

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕЗОНАНСНОГО МИКРООПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ПАССИВНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

М. Е. Белокрылов^а, Р. С. Пономарев^а, Е. Д. Вобликов^б

^аПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^бПермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

С развитием технологий микроэлектромеханические гироскопы становятся все более точными и доступными, что открывает всё новые и новые горизонты использования гироскопических датчиков, систем навигации и стабилизации. Гироскопы средней точности активно внедряются в инклинометрические измерения, горно-нефтяную промышленность, беспилотные аппараты, системы стабилизации антенн, видеокамер, буровых установок, различных платформ, медицинских инструментов. Основным недостатком используемых микроэлектромеханических гироскопов является их недостаточная точность и высокая стоимость.

Одним из наиболее быстро развивающихся типов гироскопов являются резонансные микрооптические гироскопы с пассивным кольцевым резонатором, которые в долгосрочной перспективе должны заменить ныне используемые микроэлектромеханические гироскопы тактического класса с дрейфом нулевого сигнала менее $10^\circ/\text{час}$.

Цель работы: Разработать теоретическую модель функционирования и на её основе разработать методику оценки чувствительности резонансного микрооптического гироскопа с пассивным кольцевым резонатором.

Резонансный микрооптический гироскоп в минимальной комплектации состоит из трёх частей: узкополосного источника излучения, кольцевого резонатора и фотодетектора (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема резонансного микрооптического гироскопа

На сегодняшний день оценка чувствительности резонансных гироскопов ограничивается оценкой квантового (дробового) шума системы [1]. Как показано в работе [2], такая оценка очень плохо отражает реально

получаемое значение чувствительности, реально получаемое значение чувствительности примерно в 10^2 раз хуже. Такое несоответствие требует пересмотра способа оценки чувствительности резонансных микрооптических гироскопов.

Оценка чувствительности гироскопа по значению квантового шума не учитывает взаимоотношения спектра источника со спектральной функцией кольцевого резонатора, кроме того, формула для квантового шума никак не учитывает реального способа детектирования вращения и определяет лишь предельный, инструментальный уровень шума.

В настоящей работе предлагается новый способ учета взаимодействия спектров источника и кольцевого резонатора, и их влияние на чувствительность резонансного микрооптического гироскопа.

Качественное соотношение спектров источника излучения и кольцевого резонатора показаны на рис. 2. Аналитически функция пропускания кольцевого резонатора рассмотрена в работе [3]. Спектральная функция узкополосного источника (с шириной линии порядка нескольких МГц и менее) имеет вид функции Лоренца [4].

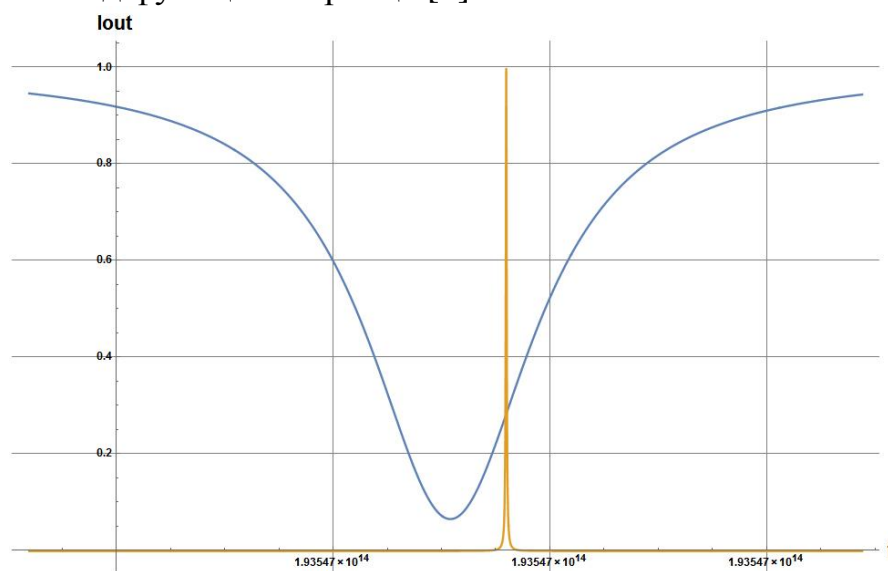


Рис. 2. Качественное соотношение пиков источника излучения и пика пропускания резонатора

В схеме резонансного микрооптического гироскопа центральная длина волны лазера смещается в точку наибольшего наклона резонансной функции, определяемой из условия $\frac{\partial^2 T_{frr}}{\partial f^2} = 0$. При вращении гироскопа в плоскости резонатора в соответствии с эффектом Саньяка происходит сдвиг резонансной частоты относительно функции источника излучения и тем самым происходит изменение выходной интенсивности. По изменению выходной интенсивности можно судить об изменении угловой скорости вращения.

Предлагаемая модель основывается на двух основных утверждениях:

- 1) Минимальный уровень потерь в резонаторе вне условия резонанса, определяемый как отношение мощности сигнала на выходе к сигналу на входе, одинаков для любых длин волн.
- 2) При попадании пика лазера в область пика резонатора, часть мощности, в соответствии с резонансной частотой переходит в резонатор и ослабляется там ровно настолько, насколько глубоок резонансный пик для данной частоты. На языке математики это значит, что мощность на каждой длине волны лазера нужно умножать на долю мощности пропускаемой в резонатор.

Первое утверждение основывается на том, что пик лазера очень узкий по сравнению с масштабами изменения оптических свойств и можно считать оптические свойства среды в этой области постоянными. На практике первое условие вносит лишь небольшие коррективы, так как в подавляющем большинстве случаев потери в системе вне условия резонанса пренебрежимо малы.

Второе утверждение объясняется тем, что для каждой частоты, попавшей в область резонанса величина «потерь» соответствует доле мощности перешедшей в резонатор (рис. 3). Строго говоря, по оси ординат отложена не мощность, а спектральная плотность мощности, измеряемая в единицах Вт/Гц. Эта поправка не сказывается на ходе рассуждений, но важна с физической точки зрения. Таким образом, выходная мощность излучения определяется площадью под пиком лазера и равна интегралу,

нормированному на единицу вне условия резонанса $\int_{-\infty}^{\infty} F_{laser} df = 1$.

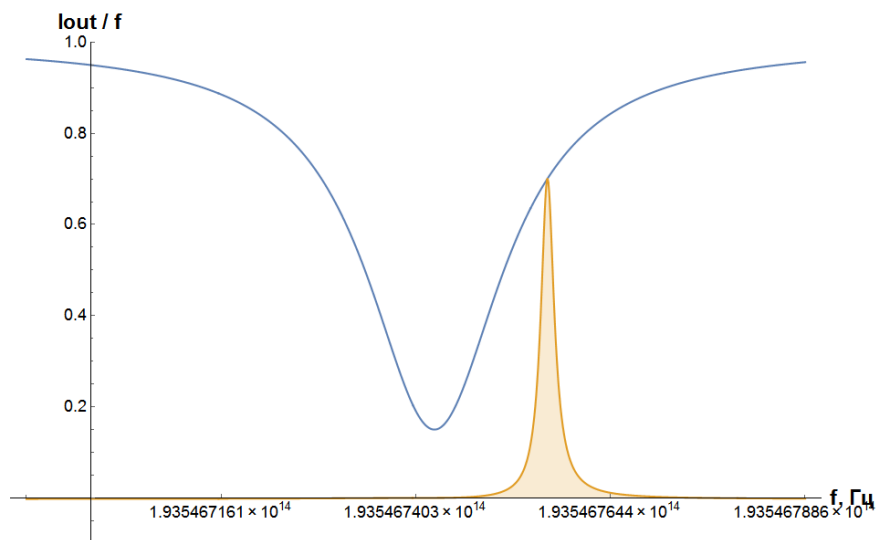


Рис. 3. Взаимодействие спектра пропускания резонатора со спектром источника излучения

При смещении пика резонанса, изменяется выходная интенсивность излучения, определяемая интегралом $\int_{-\infty}^{\infty} F_{laser} df$. Смещение резонансного

пика может быть вызвано различными факторами, например изменением радиуса резонатора вследствие изменения температуры, изменением показателя преломления с изменением температуры, угловой скоростью вращения в соответствии с эффектом Саньяка, рядом других менее значимых факторов. Итоговая чувствительность гироскопа определяется тем минимальным изменением выходной мощности, вызванной угловой скоростью вращения, которое способен зарегистрировать фотодетектор. На рис. 4 показано изменение мощности выходного излучения при сдвиге резонансного пика.

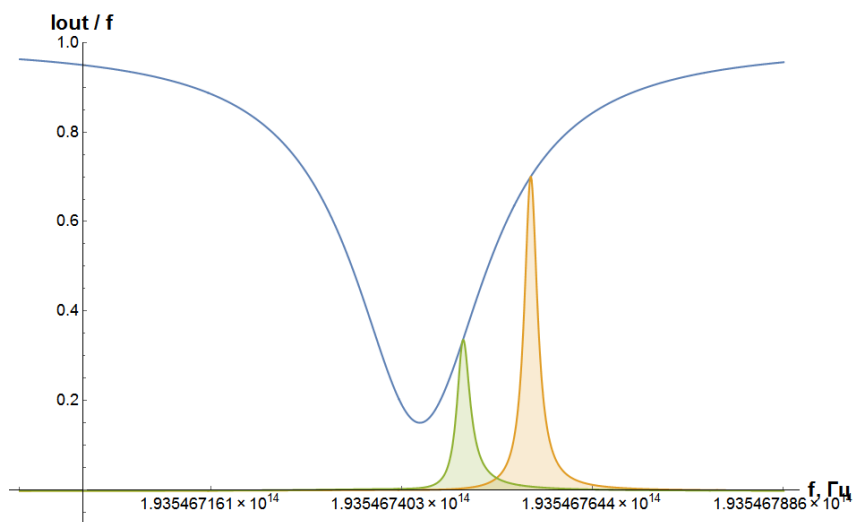


Рис. 4. Изменение площади под пиком лазера при смещении пика резонатора

Вывод: В работе предложена модель функционирования и способ оценки чувствительности резонансного микрооптического гироскопа с учетом спектральных характеристик источника излучения и кольцевого резонатора. На основе разработанной модели написана программа в среде Wolfram Mathematica 10, позволяющая анализировать кольцевые резонаторы с произвольными характеристиками.

Список литературы

1. *Lefevre H. C.* The Fiber-Optic Gyroscope. London. Artech House, 2014. 391 p.
2. *Vannahme C. et al.* Integrated optical Ti: LiNbO₃ ring resonator for rotation rate sensing // Proceedings to the 13th European Conference on Integrated Optics, (IEEE, Copenhagen, 2007). P. 1–4.
3. *Ohtsuka Y.* Analysis of a fiber-optic passive, loop-resonator gyroscope: dependence on resonator parameters and light- source coherence // Journal of Lightwave Technology. 1985. P. 378–384.
4. *Зелто О.* Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 720 с.