего и в метрологических исследованиях, поскольку в рассматриваемых областях их применение не может иметь место без калибровки и определения метрологических характеристик рассматриваемых устройств.

Литература

1. Strekalov D.V., Marquardt C., Matsko A.B., Schwefel H.G.L. and Leuchs G. Nonlinear and quantum optics with whispering gallery resonators // *Journal of Optics*. V. 18. № 12, 123002. 2016.
2. Shitikov A.E., Bilenko I.A., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Markosyan A., and Gorodetsky M.L. Billion Q-factor in silicon WGM resonators // *Optica*. 2018. V. 5, Issue 12, P. 1525-1528.
3. Oraevsky A.N. Whispering-gallery waves // *Quantum Electron.*, 2002 // 32(5). Pp. 377-400.
4. Laine J.-P., Tapalian C., Little B. and Haus H. Acceleration sensor based on high-Q optical microsphere resonator and pedestal antiresonant reflecting waveguide coupler // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2001. V. 93 (1). P. 1-7.
5. Li Y.L. and Barker P.F. Field Evaluation of a Portable Whispering Gallery Mode Accelerometer // *Sensors*. 2018. V. 18, 4184.
6. Li Y.L. and Barker P.F. Characterization and Testing of a Micro-g Whispering Gallery Mode Optomechanical Accelerometer // *J. Light. Technol*, 2018. V. 36, (18). 3919.
7. Ioppolo T., Ötügen V., Fourquette D. and Larocque L. Effect of acceleration on the morphology-dependent optical resonances of spherical resonators // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2011. V. 28, №. 2. P. 225-227.
8. Ioppolo T., Ayaz U.K., and Ötügen M.V. High-resolution force sensor based on morphology dependent optical resonances of polymeric spheres // *J. Appl. Phys*. 2009. V. 105, 013535.
9. Armenise M.N., Passaro V. and Armenise M. Modeling and design of a novel miniaturized integrated optical sensor for gyroscope systems // *J. Light. Technol*. 2001. V. 19. № 10. P. 1476-1494.
10. Born M. and Wolf E. *Principles of Optics*. -Elsevier. 1980.