

# Рециркуляционный волоконный кольцевой интерферометр с компенсацией потерь в резонаторе

Э.И.Алексеев, Е.Н.Базаров, В.П.Губин, А.И.Сазонов, Н.И.Старостин, А.И.Усов

*Реализован новый рециркуляционный волоконный кольцевой интерферометр с волоконным усилителем в резонаторе и широкополосным источником света. Экспериментально продемонстрировано значительное повышение пороговой чувствительности интерферометра к вращению и увеличение масштабного коэффициента при работе усилителя в режиме, близком к пороговому.*

**Ключевые слова:** кольцевой резонатор, волоконный усилитель, рециркуляционный интерферометр.

Рециркуляционный волоконный кольцевой интерферометр (ВКИ) [1] является новым типом низкокогерентного интерферометра, в котором объединены достоинства традиционных ВКИ – низкокогерентного однопроходного ВКИ Санька [2] и высококогерентного (резонаторного) ВКИ [3]. В рециркуляционном ВКИ (РВКИ) для повышения чувствительности используется накопление сигнала с помощью многократных проходов (рециркуляций) излучения по кольцевому контуру (высокодобротному оптическому резонатору). Вместе с тем применение низкокогерентного источника снижает влияние основных дестабилизирующих факторов [2]. В настоящее время отмечается заметный интерес к РВКИ как датчику физических величин. В частности, теоретически показана важность снижения потерь в резонаторе [4], реализованы пассивные РВКИ [5, 6], изучены активные рециркуляционные линии задержки [7].

Целью настоящей работы является экспериментальная демонстрация датчика угловой скорости на основе активного РВКИ с широкополосным источником света и волоконным усилителем для компенсации потерь в резонаторе. Схема РВКИ приведена на рис.1. Основные ее элементы: суперфлуоресцентный волоконный источник 4, направленные разветвители 1–3, поляризатор 5, фазовый модулятор 6, волоконные катушки 7, 8, волоконный усилитель 9. Чувствительным элементом РВКИ является кольцевой резонатор, образованный последовательно соединенными элементами 3, 7, 9, 8. Для регистрации выходного сигнала используются модуляционная методика и фазовое детектирование на первой гармонике.

Все оптические элементы, кроме волоконного источника 4, выполнены из волокна, сохраняющего поляризацию излучения. Волоконный источник и усилитель были изготовлены из иттербий-эрбиевого волокна ( $\lambda = 1.55$  мкм). Усиление волоконного усилителя не превышало 10 дБ и регулировалось изменением тока диода накачки.

Выходной сигнал РВКИ можно представить как сум-

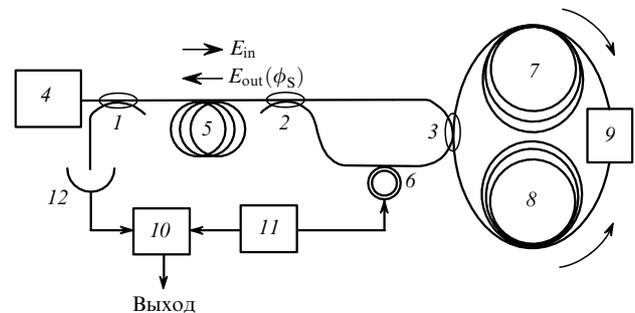


Рис.1. Схема РВКИ:

1–3 – направленные разветвители; 4 – волоконный источник; 5 – поляризатор; 6 – фазовый модулятор; 7, 8 – волоконные катушки; 9 – волоконный усилитель; 10 – фазовый детектор; 11 – опорный генератор; 12 – фотоприемник.

му сигналов  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, \infty$ ) однопроходных ВКИ, имеющих невзаимные сдвиги  $m\phi_S$ , где  $\phi_S = (2\pi LD/c\lambda)\Omega$  – фазовый сдвиг Санька при одном проходе резонатора;  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость;  $L = 2 \times 100$  м и  $D = 125$  мм – общая длина волокна и диаметр катушек. При увеличении усиления число проходов возрастает и выходная характеристика интерферометра  $T(\phi_S) = |E_{out}(\phi_S)|^2 / |E_{in}|^2$  становится более резкой, за счет чего достигается увеличение чувствительности (здесь  $E_{in}$  и  $E_{out}(\phi_S)$  – поля на входе и выходе РВКИ, см. рис.1).

В эксперименте измерялись крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент) ВКИ  $Q_S = \Delta U / \Delta \Omega$  при регистрации выходного напряжения  $\Delta U$  фазового детектора на первой гармонике модуляции, средняя мощность  $P_0$  на фотодиоде 12, пороговая чувствительность ВКИ  $\Omega_{min}(1\sigma, 1 \text{ Гц})$ . Исследовались зависимости указанных параметров от оптического усиления. На рис.2 показаны зависимости пороговой чувствительности  $\Omega_{min}$  и нормированной крутизны  $Q_S / P_0$  от  $P_0$ . Режим с единичным усилением достигается при  $P_0 \approx 20$  мкВт, а при  $P_0 = 120$  мкВт режим близок к режиму генерации. Для анализа данных использовалось соотношение [4]

$$T(\phi_S) = \frac{t_0^2}{1 - R^2} \frac{1 - R^2 + 0.5(h - 2) \sin^2 \phi_S}{1 - R^2 + h \sin^2 \phi_S}, \quad (1)$$

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинское отделение, Россия, 141120 Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1; e-mail: nis229@ire216.msk.su; web-site: http://fire.relarn.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2001 г.

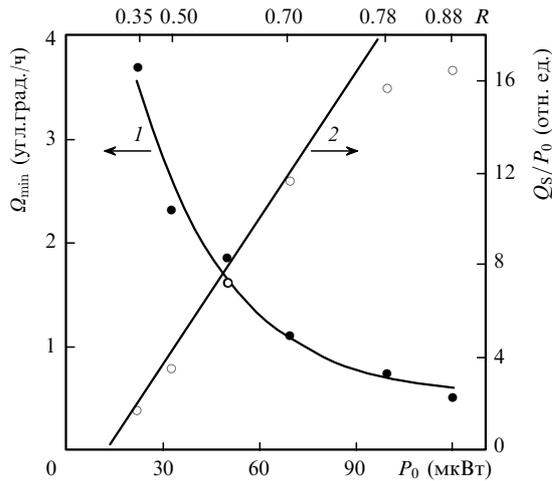


Рис.2. Пороговая чувствительность  $\Omega_{\min}$  (1) и крутизна характеристики  $Q_s/P_0$  (2) РВКИ при разном усилении (разных  $P_0$ ).

где  $t_0 = a^2 g f (1 - k^2)$ ;  $R = k g f a$ ;  $h = 4R^2 / (1 - R^2)$ ;  $k = 0.707$  – коэффициент деления по амплитуде в прямом канале направленного разветвителя 3;  $a = 0.5$  дБ,  $f = 6.1$  дБ (включая потери на четырех точках сварки) и  $g$  – коэффициенты передачи по амплитуде элементов 3, 7+8 и 9 соответственно.

Линейная аппроксимация крутизны характеристики 2 на рис.2 соответствует расчету по формуле (1) с учетом того, что  $Q_s$  пропорционально  $d^2 T(\phi_s) / d\phi_s^2$  при  $\phi_s = 0$ , а  $P_0 \sim T(0)$ . Из рис.2 следует, что при максимальном возможном усилении  $\Omega_{\min}$  снижается в 8 раз. Однако следует отметить, что полученный в эксперименте выигрыш в чувствительности не является максимальным, на что указывают отклонение крутизны 2 от теоретической (линейной) зависимости, а также относительно малый параметр  $R$  в предпороговом режиме. Имеются основания считать, что расхождение теории и эксперимента связано, в частности, с «деформацией» спектральной характеристики усиления волоконного усилителя в предпороговом режиме.

Разработанный макет РВКИ имеет хорошую стабильность параметров. На рис.3 представлена запись дрейфа нуля РВКИ в режиме, близком к пороговому, в течение 2.5 ч с калибровочными сигналами в начале и в

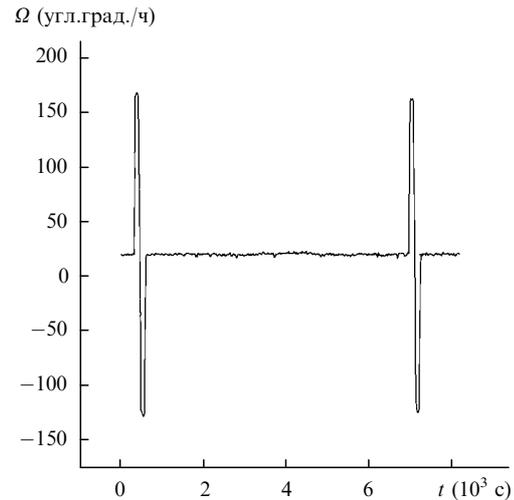


Рис.3. Запись дрейфа нуля РВКИ.

конце записи. Нестабильность нуля составила 0.5 угл. град./ч ( $1\sigma$ ,  $\tau = 20$  с) при линейном уходе менее 0.1 угл. град./ч, а нестабильность масштабного коэффициента – около 2.5 %.

Таким образом, впервые экспериментально показано значительное улучшение пороговой чувствительности РВКИ к вращению (в  $\sim 8$  раз) при введении в резонатор оптического усилителя, работающего в режиме, близком к пороговому.

Авторы благодарны В.П.Гапонцеву, И.Э.Самарцеву и Ю.А.Баранникову за помощь в работе, а также И.А. Андроновой и Г.Б.Малькину за дискуссии. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-17344).

1. Farhadiroushan M., Giles I.P., Youngquist R.C. *Proc.SPIE*, **719**, 178 (1986).
2. Bergh R.A., Lefevre H.C., Shaw H.J. *Optics Letts*, **6**, 198 (1981).
3. Notate K. *Proc.SPIE*, **2895**, 68 (1996).
4. Yu A., Siddiqui A.S. *Electron. Letts*, **28**, 1778 (1992).
5. Hu Z., Ma X., Li F., Tang Q., Zhou S., Wu Y. *Proc.SPIE*, **3860**, 348 (1999).
6. Иванов В.В., Новиков М.А., Геликонов В.М. *Квантовая электроника*, **30**, 119 (2000).
7. Kringlebotn J.T., Blotekjaer K., Pannell C.N. *Fiber Integr. Optics*, **14**, 265 (1995).