

07;12

## Резонансная кольцевая интерферометрия на некогерентном свете

© М.А. Новиков, В.В. Иванов

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 19 ноября 1997 г.

Описывается новый метод измерения фазовой невязанности в пассивном кольцевом резонаторе с помощью низкокогерентного источника света. Метод обеспечивает эффективное подавление шумов обратного рассеяния света в кольцевом резонаторе и нечувствительность интерферометра к уходам резонансных частот резонатора, вызванным взаимными эффектами (например, тепловым расширением), а также позволяет осуществлять модуляцию и компенсацию фазовой невязанности с помощью устройства сдвига частоты света, размещенного вне резонатора. Рассматривается один из вариантов низкокогерентного резонансного кольцевого интерферометра — двухпроходный несимметричный интерферометр с возвращающим зеркалом.

Оптические кольцевые интерферометры широко используются в физике и технике, главным образом в качестве оптических датчиков вращения [1]. В последнее время все большее внимание привлекают к себе кольцевые интерферометры на основе пассивных кольцевых резонаторов Фабри–Перо (пассивные резонансные кольцевые интерферометры, ПРКИ). ПРКИ имеют ряд важных преимуществ перед кольцевыми лазерами и интерферометрами Саньяка; по сравнению с первыми в них отсутствует явление синхронизации встречных мод; по сравнению со вторыми ПРКИ обладают во много раз большей чувствительностью при тех же размерах чувствительного контура. Интерес к ПРКИ стимулируется также появлением оптических кольцевых резонаторов с исключительно высокой добротностью; на сегодняшний день известны зеркальные кольцевые резонаторы с фактором резкости  $F \sim 10^6$  [2], и волоконно-оптические с  $F \sim 10^3$  [3]. Ожидается, что ПРКИ найдут широкое применение в физике и технике, если удастся преодолеть существующие на сегодняшний день трудности. Наибольшие из них связаны с высоким уровнем шумов интерференции обратнорассеянного света в кольцевом резонаторе, а также с чувствительностью ПРКИ к

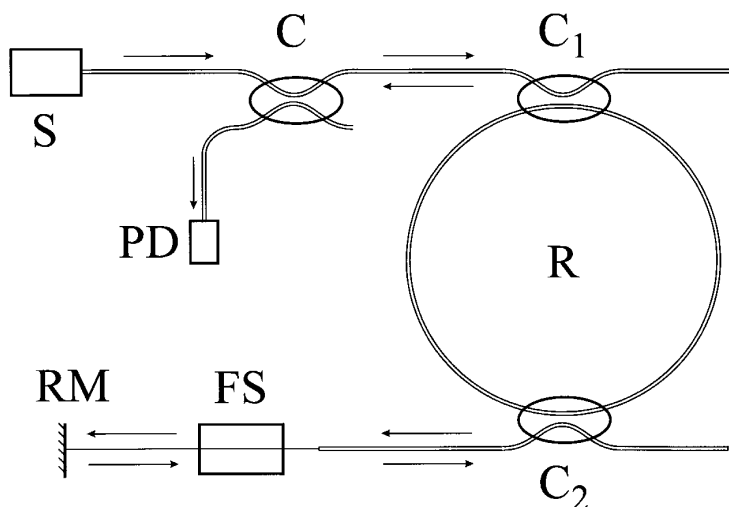


Рис. 1.

уходам резонансных частот кольцевого резонатора вследствие взаимных эффектов, например теплового расширения. Основной причиной возникновения этих трудностей является использование высококогерентных источников света со спектром гораздо более узким, чем резонанс кольцевого резонатора [4].

В настоящей работе описывается новый метод измерения фазовой невязанности в ПРКИ, предполагающий использование широкополосных источников света типа суперлюминесцентных диодов, на ширине спектра которых укладывается много резонансов кольцевого резонатора. Основная идея метода иллюстрируется рис. 1, на котором представлена одна из возможных схем ПРКИ с широкополосным источником (волоконно-оптический вариант). Свет от источника  $S$  через 50%-й ответвитель  $C$  и ответвитель со слабой связью  $C_1$  попадает в кольцевой резонатор  $R$ , обегает его в направлении по часовой стрелке, выходит из резонатора через ответвитель  $C_2$ , проходит через устройство сдвига частоты света  $FS$ , отражается от возвращающего зеркала  $RM$ , еще раз проходит через устройство сдвига частоты света  $FS$ , вновь попадает в резонатор, обегает его в направлении против часовой стрелки, выходит

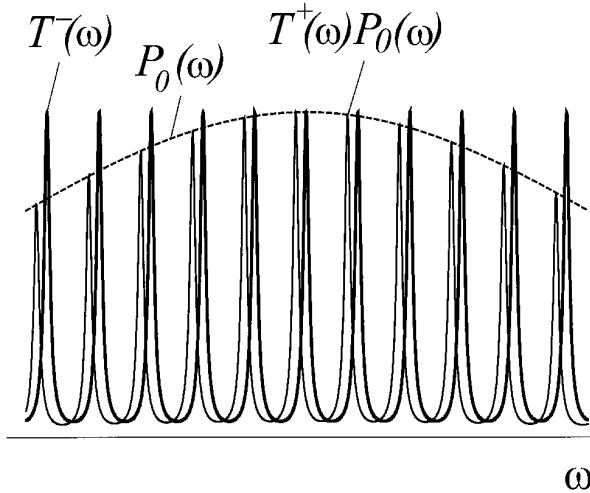


Рис. 2.

из него через ответвитель  $C_1$  и через ответвитель  $C$  попадает на фотодетектор  $PD$ . Известно, что спектр пропускания высокодобротного оптического резонатора представляет собой набор узких линий прозрачности, центральные частоты которых суть собственные частоты резонатора, а ширина в  $F$  раз меньше расстояния между соседними линиями (рис. 2). Благодаря этому вся световая мощность, попадающая на возвращающее зеркало, оказывается сосредоточенной в линиях пропускания резонатора для направления по часовой стрелке. При наличии фазовой невязности эти линии оказываются смещенными относительно линий пропускания резонатора для направления против часовой стрелки, что приводит к падению освещенности на фотодетекторе за счет уменьшения площади перекрытия между линиями излучения, поступающего в резонатор от возвращающего зеркала, и линиями пропускания резонатора в направлении против часовой стрелки. К такому же эффекту приводит сдвиг частоты света при отражении от возвращающего зеркала, создаваемый устройством  $FS$ . Полная световая мощность, достигающая фотодетектора,

$$P_{out} = \int \frac{1}{2} T^-(\omega) T^+(\omega + \Omega) \frac{1}{2} P_0(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где  $\omega$  — частота света;  $P_0(\omega)$  — спектр источника 1;  $\Omega$  — сдвиг частоты света, создаваемый устройством  $FS$ ;  $T^\pm(\omega)$  — спектр пропускания кольцевого резонатора в направлении по часовой стрелке (" + ") и против часовой стрелки (" - "). В случае, если дисперсией показателя преломления в материале чувствительного контура и зависимостью фазовой невязности от частоты света можно пренебречь, выражение для выходной мощности приобретает следующий вид:

$$P_{out}(\Delta\Phi) = \frac{\pi}{16F} \frac{P_0}{1 + (F/\pi)^2 \sin^2(\Delta\Phi/2)}, \quad (2)$$

где  $P_0 = \int P_0(\omega)d\omega$  — полная мощность источника;  $F$  — фактор резкости кольцевого резонатора  $\mathcal{F}$ , определяемый коэффициентом связи  $K$  в ответвителях  $C_1, C_2$  и величиной  $S$  относительных потерь в резонаторе за один проход:

$$F \approx \frac{\pi}{K + S}; \quad (3)$$

и  $\Delta\Phi$  — полная эффективная фазовая невязность за один обход:

$$\Delta\Phi = \Delta\phi + \Delta\phi_{eff}, \quad (4)$$

где  $\Delta\phi$  — фазовая невязность в резонаторе,  $\Delta\phi_{eff}$  — эффективная невязность за счет сдвига частоты света при отражении от возвращающего зеркала:

$$\Delta\phi_{eff} = 2\pi \frac{nL}{c} \Omega, \quad (5)$$

где  $n$  — показатель преломления кольцевого резонатора,  $L$  — его периметр,  $c$  — скорость света в вакууме.

Отметим, что фазовая невязность в резонаторе  $\Delta\phi$  и эффективная невязность за счет сдвига частоты при отражении от возвращающего зеркала  $\Delta\phi_{eff}$  входят в выражение для выходной мощности (2) абсолютно равноправно. Благодаря этому, модуляция и компенсация фазовой невязности может осуществляться при помощи устройства сдвига частоты света  $FS$ , размещенного между резонатором и возвращающим зеркалом, при этом паразитная невязность в устройстве сдвига частоты света не будет влиять на работу интерферометра. Используя в качестве компенсирующего элемента устройство постоянного сдвига частоты, управляемое синусоидальным напряжением, например брегговскую акустооптическую ячейку, можно создать компенсационный ПРКИ с частотным выходом.

Фундаментальный предел обнаружения фазовой невязанности, определяемый дробовыми шумами источника света:

$$\Delta\phi_{sn} \approx 25 \sqrt{\frac{\hbar c \pi}{\lambda_0 \tau \eta F P_0}}, \quad (6)$$

$\hbar$  — постоянная Планка,  $\lambda_0$  — центральная длина волны источника света,  $\tau$  — время усреднения,  $\eta$  — квантовый выход фотодетектора. При измерении эффекта Саньяка предел обнаружения вращения составляет

$$W_{sn} \approx \frac{c}{A} \sqrt{\frac{\hbar c \pi \lambda_0}{\tau \eta F P_0}}, \quad (7)$$

где  $A$  — площадь, охватываемая кольцевым резонатором. При  $A = 1 \text{ m}^2$ , факторе резкости резонатора  $F = 100$ , длине волны  $\lambda_0 = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$ , мощности источника  $P_0 = 100 \text{ mW}$  и времени усреднения  $\tau = 1 \text{ s}$   $W_{sn} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s}$ . Предельная чувствительность описываемого интерферометра в  $F^{1/2}$  раз выше, чем у интерферометра Саньяка, и во столько же раз ниже, чем у резонансного кольцевого интерферометра на монохроматическом свете. Последнее связано с тем, что в описываемом интерферометре используется только  $1/F$ -я часть мощности источника света. В тех случаях, когда шумы интерферометра значительно больше дробовых, выигрыш в чувствительности по сравнению с нерезонансными кольцевыми интерферометрами оказывается таким же, как и в резонансных интерферометрах на монохроматическом свете, т.е. примерно в  $F$  раз.

Основные преимущества описываемого метода перед существующими обусловлены применением источника с широким спектром и состоят в следующем. Во-первых, в описываемом методе устраняются шумы, связанные с паразитной интерференцией обратнорассеянного света в чувствительном контуре, которые являются основным фактором, ухудшающим характеристики кольцевых интерферометров на когерентном свете. Во-вторых, как показывает формула (2), описываемый интерферометр практически нечувствителен к уходам резонансных частот резонатора вследствие взаимных эффектов, например, теплового расширения резонатора, в отличие от схем с монохроматическим источником, где резонансная частота должна быть жестко привязана к частоте источника. Это повышает стабильность интерферометра и

делает ненужной точную настройку резонатора на центральную частоту источника. Кроме того, предлагаемый метод дает возможность осуществлять модуляцию и компенсацию с помощью устройства, размещенного вне кольцевого резонатора, что позволяет снизить модуляционные шумы, а также создать компенсационные интерферометрические схемы с частотным выходом. Можно надеяться, что предлагаемый метод найдет применение в оптической гироскопии, где на его основе могут быть созданы волоконно-оптические и интегрально-оптические резонансные гироскопы со значительно улучшенными характеристиками, а также в фундаментальной физике для исследования невязимных оптических эффектов.

## Список литературы

- [1] *Chow W.W., Sanders V.E. et al. // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. P. 61–103.*
- [2] *Anderson R., Bilger H.R., Stedman G.E. // Am. J. Phys. 1994. V. 62. P. 975–985.*
- [3] *Ioannidis Z.K., Kadivar R., Giles I.P. // J. Light. Techn. 1996. V.14. P. 377–384.*
- [4] *Iwatsuki K., Hotate K., Higashiguchi M. // Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 3916–3924.*