

Д. КАЛАНТАРОВ, К. СЁРЧ

О ПРЕДЕЛАХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ НА СВЯЗАННЫХ РЕЗОНАТОРАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ

В последние годы особый интерес вызывают оптические микрорезонаторы, используемые в перспективных недорогих микрооптических гироскопах с чувствительностью на навигационном уровне. В данной работе сравнивается чувствительность к вращению оптических гироскопов на связанных резонаторах (ОГСР-гироскопов) и таких же гироскопов с одним резонатором при различных геометрических ограничениях и параметрах приборов. Показано, что ОГСР-гироскопы обладают более высокой чувствительностью по сравнению с обычными однорезонаторными гироскопами при низких потерях на распространение. Проанализирована максимальная чувствительность для различных материалов (Hydex, оксинитрид кремния, кремний на изоляторе).

Введение

За последние десять лет особую популярность приобрели интегрированные оптические гироскопы: происходит переход к новому поколению недорогих микрооптических гироскопов на кристалле с чувствительностью на навигационном уровне. Однако, чтобы достичь такой чувствительности в интегрированном устройстве, требуется коренным образом изменить конструкцию существующих оптических гироскопов. Опорой инерциальной навигации стали лазерные гироскопы (ЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) благодаря своей простоте, робастности и высокой чувствительности (до 0,001 град/ч) по сравнению с механическими гироскопами. Несмотря на свои преимущества, ЛГ и ВОГ не подходят для маленьких портативных устройств из-за большого размера и массы. Микроэлектромеханические (МЭМС) гироскопы, наоборот, обладают малыми размерами (на уровне микрочипа), но их чувствительность по крайней мере в три раза ниже уровня, необходимого для инерциальной навигации. В литературе предложено множество вариантов как активных, так и пассивных оптических интегрированных гироскопов [1, 2]. Такие микрофотонные гироскопы имеют размеры, сравнимые с МЭМС (10-100 мкм²), а по теоретической чувствительности значительно превосходят МЭМС и приближаются к своим гораздо более крупным братьям ЛГ и ВОГ.

Калантаров Дмитрий. Магистр наук, аспирант Технологического института Стивенса, Хобокен, США.

Сёрч Кристофер. Кандидат наук, доцент Технологический институт Стивенса.

Статья по докладу на XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Научный редактор перевода д.т.н. Ю. В. Филатов.

Более того, микрофотонные гироскопы можно изготавливать на полупроводниковых чипах по стандартной технологии, как и МЭМС, но, в отличие от МЭМС, они не имеют подвижных частей, что упрощает изготовление и увеличивает робастность. Такие приборы, возможно, удовлетворят спрос на недорогие гироскопы на кристалле для высокочувствительных приложений (например ручные навигационные приборы, используемые в районах, где недоступен сигнал GPS [1]).

Из различных типов предлагаемых интегрированных оптических гироскопов наиболее перспективны пассивные массивы связанных оптических микрорезонаторов [3–12]. В частности, оптические волноводы, которые состоят из массива связанных кольцевых резонаторов [13], исследованы на предмет потенциала для микрооптических гироскопов [6–9]. Было множество споров о том, смогут ли такие массивы последовательно связанных резонаторов обеспечить чувствительность, превышающую чувствительность отдельных резонаторов такого же размера, как ОГСР [4–7]. Задача данной статьи состоит в том, чтобы оценить и сравнить максимальную чувствительность, определяемую как минимальную детектируемую угловую скорость в градусах в час, N -резонаторного ОГСР-гироскопа и однорезонаторного гироскопа при различных материальных потерях, ограничениях по размеру и коэффициентах связи. Показано, что ОГСР-гироскопы действительно обеспечивают более высокую чувствительность, чем обычные однорезонаторные гироскопы при низких потерях на распространение. Однако однорезонаторные гироскопы сохраняют более стабильную чувствительность в широком интервале потерь на распространение.

Насколько нам известно, ОГСР-гироскопы пока еще не производятся, и еще не проводились исследования чувствительностей при использовании обычных материалов: стекло Huxley, оксинитрид кремния (SiON) и кремний на изоляторе (КНИ) [13]. Мы обнаружили, что КНИ, будучи одним из наиболее широко используемых материалов для оптических приборов на связанных резонаторах, обеспечивает наименьшую чувствительность в силу чрезвычайно высоких потерь на распространение. Другие же материалы смогли обеспечить чувствительность, достаточную для систем тактического класса при использовании размеров, сравнимых с размерами типичных МЭМС-приборов. Также, отвлекаясь от конкретных материалов, мы рассчитали для фиксированных геометрических площадей, сравнимых с коммерческими МЭМС-гироскопами, максимально допустимые потери на распространение, при которых возможно достижение чувствительности к вращению на тактическом и навигационном уровнях.

Модель

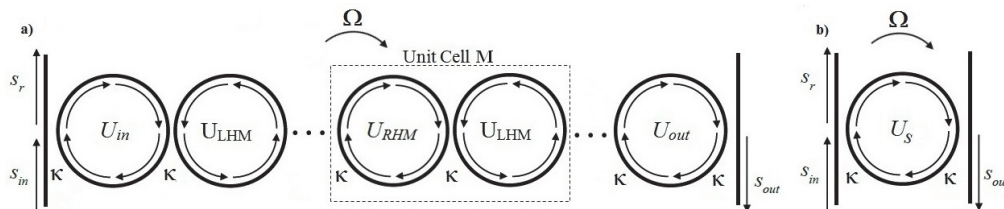


Рис. 1. ОГСР-гироскоп с N резонаторами, соединенными с волноводами (а), эквивалентный кольцевой резонатор (б)

Рисунок демонстрирует связь между резонаторами и матрицами перехода, определенными в тексте. s_{in} и s_{out} – поле на входе и выходе, $T(\phi_s) = |s_{out}/s_{in}|^2$ – пропускание. Судя по направлению распространения s_{out} , количество резонаторов для обеспечения фазовых отношений должно быть нечетным (RHM – правая мода, LHM – левая мода).

Чтобы проанализировать пропускание вращающегося ОГСР-гироскопа, используем подход на основе матриц перехода [14, 15], разработанный в [7–9]. В результате сохранения количества движения распространяющаяся правая мода одного резонатора взаимодействует с левой модой соседнего резонатора, и наоборот. Следовательно, пропускание можно выразить с помощью матриц перехода входа (U_{in}), выхода (U_{out}), левой (U_{LHM}) и правой моды (U_{RHM}), которые представляют связь между входным волноводом и первым резонатором, между последним резонатором и выходным волноводом и повторяющейся единичной ячейкой резонаторов, показанной на рис. 1, соответственно. Эти матрицы, а также матрица перехода для единичного кольцевого резонатора имеют вид:

$$U_{in} = \frac{-i}{\sqrt{\kappa}} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} e^{i(\phi_p+\phi_s)} & -e^{i(\phi_p+\phi_s)} \\ e^{-i(\phi_p+\phi_s)} & -\sqrt{1-\kappa} e^{-i(\phi_p+\phi_s)} \end{pmatrix} \quad (1),$$

$$U_{out} = \frac{1}{\kappa} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} e^{i(\phi_p+\phi_s)} & -e^{-i(\phi_p+\phi_s)} \\ e^{i(\phi_p+\phi_s)} & -\sqrt{1-\kappa} e^{-i(\phi_p+\phi_s)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} & -1 \\ 1 & -\sqrt{1-\kappa} \end{pmatrix} \quad (2),$$

$$U_{RHM} = \frac{-i}{\sqrt{\kappa}} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} e^{i(\phi_p+\phi_s)} & -e^{i(\phi_p+\phi_s)} \\ e^{-i(\phi_p+\phi_s)} & -\sqrt{1-\kappa} e^{-i(\phi_p+\phi_s)} \end{pmatrix} \quad (3),$$

$$U_{LHM} = \frac{i}{\sqrt{\kappa}} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} e^{i(\phi_p-\phi_s)} & -e^{i(\phi_p-\phi_s)} \\ e^{-i(\phi_p-\phi_s)} & -\sqrt{1-\kappa} e^{-i(\phi_p-\phi_s)} \end{pmatrix} \quad (4),$$

$$U_s = \frac{1}{\kappa} \begin{pmatrix} (1-\kappa) e^{i(\phi_p+\phi_s)} - e^{-i(\phi_p+\phi_s)} & -\sqrt{1-\kappa} (e^{i(\phi_p+\phi_s)} - e^{-i(\phi_p+\phi_s)}) \\ \sqrt{1-\kappa} (e^{i(\phi_p+\phi_s)} - e^{-i(\phi_p+\phi_s)}) & (1-\kappa) e^{-i(\phi_p+\phi_s)} - e^{i(\phi_p+\phi_s)} \end{pmatrix}, \quad (5),$$

где $\phi_p = \beta \pi R$ – половина набег фазы на обходе кольцевого резонатора радиусом R с коэффициентом распространения $\beta = \omega n / c - i\alpha / 2$ для света с угловой частотой ω . Эффективный коэффициент преломления равен n , α – потери на единице длины [9, 16]. κ – безразмерный коэффициент связи между резонаторами, $0 < \kappa \leq 1$, определяющий часть энергии, выведенной из резонатора и выражаемый с помощью интеграла перекрытия между модами в смежных резонаторах или в резонаторе и волноводе [17]. Матрицы пропускания волновода со связанными резонаторами для сигнала, распространяющегося от левого до правого волновода, для гироскопов со связанными и единичным резонатором равны:

$$T_{CROW} = U_{out} (U_{LHM} U_{RHM})^M U_{LHM} U_{in} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}, \quad T_{Ring} = U_S = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где $M = (N-3)/2$. Функция пропускания, пропорциональная выходной энергии, имеет вид $T(\phi_s) = |T_{11}T_{22} - T_{21}T_{12}|^2 / |T_{22}|^2$ и упрощается до $|T_{22}|^2$ в предельном случае $\alpha=0$, так что все матрицы перехода унимодулярны.

При вращении ОГСР-гироскопа вокруг оси, перпендикулярной плоскости устройства, с угловой скоростью Ω эффект Саньяка приводит к появлению невязимного фазового сдвига между светом, распространяющимся по часовой стрелке (правые моды, *RHM* на рис. 1) и против часовой стрелки (левые моды, *LHM*, на рис. 1) в каждом резонаторе. Если допустить, что резонаторы совершают инерциальное вращение по часовой стрелке, то волна, распространяющаяся по часовой стрелке, за один полный оборот в резонаторе приобретает фазу Саньяка ϕ_s , в то время как волна, распространяющаяся против часовой стрелки, приобретает фазу $-\phi_s$, где фазовый сдвиг определен посредством угловой скорости, как $\phi_s = 2\pi\omega\Omega R^2/c^2$.

Масштабный коэффициент гироскопа S , который определяет чувствительность к вращению, может быть представлен в виде отношения изменения пропускания к малым изменениям скорости инерциального вращения $\delta T = S\delta\Omega$ и равен [4–9, 18, 19]

$$S = \frac{1}{P_{in}} \frac{dP_{out}}{d\Omega} = \frac{dT}{d\Omega} = \left(\frac{2\pi\omega R^2}{c^2} \right) \left(\frac{dT}{d\phi_s} \right), \quad (7)$$

где $P_{out} = TP_{in}$ – оптическая мощность на выходе прибора, выраженная через входную мощность. В данной статье для расчета минимальной определяемой угловой скорости Ω_{min} учитываются три типа амплитудного шума: квантовый дробовой шум, тепловой шум в фотодетекторе и шум интенсивности лазерного излучения. Мы игнорируем фазовый шум вследствие ширины линии лазерного излучения при допущении, что эффективная длина волновода $L_{eff} = N\pi R/k$ меньше длины когерентности лазера. Минимально определяемое вращение Ω_{min} определяется при максимальном масштабном коэффициенте и $S_{max}\Omega_{min}$, равном флуктуациям относительного шума в фотодетекторе [7, 19, 20]:

$$\Omega_{min} = \frac{1}{S_{max}} \sqrt{\left(\frac{e}{i_D} + \frac{4k_B T'}{R_L i_D^2} + RIN \right) \Delta f}. \quad (8)$$

Здесь $i_D = (e\eta\lambda/hc)P_{out}$ – ток фотодетектора, $\Delta f = 1\text{Hz}$ – измерительная полоса пропускания, P_{out} – максимальная мощность падающая на фотодетектор, $R_L = 50\Omega$ – предполагаемое нагрузочное сопротивление фотодетектора, T – температура 298K, RIN – относительный шум интенсивности лазера, равный -160 дБ/Гц [20], e – основной электрический заряд, $\eta=1$ – квантовая эффективность фотодетектора [1, 20]. При низкой мощности падающего луча (<100 пВ) доминантным шумом является тепловой шум, а при высокой мощности (>2 мВ) главным в системе становится лазерный шум. Все представленные выше результаты даны для источника с длиной волны $\lambda=1,55\text{ мкм}$ и входной энергией 1 мВ, где доминантным шумом является дробовой шум.

Оптические устройства на связанных резонаторах на основе SiON, стекла Hydex и КНИ серийно изготавливались и использовались для изучения линейных устройств, включая фильтры и линии задержки, а также для изучения нелинейного взаимодействия волн [21]. С точки зрения оптического распространения через микрорезонаторы эти материалы отличаются в части потерь на единицу длины α в волноводах, на которых сформированы резонаторы, и разности коэффициентов преломления Δn волновода резонатора и материала оболочки. При более высоком Δn снижается минимальный радиус изгиба волноводов, что дает возможность не только уменьшить размер устройства, но и расширить область дисперсии резонаторов. Однако при более высоком Δn увеличивается чувствительность к погрешностям изготовления, например шероховатости стенок, приводящей к более высоким потерям и обратному рассеянию [22]. КНИ, состоящий из кремниевых резонаторов ($n \approx 3,5$), встроенных в оксид кремния ($n \approx 1,5$), имеет самую большую разницу коэффициентов $\Delta n_{\text{SOI}}=140\%$ [19,23], но и максимальные потери $\alpha_{\text{SOI}}=0,8-3$ дБ/см [24]. Оксинитрид кремния имеет наименьшую разницу коэффициентов $\Delta n_{\text{SiON}}=4.5\%$ [22, 25] при более низких потерях $\alpha_{\text{SiON}}=0,15-0.35$ дБ/см [22, 26]. Стекло Hydex имеет наименьшие потери $\alpha_{\text{Hydex}} = 0,06$ дБ/см [27, 28] при $\Delta n_{\text{Hydex}}=14\%$ [28, 29]. Более того, приведенные значения Δn соответствуют минимальному радиусу изгиба около 300 $\mu\text{м}$ для SiON [25,26], 40 $\mu\text{м}$ для Hydex [28,29] и 5-6 $\mu\text{м}$ для КНИ [30, 31]. Здесь мы не рассматриваем полимерные резонаторы из полиметилметакрилата (ПММА), хотя этот материал часто используется в оптических устройствах на связанных резонаторах, так как его потери на распространение больше, чем у КНИ, что приводит к круговым потерям, максимальным для остальных трех материалов [21]. Поэтому ПММА – наименее подходящий материал.

Результаты

Требования к разрешению для разных классов гироскопов

	Скоростной класс	Тактический класс	Инерциальный класс
$ \delta\Omega [\text{град/ч}]$	>300	300–29	<0.6

В таблице, приведенной в адаптированном виде из [20], даны требования к разрешению для трех классов инерциальных измерений. Такие приложения, как контроллеры видеоигр или стабилизация камеры, отнесены к скоростному классу, а инерциальная навигация – область применения ЛГ – к инерциальному. Под тактическим классом понимаются военные приложения, например управляемые ракеты.

Сначала мы сравнили чувствительность гироскопа с N резонаторами, ограниченного фиксированной геометрической площадью, с чувствительностью гироскопа с одним резонатором с такой же площадью $N(\pi R^2)$ (рис. 2). Были выбраны следующие параметры: коэффициент связи между резонаторами $\kappa=0,1$, соответствующий расстоянию между резонаторами в несколько сот нанометров, и ширина поперечного сечения волноводов резонатора 1 $\mu\text{м}$. Были использованы площади 5, 50 и 100 мм^2 , сравнимые с серийными МЭМС-гироскопами. На рис. 2, а показана чувствительность гироскопа со связанными

и с одним резонатором одинаковой площади при отсутствии потерь, $\alpha=0$ дБ/см; видно, что $\Omega_{\min}$ обратно пропорциональна геометрической площади обоих устройств, как выражено в уравнении (7). Поскольку предполагается, что в структуре ОГСР-гироскопов потери отсутствуют, увеличение количества резонаторов за счет использования резонаторов наименьшего размера обеспечивает более высокую чувствительность. Поскольку общая площадь ОГСР постоянна, R уменьшается при увеличении N . Также чувствительность одного резонатора всегда ниже, чем ОГСР, для всех N . Улучшенная чувствительность ОГСР является результатом оптической интерференции между сигналами, распространяющимися в разных резонаторах [6]. Это приводит к появлению крутых уклонов на краях полосы пропускания при увеличении N [6]. Действительно, аппроксимация цифровых данных для зависимости $S_{\max}$ от N демонстрирует, что при $N \gg 1$, $S_{\max}$ пропорционально N^4 при $\alpha=0$. Таким образом, при наличии 15 резонаторов ОГСР обеспечивает чувствительность на порядок выше, чем однорезонаторный гироскоп, а при наличии ~ 60 резонаторов – на два порядка выше при той же геометрической площади.

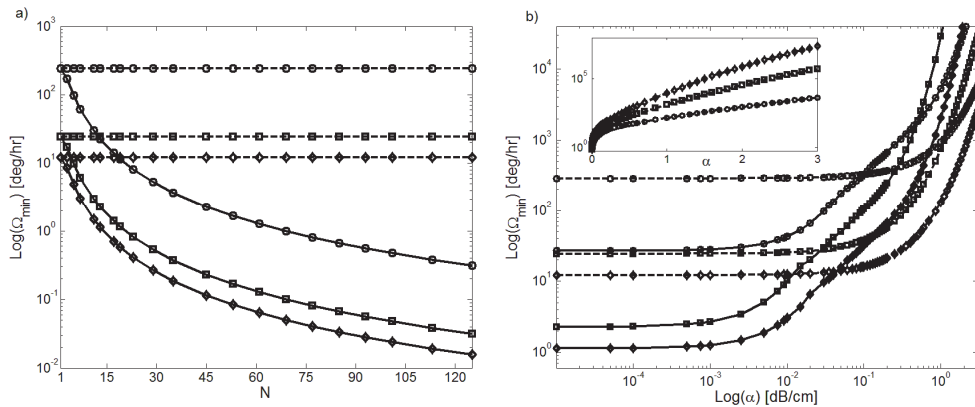


Рис. 2. Зависимость $\Omega_{\min}$ от N для резонаторов без потерь (а); зависимость $\Omega_{\min}$ от α для $N=15$ на площади 5 мм^2 (линии с кружками), 50 мм^2 (линии с квадратами) и 100 мм^2 (линии с ромбами); (б). На врезке показано соотношение $\Omega_{\min}$ в условиях наличия и отсутствия потерь для ОГСР-гироскопа. Данные ОГСР-гироскопов показаны сплошными линиями, данные однорезонаторных гироскопов с той же площадью и $\kappa=0,1$ – прерывистыми линиями

Видно, как потери на распространение влияют на максимальную чувствительность ОГСР-гироскопа с 15 резонаторами и однорезонаторного гироскопа той же площади. При низких потерях $\alpha < 10^{-2}$ дБ/см, ОГСР-гироскоп с 15 резонаторами обеспечивает чувствительность почти на порядок выше, чем однорезонаторный гироскоп той же площади. Однако у однорезонаторного гироскопа чувствительность гораздо более стабильна при изменениях α на большом интервале значений, а также выше при $\alpha \geq 0,1$ дБ/см, чем у ОГСР. Например, при площади 50 мм^2 чувствительность 15-резонаторного гироскопа ухудшается на порядок по сравнению со случаем отсутствия потерь и $\alpha=0,025$ дБ/см, а у однорезонаторного гироскопа той же площади – ухудшается на порядок по сравнению со случаем без потерь и $\alpha=0,6$ дБ/см. Аналогично для

15-резонаторного ОГСР и однорезонаторного гироскопа равной площади 100 мм^2 при $\alpha=0,3 \text{ дБ/см}$ $\Omega_{\min} = 238$ и 56 град/ч, соответственно.

Чтобы понять, почему однорезонаторный гироскоп в условиях больших потерь работает лучше, следует вспомнить, что полоса пропускания ОГСР-гироскопа как функция ϕ_s состоит из N близких проходных резонансов (рис. 3) [6].

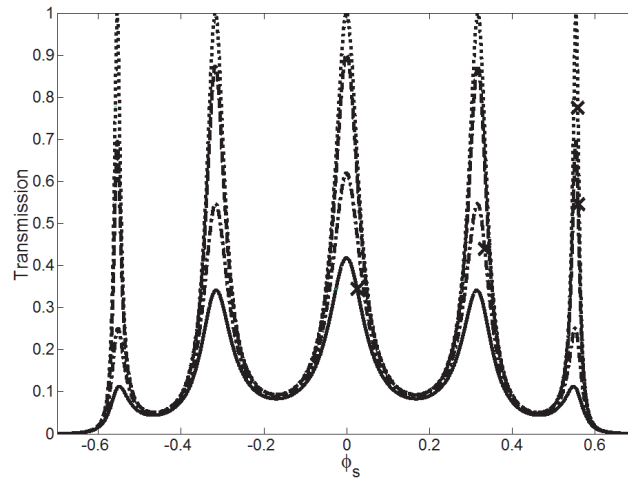


Рис. 3. Пропускание $T(\phi_s)$ ОГСР-гироскопа с $N = 5$ при $\alpha = 0 \text{ дБ/см}$ (пунктирная линия), $\alpha = 0,1 \text{ дБ/см}$ (прерывистая линия), $\alpha = 0,5 \text{ дБ/см}$ (штрих-пунктир), $\alpha = 1 \text{ дБ/см}$ (сплошная линия). Расположение максимального масштабного коэффициента отмечено крестиками. $k=0,1$, прибор площадью 5 мм^2

Для ОГСР-гироскопа без потерь максимальный уклон в полосе пропускания всегда наблюдается на краю полосы и приводит к появлению максимального масштабного коэффициента. Однако в присутствии потерь резонатора, представленных потерями на распространение α , ослабление сигнала приводит к снижению каждого резонанса, причем явление это усиливается по мере роста α , соответственно ослабляя уклоны и масштабный коэффициент. Более того, резонансы пропускания на краю полосы уменьшаются гораздо сильнее при увеличении α , чем в случае центрального резонанса, значительно смещающего местоположение максимального уклона, а также масштабного коэффициента в направлении от края к центру (см. рис. 3). Этот сдвиг положения максимального уклона передачи от края к центральному резонансу соответствует резкому уменьшению чувствительности при увеличении α (см. рис. 2, *b*). Наоборот, однорезонаторный гироскоп имеет только один резонанс пропускания как функцию от ϕ_s , который менее чувствителен к изменениям α , чем края полосы пропускания ОГСР-гироскопа. Благодаря более высокой устойчивости резонанса к потерям на распространение масштабный коэффициент такого гироскопа менее подвержен влиянию потерь, чем ОГСР.

Дополнительно исследовано, как k и количество резонаторов N влияют на $\Omega_{\min}$ при использовании различных материалов (Hydex, SiON и КНИ) при ограничении максимальной геометрической площади 5 и 50 мм^2 (рис. 4).

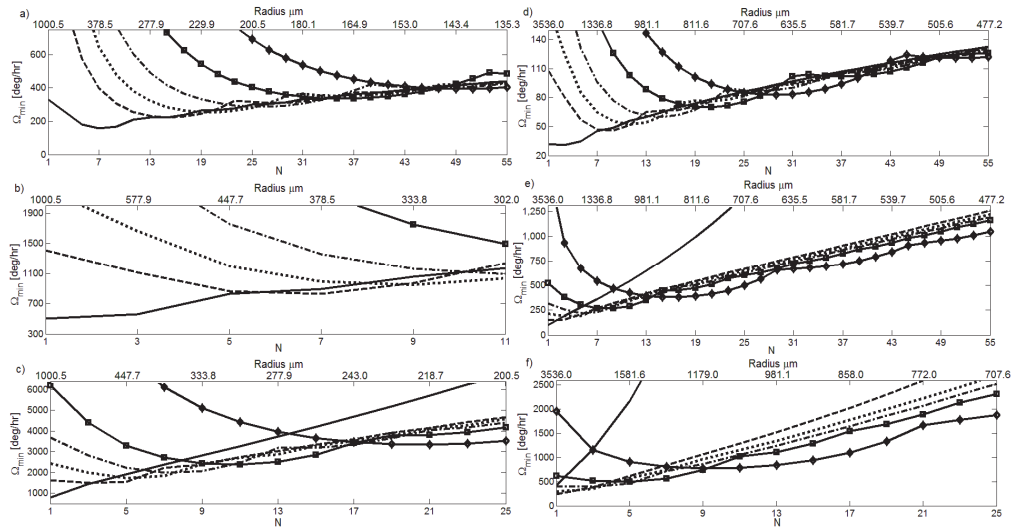


Рис. 4. Зависимость $\Omega_{\min}$ от количества резонаторов N для ОГСР из следующих материалов: (a) Hydrex ($\alpha_{\text{Hydrex}}=0,06$ дБ/см) при площади прибора 5 мм^2 ; (b) SiON ($\alpha_{\text{SiON}}=0,15$ дБ/см) при площади прибора 5 мм^2 ; (c) КНИ ($\alpha_{\text{SOI}}=0,8$ дБ/см) при площади прибора 5 мм^2 ; (d) Hydrex ($\alpha_{\text{Hydrex}}=0,06$ дБ/см) при площади прибора 50 мм^2 ; (e) SiON ($\alpha_{\text{SiON}}=0,15$ дБ/см) при площади прибора 50 мм^2 ; и (f) КНИ ($\alpha_{\text{SOI}}=0,8$ дБ/см) при площади прибора 50 мм^2 .

Коэффициенты связи резонатора: $\kappa=0,1$ (сплошная линия), $\kappa=0,35$ (прерывистая линия), $\kappa=0,5$ (пунктирная линия), $\kappa=0,65$ (штрих-пунктир), $\kappa=0,8$ (сплошная линия с квадратами), $\kappa=0,95$ (сплошная линия с ромбами)

Для всех материалов R больше, чем минимальный радиус изгиба для материала, а ширина поперечного сечения волноводов резонатора составляет $0,5 \text{ мкм}$ для КНИ, $2,2 \text{ мкм}$ для SiON и $1,5 \text{ мкм}$ для Hydrex. Максимальная чувствительность наблюдается при наименьшем значении κ в диапазоне $0,1 < \kappa < 1$. Более того, из рис. 4 очевидно, что увеличение площади прибора приводит к росту чувствительности. Оба эти вывода справедливы для всех конфигураций, кроме КНИ, ограниченного площадью 50 мм^2 . Поскольку свет циркулирует в каждом резонаторе в среднем $1/2\kappa$ раза, что дает эффективную длину прибора $L_{\text{eff}}=N\pi R/\kappa$, потери на распространение приводят к экспоненциальному уменьшению пропускания на величину, примерно равную $\exp(-\alpha L_{\text{eff}})$. По мере того как N или R увеличивается, экспоненциальное уменьшение пропускания становится более значительным, чем увеличение чувствительности за счет более высоких N или площади. Это не только приводит к сдвигу положения максимального масштабного коэффициента к центру от края полосы, но и снижает чувствительность при дальнейшем увеличении N или R , как в случае с КНИ с площадью 50 мм^2 .

Для более высоких значений κ минимальное значение $\Omega_{\min}$ не только увеличивается, но и наблюдается при более высоких значениях N .

Из сравнения трех материалов (см. рис. 4) видно, что все они потенциально могут использоваться для достижения чувствительности тактического уровня. Однако обеспечить такую чувствительность смогло только стекло Hydrex при ограничении площади до 5 мм^2 . Более того, при использовании КНИ с самыми большими потерями на распространение максимальная чувствительность ограничивается в лучшем случае скоростным уровнем. При существующих технологиях и ограничениях инерциальная чувствительность становится

недоступной, однако появился материал Hydrex – потенциально перспективная платформа для разработки недорогих ОГСР-гироскопов тактического класса. Низкие потери на распространение и ограниченное количество необходимых резонаторов делают его идеальным кандидатом. Использование материала Hydrex и площади 50 мм^2 может обеспечить тактическую чувствительность на исключительно широком диапазоне N и κ от 3–29 и 0,1–0,95 соответственно. Например, минимальное значение $\Omega_{\min}$ для $\kappa=0,1$ (см. рис. 4, *d*) наблюдается при использовании трех резонаторов с $\Omega_{\min}=31$ град/ч, а при $\kappa = 0,95$ при 29 резонаторах минимум составляет $\Omega_{\min}=79$ град/ч, что менее чем в три раза меньше по чувствительности, но все еще в пределах тактического уровня.

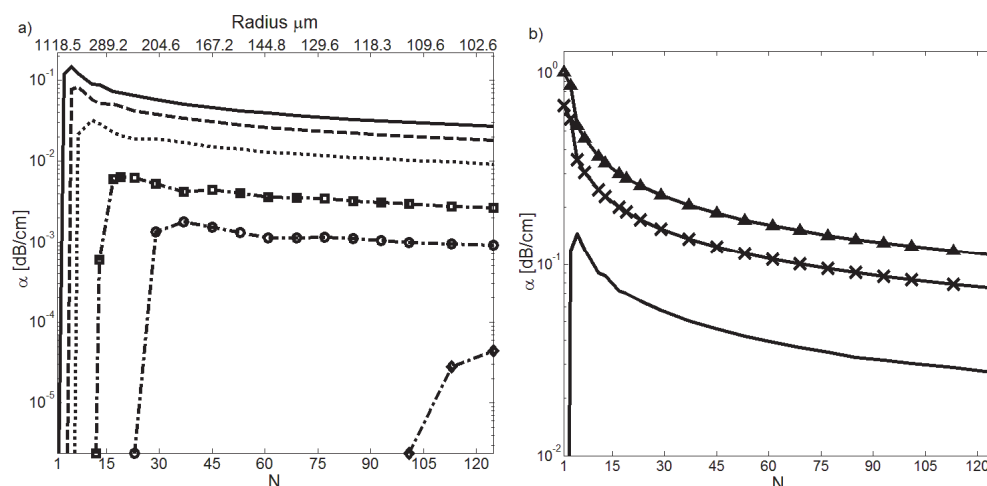


Рис. 5: Потери на распространение α и количество резонаторов N , необходимые для достижения следующих чувствительностей: (а) $\Omega_{\min}=300$ град/ч (сплошная линия), $\Omega_{\min}=200$ град/ч (прерывистая линия), $\Omega_{\min}=100$ град/ч (пунктирная линия), $\Omega_{\min}=29$ град/ч (штрихпунктир с квадратами), $\Omega_{\min}=10$ град/ч (штрихпунктир с кружками), $\Omega_{\min}=0,6$ град/ч (штрихпунктир с ромбами) для площади 4 мм^2 и (б) $\Omega_{\min}=300$ град/ч для площади 4 мм^2 (сплошная линия), 50 мм^2 (сплошная линия с крестиками), 100 мм^2 (сплошная линия с треугольниками).

Во всех случаях $\kappa=0,1$

Отвлекаясь от трех обсуждаемых выше материалов, оценим допустимые потери и количество резонаторов, необходимых для достижения трех уровней чувствительности, перечисленных в табл. 1. Значения α и N , а также радиусы резонаторов, необходимые для достижения чувствительности скоростного, тактического и инерциального уровня для приборов площадью 4 мм^2 , показаны на рис. 5, *a*, где $\kappa=0,1$. Количество резонаторов менялось в диапазоне 1–125 с соответствующими радиусами 1200 – 90 $\mu\text{м}$. Сплошные и штрихпунктирные линии с маркерами-квадратами соответствуют значениям N и α , необходимым для достижения $\Omega_{\min}$ соответственно 300 и 29 град/ч. Эти линии обозначают границу между чувствительностью скоростного и тактического уровня, и нижнюю границу тактической чувствительности соответственно. Следовательно, любая комбинация количества резонаторов и потерь на распространение выше кривой $\Omega_{\min}=300$ град/ч обеспечит чувствительность скоростного уровня, а значения между линиями $\Omega_{\min}$ 300 и 29 град/ч – чувствительность тактического уровня. Штрихпунктирная линия с маркерами-ромбами

соответствует значениям N и α , обеспечивающим $\Omega_{\min}=0,6$ град/ч, что представляет верхнюю границу инерциальных чувствительностей. Любая комбинация α и N ниже этой линии обеспечит инерциальную чувствительность. Аналогично, на рис. 5, *b* показаны различные комбинации N и α , необходимые для обеспечения $\Omega_{\min} = 300$ град/ч для ОГСР-гироскопов максимальной геометрической площади 5, 50 и 100 мм². Значения N и α ниже каждой кривой обеспечивают тактическую чувствительность для всех размеров приборов.

Анализ показывает, что при неизменной геометрической площади увеличение количества резонаторов приводит к снижению максимально допустимых потерь на распространение, что потенциально сужает диапазон используемых материалов. Для каждого контура фиксированной $\Omega_{\min}$ имеется определенное количество резонаторов, при котором допустимые потери достигают максимума. Например, при площади 5 мм² и $\Omega_{\min} = 29$ град/ч, допустимые потери на распространение достигают максимума при $N = 17$ и составляют $\alpha = 0,0018$ дБ/см. Наконец, как видно на рис. 5, *b*, при увеличении размера прибора при фиксированной $\Omega_{\min}$, значение максимально допустимых потерь на распространение сдвигается вверх к $N = 1$ в соответствии с нашим более ранним выводом о том, что при больших потерях гироскоп с одним резонатором более чувствителен, чем ОГСР того же размера.

Заключение

В случае без потерь ОГСР-гироскоп с N резонаторами и фиксированной геометрической площадью обладает лучшей чувствительностью для любого $N > 1$, чем однорезонаторный гироскоп такой же площади. Более того, увеличение количества резонаторов за счет уменьшения их размера повышает чувствительность. Однако в присутствии потерь резонатора было обнаружено, что однорезонаторный гироскоп обладает гораздо более стабильной чувствительностью в широком диапазоне потерь на распространение по сравнению с ОГСР-гироскопом того же размера. При росте потерь однорезонаторная система становится более чувствительной, чем система ОГСР.

Анализ различных материалов позволил выявить, что стекло Hydex обладает наибольшим потенциалом для разработки тактических ОГСР-гироскопов за счет своей способности обеспечивать тактическую чувствительность при самых различных значениях количества резонаторов и связей. Для того чтобы изготавливать гироскопы с инерциальной чувствительностью и размерами, сравнимыми с МЭМС-гироскопами, нужен материал со сверхнизкими потерями на распространение, а также большое количество резонаторов. Однако важно отметить, что на практике изготовить большое количество резонаторов одинаковой окружности и с идентичными межрезонаторными связями чрезвычайно трудно. Производственные недостатки могут снизить результирующую чувствительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ciminelli, C., Dell'Olio, F., Campanella, C. E., and Armenise, M. N., Photonic technologies for angular velocity sensing, *Adv. Opt. Photon.* 2, 370-404 (2010).
2. Passaro, V. de Tullio, C., Troia, B., Notte, M., Giannoccaro, G. and Leonardis, F., Recent Advances in Integrated Photonic Sensors, *Sensors* 12, 15558-15598 (2012).

3. **Scheuer, J. and Yariv, A.**, Sagnac effect in coupled-resonator slow-light waveguide structures, *Phys. Rev. Lett.* 90, 053901 (2006).
4. **Terrel, M. A., Digonnet, M. J. F., and Fan, S.**, Performance limitation of a coupled resonant optical waveguide gyroscope, *J. Lightwave Technol.* 27, 47 (2009).
5. **Terrel, M., Digonnet, M. J. F., and Fan, S.**, Performance comparison of slow-light coupled-resonator optical gyroscopes, *Laser & Photon. Rev.* 3, 452-465 (2009).
6. **Kalantarov, D. and Search, C. P.**, Effect of input-output coupling on the sensitivity of coupled resonator optical waveguide gyroscopes, *J. Opt. Soc. Am. B* 30, 377-381 (2013).
7. **Kalantarov, D. and Search, C. P.**, Effect of resonator losses on the sensitivity of coupled resonator optical waveguide gyroscopes, 39, 4, pp. 985-988 (2014).
8. **Toland, J. R. E., Kaston, Z. A., Sorrentino, C., and Search, C. P.**, Chirped area coupled resonator optical waveguide gyroscope, *Opt. Lett.* 36, 1221-1223 (2011).
9. **Sorrentino, C., Toland, J., and Search, C. P.**, Ultra-sensitive chip scale Sagnac gyroscope based on periodically modulated coupling of a coupled resonator optical waveguide, *Opt. Express* 20, 354-363 (2012).
10. **Steinberg, B. Z., Scheuer, J. and Boag, A.**, Rotation-induced superstructure in slow-light waveguides with mode degeneracy: optical gyroscopes with exponential sensitivity *J. Opt. Soc. Am. B* 24, 1216-1224 (2007).
11. **Novitski, R., Steinberg, B. Z., and Scheuer, J.**, Losses in rotating degenerate cavities and a coupled-resonator optical-waveguide rotation sensor, *Phys. Rev. A* 85, 023813 (2012).
12. **Scully, M. and Suhail Zubairy, M.**, *Quantum Optics* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997).
13. **Ruffin, P. B.**, Fiber optics gyroscope sensors in *Fiber Optic Sensors*, 2nd ed. edited by F. T. S. Yu, S. Yin, and P. B. Ruffin (CRC Press, 2008).
14. **Poon, J. K. S., Scheuer, J., Mookherjee, S., Paloczi, G. T., Huang, Y., and Yariv, A.**, Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides, *Opt. Express* 12, 90-103 (2004).
15. **Capmany, J., Munoz, P., Domenech, J. D., Muriel, M. A.**, Apodized coupled resonator waveguides, *Opt. Express* 15, 10196-10206 (2007).
16. **Poon, J. K. S., Scheuer, J., Xu, Y., and Yariv, A.**, Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines, *J. Opt. Soc. Am. B* 21, 1665-1673 (2004).
17. **Little, B. E., Chu, S. T., Haus, H. A., Foresi, J., and Laine, J. P.**, Microring resonator channel dropping filters, *J. Lightwave Technology* 15, 998-1005 (1997).
18. **Hah, D. and Zhan, D. g.**, Analysis of resonant optical gyroscopes with two input/output waveguides, *Opt. Express* 18, 18200-18205 (2010).
19. **Canciamilla, A., Torregiani, M., Ferrari, C., Morichetti, F., De La Rue, R. M., Samarelli, A., Sorel, M., and Melloni, A.**, Silicon coupled-ring resonator structures for slow light applications: potential, impairments and ultimate limits, *J. Opt.* 12, 104008 (2010).
20. **Guillen-Torres, M.A., Cretu, E., Jaeger, N.A.F., Chrostowski, L.**, Ring Resonator Optical Gyroscopes-Parameter Optimization and Robustness Analysis, *Journal of Lightwave Technology* 30(12), 1802-1817 (2012).
21. **Morichetti, F., Ferrari, C., Canciamilla, A., and Melloni, A.**, The first decade of coupled resonator optical waveguides: bringing slow light to applications, *Laser & Photon. Rev.* 6, 74-96 (2012).
22. **Morichetti, F., Melloni, A., Ferrari, C., and Martinelli, M.**, Error-free continuously-tunable delay at 10 Gbit/s in a reconfigurable on-chip delay-line, *Opt. Express* 16(12), 8395-8405 (2008).
23. **Xia F., Sekaric L., and Vlasov Y.**, Ultracompact optical buffers on a silicon chip, *Nature Photon.* 1, 65-71(2007).
24. **Gnan M., Thorns S., Macintyre D.S., De La Rue R.M., Sorel M.**, Fabrication of low-loss photonic wires in silicon-on-insulator using hydrogen silsesquioxane electron-beam resist, *Electronics Letters* 44 (2) 115-116 (2008).

25. Morichetti F., Melloni A., Breda A., Canciamilla A., Ferrari C., and Martinelli M., A reconfigurable architecture for continuously variable optical slow-wave delay lines, *Opt. Express* 15, 17273-17282 (2007)
26. Melloni, A., Costa, R., Monguzzi, P., and Martinelli, M., Ring-resonator filters in silicon oxynitride technology for dense wavelength-division multiplexing systems, *Opt. Lett.* 28, 1567-1569 (2003)
27. Duchesne, D.; Ferrera, M.; Razzari, L.; Morandotti, R.; Little, B. E.; Chu, S. T. & Moss, D. J. Efficient self-phase modulation in low loss, high index doped silica glass integrated waveguides, *Opt. Express*, 17, 3, 1865-1870 (2009).
28. Ferrera, M., Razzari, L., Duchesne, D., Morandotti, R., Yang, Z., Liscidini, M., Sipe, J. E., Chu, S., Little, B. E. and Moss, D. J. Low power continuous-wave nonlinear optics in doped silica glass integrated waveguide structures, *Nature Photonics* Vol. 2, 12, 737 (2008).
29. Little, B.E., Chu, S. T. Absil, P. P., Hryniewicz, J. V., Johnson, F. G., Seiferth, F., Gill, D., Van, V., King, O., and Trakalo, M., Very high order microring resonator filters for WDM applications, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 10, pp. 2263-2265, (2004)
30. Cooper, M. L., Gupta, G., Schneider, M. A., Green, W. M. J., Assefa, S., Xia, F., Vlasov, Y. A., and Mookherjee S., Statistics of light transport in 235-ring silicon coupled-resonator optical waveguides, *Optics Express* Vol. 18, pp. 26505-26516 (2010).
31. Melloni, A., Canciamilla, A., Ferrari, C., Morichetti, F., Faolain, L. O., Krauss, T. F., De La Rue, R., Samarelli, A., and Sorel, M., Tunable Delay Lines in Silicon Photonics: Coupled Resonators and Photonic Crystals, a Comparison, *Photonics Journal*, IEEE 2, 181-194 (2010).

Abstract. In recent years there has been a growing interest in optical microresonators as viable low cost on chip micro-optical gyroscopes with navigation grade sensitivities. Here, we analyze and compare the rotational sensitivity of coupled resonator optical waveguide (CROW) gyroscopes to equivalent single resonator gyroscopes under various geometric constraints and device parameters. We show that the CROW gyros offer a sensitivity enhancement over conventional single resonator gyros at low propagation losses. However, the single ring resonator gyro is found to be more stable over a wider range of propagation losses as well as boasting greater sensitivities for larger propagation losses compared to a CROW of the same size. Furthermore, an analysis of the maximum achievable sensitivity for different material technologies (Hydex, silicon oxynitride, and SOI) is conducted. While all materials achieved tactical grade sensitivities, Hydex shows the greatest potential for CROW gyros because of the stability of its sensitivity over a wide range of device parameters.

Key words: Gyroscopes, Sagnac effect, Integrated optics