

## **ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.**

**Е.Д. Вобликов<sup>1</sup>, Н.Ю. Шершнева<sup>2</sup>, Р.С. Пономарев<sup>2</sup>, М.А. Аверкиев<sup>3</sup>, В.П. Первадчук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

<sup>2</sup>*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

<sup>3</sup>*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*

**В работе рассматриваются принципы организации датчика угловых скоростей (ДУС) на основе интегрально-оптического кольцевого резонатора, общие подходы к расчету его характеристик и результаты численного моделирования кольцевого резонатора.**

## **INTEGRATED OPTICAL RING RESONATOR FOR ANGULAR RATE SENSOR. MAIN CHARACTERISTICS. NUMERICAL MODELING.**

**E.D Voblikov<sup>1</sup>, N.Y. Shershneva<sup>2</sup>, R.S. Ponomarev<sup>2</sup>, M.A. Averkiev<sup>3</sup>, V.P. Pervadchuk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Perm national research polytechnic university*

<sup>2</sup>*Perm state university*

<sup>3</sup>*Perm scientific industrial instrument making company*

**Main principles of angular rate sensor based on integrated-optical ring resonator is considered. General methods of calculation main characteristics and results of numerical modeling of IO ring resonator are described.**

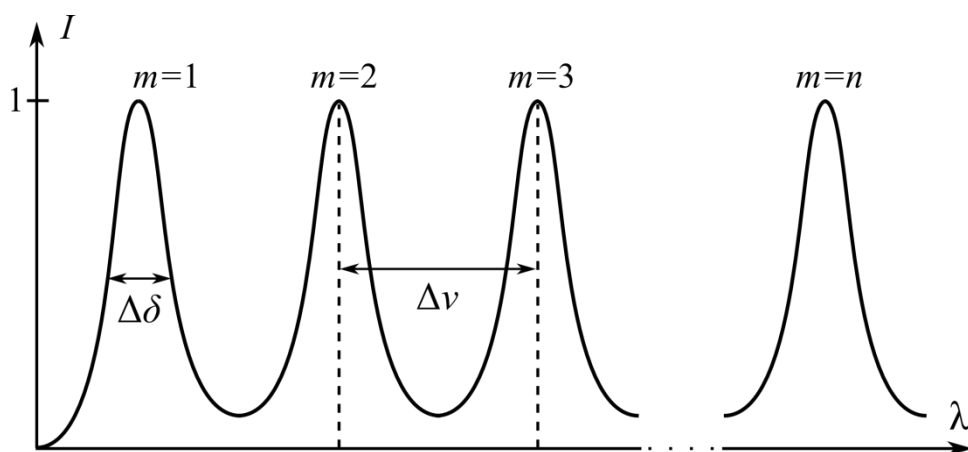
### **Физические основы работы датчика угловой скорости на кольцевых резонаторах**

Развитие космической отрасли, робототехники и «Интернета вещей» требует создания нового поколения высокоточных, надежных, малогабаритных и экономичных навигационных приборов, систем и комплексов, обеспечивающих получение данных о положении объекта в пространстве. В основе таких систем лежат датчики угловой скорости (ДУС) и акселерометры, объединенные общим блоком обработки сигнала. Производимые в данный момент микроэлектромеханические (МЭМС) акселерометры имеют точность, достаточную для решения задач навигации, при сохранении приемлемой стоимости. К сожалению, даже лучшие образцы гироскопов, построенных с использованием МЭМС-технологий, уступают по точности как механическим, так и оптическим гироскопам, но имеют в числе преимуществ малые размеры и стоимость. Логичным шагом в развитии ДУС представляется объединение технологии производства МЭМС, позволяющей получать массовый продукт с низкой стоимостью и малыми размерами, с принципами работы ДУС, основанными на применении оптических явлений, что позволит получить высокие показатели по точности и стабильности работы датчика [3,4].

В данной работе рассматривается ДУС на основе кольцевого оптического резонатора, сформированного на поверхности активного диэлектрика. В основе работы датчика угловой

скорости лежит чувствительность кольцевого резонатора к повороту, объясняемая эффектом Саньяка. Вращение вокруг оси резонатора изменяет оптический путь пучка света внутри него, в результате чего происходит изменение характеристик резонатора, которое можно зафиксировать в выходном сигнале.

Спектральная характеристика кольцевого резонатора в общем виде соответствует кривой, представленной на рис. 1.



**Рис. 1. Спектральная характеристика кольцевого резонатора**

Пики на этой кривой соответствуют собственным или резонансным частотам, резонанс возникает в том случае, если в оптический путь резонатора укладывается целое число длин волн:

$$L = m\lambda_m. \quad (1)$$

Оптический путь пучка света в резонаторе зависит от его геометрических размеров и от эффективного показателя преломления оптического волновода для рассматриваемой длины волны:

$$L = 2\pi r n, \quad (2)$$

при этом вращение кольца резонатора относительно оси симметрии вызывает смещение частоты пропорциональное угловой скорости вращения [1]:

$$\Delta\omega = 8\pi S\Omega/\lambda L, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь охватываемая контуром,  $\Omega$  — скорость вращения резонатора вокруг оси чувствительности,  $\lambda$  — длина волны оптического излучения и  $L$  — длина контура.

Смещение частоты тем легче зафиксировать в выходном сигнале, чем меньшую ширину имеют пики функции пропускания резонатора. Таким образом, чувствительность датчика угловой скорости на кольцевом интегрально оптическом резонаторе будет

определяться его оптическими резонансными характеристиками, полушириной пика  $\Delta\delta$  и областью дисперсии  $\Delta\nu$  - расстоянием между двумя соседними пиками функции пропускания (рис.1) [2],

$$\Delta\nu = c/nL. \quad (4)$$

Однако для фиксации смещения частоты требуется использования спектрометра высокого разрешения, так как смещения частоты при вращении с малой угловой скоростью будут малыми.

В случае если кольцевой резонатор возбуждается двумя когерентными пучками, распространяющимися в нем во встречных направлениях, принцип его работы аналогичен работе кольцевого лазерного гироскопа, в резонаторе которого два встречных пучка создают картину стоячих волн статичную в случае покоя резонатора. При вращении же обе волны испытывают смещение частоты в противоположных направлениях, в результате интерференции двух волн близкой частоты возникают биения, частота которых пропорциональна смещению несущих частот.

Если колебания во встречных пучках  $E_1$  и  $E_2$  описываются выражениями

$$\begin{aligned} E_1 &= a \cdot \cos(\omega + \Delta\omega)t \\ E_2 &= a \cdot \cos(\omega - \Delta\omega)t, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a$  – есть амплитуда колебаний поля,  $\omega$ - несущая частота, или частота оптического излучения и  $\Delta\omega$  – смещение частоты, вызванное вращением, то результат суперпозиции таких волн можно представить как

$$E_2 = a \cdot \cos(\omega t)\cos(\Delta\omega t).$$

То есть имеет место амплитудная модуляция выходного сигнала с частотой равной смещению несущей частоты (3), которая фиксируется фотоприемником в виде последовательности интерференционных пиков.

Определяющими для работы ДУС являются следующие свойства кольцевого резонатора:

Оптические:

- 1) Область дисперсии
- 2) Полуширина спектральной линии
- 3) Резкость резонатора

4) Оптические потери на один проход

5) Добротность (Q-фактор)

Прочие:

6) Диаметр кольца резонатора

7) Ширина и профиль показателя преломления волноводов

Область дисперсии и полуширина спектральной линии определяют спектральное разрешение резонатора, то есть минимальную фиксируемую угловую скорость.

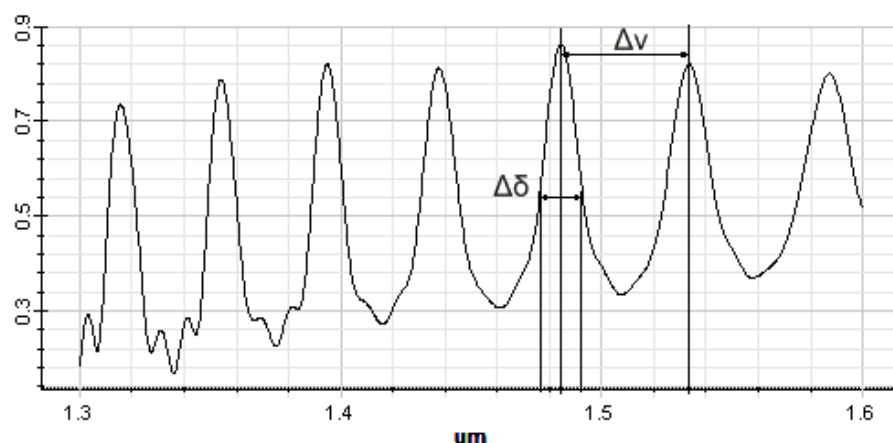
Резкость – есть отношение величины свободного спектрального диапазона к ширине функции пропускания, величина так же характеризующая спектральные свойства.

Добротностью называют отношение энергии резонатора к потерям энергии за один цикл колебаний.

### **Численное моделирование кольцевого резонатора**

В задачи численного моделирования входит оптимизация параметров модели и сокращение работы с экспериментальными образцами. Разработан широкий спектр методов численного моделирования интегрально оптических устройств, однако наиболее общим и строгим из них является метод конечных разностей во временной области (КРВО). Существует ряд коммерчески доступных математических пакетов позволяющих проводить расчеты различных топологий оптических схем. С их помощью можно в первом приближении найти оптимальные параметры системы.

Численное моделирование позволяет получить картину колебаний компонент электромагнитного поля в области моделирования и анализировать спектральный состав колебаний в любой точке области. Результат моделирования резонатора радиуса 5 мкм приведен на рисунке 2. Таким образом, пакет позволяет получить основные оптические характеристики топологии, область дисперсии и полуширину спектральной линии.



**Рис.2** Спектральная характеристика кольцевого резонатора полученная с помощью численного моделирования.

Для данной модели расчетные параметры оказались следующими:  $\Delta v = 0,04$  мкм и  $\Delta \delta = 0,015$  мкм. Тогда резкость резонатора  $F = \frac{\Delta v}{\Delta \delta} = 2,7$

Для имитации эффекта Саньяка, мы предлагаем изменять показатель преломления кольца резонатора, что вызовет изменение оптического пути пучка и смещение собственной частоты системы.

В результате расчета были получены картины колебаний компонент электромагнитного поля в области моделирования, можем анализировать спектральный состав колебаний в любой точке области.

### Результаты и их обсуждение

Показана применимость численного моделирования методом конечных разностей во временной области для расчета параметров кольцевого резонатора датчика, а также для оценки его потенциальных точностных характеристик. Продемонстрирована возможность имитации эффекта Саньяка в численной модели.

В ходе серии численных экспериментов установлено линейное смещение спектральных линий резонатора на 0,5 мкм при изменении оптического пути на 0,9 мкм, что подтверждает применимость метода для оценки параметров кольцевого резонатора датчика угловой скорости.

Таким образом, расчет методом КРВО может использоваться для эффективного моделирования и оптимизации конструкции интегрально-оптических кольцевых резонаторов и гироскопов на их основе.

*Работа выполнена в рамках комплексного проекта «Разработка базовой технологии и создание производства фотонных интегральных схем для приборов, систем и комплексов оптоэлектронного навигационного приборостроения» выполняемой по договору № [02.G25.31.0113](#) от «14» августа 2014г. с Министерством образования и науки РФ*

### **Список литературы**

1. С.И. Бычков, Д.П. Лукьянов, А.И. Бакаляр Лазерный гироскоп Москва «Советское радио» 1975
2. Ю.В.Байбородин, С.С. Дядин, А.Ф. Ляденко, А.И. Машенко, И.А. Ульянов, Ю.Л. Фатин Интегрально-оптический кольцевой пассивный резонатор для оптических гироскопов. Квантовая электроника, 19, №2 1992
3. Armenise, M. N., Ciminelli, C., Dell'Olio, F., Passaro, V. M. N. Advances in Gyroscope Technologies (p. 150). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2011, 150 p.
4. Dell'Olio, F., Tatoli, T., Ciminelli, C., Armenise, M. N. Recent advances in miniaturized optical gyroscopes. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications/ 2014. Issue 9, p.14013 (1-14)