

# 1.5 $\mu\text{m}$ 波段的光纤环形腔的动态响应

安浩哲 方奕晨 刘崇琪 蒋佩旋 徐大雄

(北京邮电学院无线电工程系, 北京 100088)

**摘 要** 对单模光纤环形腔进行正弦调制, 调制频率从 55 Hz 到 300 kHz, 调制幅度为  $\pi$ , 观察它的稳态及动态干涉图样, 给出了正弦波和锯齿波调制时的稳态因子和动态因子, 并给出了理论及实验结果.

**关键词** 环形腔, 光纤, 稳态, 动态响应.

## 1 引 言

自 1982 年 Stokes 等人首次用压电陶瓷调相器调节光纤环形腔相位, 用波长  $0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器作信号源; 报道了环形腔的输出特性以来, 人们对环形腔的极化效应、非线性效应等进行了大量的实验与理论研究, 并将其广泛地应用于传感器、波分复用系统的滤波器、光谱分析仪、环形腔激光器等各方面. 文献[1~3]对光纤环形腔在低频相位调制下的稳态特性作了描述, 在高频相位调制下, 环形腔输出呈现动态效应, 在稳态干涉峰附近出现振荡, 文献[4]对单模光纤环形腔在入射激光波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  时的动态特性作了报道, 本文对入射激光波长  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$  时的光纤环形腔动态特性作了理论与实验分析.

## 2 理论分析

典型的光纤环形腔由单模光纤耦合器及单模光纤组成, 如图 1 的虚线框内所示, 光由 1 端入射, 2 端和 3 端连成环, 由 4 端输出, 入射光由下式表示

$$E_1(z, t) = e_1 \exp [j(\beta z - \omega t)] \quad (1)$$

相位调制信号为

$$\varphi(t) = f(t) \quad (2)$$

式中,  $e_1$  为复数振幅,  $\beta$  为光纤传播常数,  $\omega$  为光的角频率. 延迟时间  $\tau = L/U_s$ ,  $U_s$  为光波的群速度. 在时刻  $t$ , 4 端输出为  $t$  时刻 1 端输入光耦合至 4 端的光与  $t - \tau$ ,  $t - 2\tau$ ,  $t - 3\tau$  时刻从 2 端到 4 端光之和, 由下式来表示<sup>[5]</sup>:

$$E_4(z, t) = jT_{14}E_1(z, t) + (T_{13}T_{24}/jT_{23}) \times \sum_{n=1}^{\infty} (jT_{23}T_L)^n \times E_1(z + nL, t) \times \exp [j \sum_{m=1}^n \varphi(t - m\tau)] \quad (3)$$

这里  $T_{13} = T_{24} = [(1-k)(1-r)]^{1/2}$ ,  $T_{14} = T_{23} = [k(1-r)]^{1/2}$ ,  $T_L = \exp(-\alpha_0 L + \varepsilon)$ ,  $k$  为耦合器的耦合系数,  $r$  为耦合器的插入损耗,  $\alpha_0$  为光纤传输损耗,  $\varepsilon$  为熔接损耗.

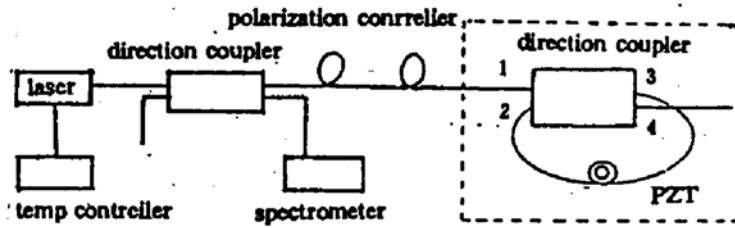


Fig. 1 Schematic diagram of fiber-optic ring resonator

## 2.1 锯齿波调制<sup>[5]</sup>:

$\varphi(t) = \alpha t$ ,  $\alpha$  为相位调制速率, 则从(3)式得:

$$E_4(t)/E_1 = jT_{14} + (T_{13}T_{24}/jT_{23}) \sum_{n=1}^{\infty} (T_{23}T_L)^n \times \exp \{j[n(\pi/2 + \beta L) + n\alpha t - n(n+1)\alpha\tau/2]\} \quad (4)$$

由  $T_{23}T_L < 1$ , 上式的  $n$  取至 40, 相位因子分为两部分:

1)  $n(\pi/2 + \beta L)$ , 是光在环形腔中环绕造成的相移, 其中的  $\pi/2$  为耦合器引起的相位移.

2)  $n\alpha t - n(n+1)\alpha\tau/2$ , 是光在环形腔内环行  $n$  圈后因环形腔中压电陶瓷(PZT)调制光的相位而造成的附加部分, 当忽略光在环形腔中的延迟时间  $\tau$ , 则光在环形腔内环行  $n$  圈时因 PZT 造成附加相位为第一项  $n\alpha t$ . 实际上光在环形腔中传输是需要一定时间的(为  $\tau$ ), 每圈因 PZT 造成的相位附加部分依次为  $\alpha t$ ,  $\alpha(t+\tau)$ ,  $\alpha(t+2\tau)$ ,  $\alpha(t+3\tau)$ ..., 延迟时间  $\tau$  不能忽略时产生相位附加值为第二项. 如果省略  $n(n+1)\alpha\tau/2$ , 只考虑  $n\alpha t$ , 根据(4)式, 则在某一时刻  $t$ , 环形腔输出一干涉峰, 但由于  $n(n+1)\alpha\tau/2$  的存在, 它使环形腔在稳定输出干涉峰附近形成一衰减振荡. 所以将  $n\alpha t$  称为稳态因子、 $n(n+1)\alpha\tau/2$  称为动态因子. 若要使环形腔处于稳定输出状态, 就必须减小  $n(n+1)\alpha\tau/2$  即  $\alpha\tau$  的值.

令  $\tau = 25 \text{ ns}$ ,  $k = T_L = 0.88$ ,  $\varepsilon = 0$ ,  $r = 0.01$ . 当  $\alpha = 5.0 \times 10^5 \text{ rad/s}$  时, 因  $\alpha\tau$  较小, 环形腔处于稳定输出状态如图 2 所示. 当  $\alpha = 1.5 \times 10^6 \text{ rad/s}$  时, 因  $\alpha\tau$  不可忽略, 环形腔处于动态输出状态. 图 3 中的实线为动态输出曲线, 虚线为省略动态因子时的环形腔的输出.

## 2.2 正弦波调制<sup>[4]</sup>

$$\varphi(t) = \varphi_m \sin \omega_m t$$

$$E_4(t)/E_1 = jT_{14} + (T_{13}T_{24}/jT_{23}) \sum_{n=1}^{\infty} (T_{23}T_L)^n \times \exp \{j[n(\pi/2 + \beta L) + \sum_{m=1}^n \varphi_m \sin \omega_m(t - m\tau)]\} \\ = jT_{14} + (T_{13}T_{24}/jT_{23}) \sum_{n=1}^{\infty} (T_{23}T_L)^n \exp \{j[n(\pi/2 + \beta L) + [\varphi_m \sin(n\omega_m\tau/2)/\sin(\omega_m\tau/2)] \sin[\omega_m t - (n+1)\omega_m\tau/2]\} \quad (5)$$

式中  $\omega_m t$  为稳态因子、 $(n+1)\omega_m\tau/2$  为动态因子. 例如,  $\omega_m = 2\pi \times 3 \times 10^5 \text{ rad/s}$ ,  $\tau = 25 \text{ ns}$ ,  $k = T_L = 0.88$ ,  $r = 0.01$ , 则  $|E_4(t)/E_1|^2$  如图 4 所示. 如果省略  $(n+1)\omega_m\tau/2$ ,  $|E_4(t)/E_1| - 1|^2$  如图 5 所示. 因正弦函数为周期函数,  $\omega_m\tau$  非常小或  $\omega_m\tau$  很大但满足  $\omega_m\tau \approx 2m\pi$  ( $m$  为整数)时, 环形腔的

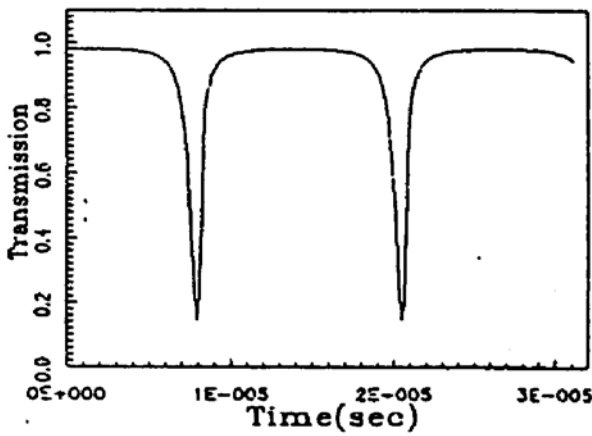


Fig. 2 Intensity transmission of the FORR.  
 $\alpha = 5 \times 10^5$  rad/sec

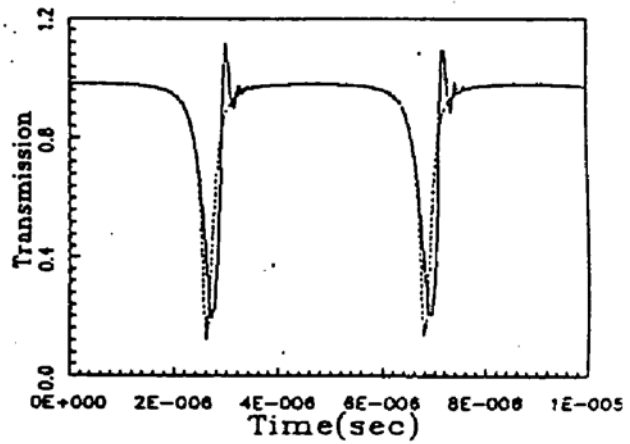


Fig. 3 Intensity transmission of the FORR. (dashed line for the case of neglecting the dynamic factor).  
 $\alpha = 1.5 \times 10^5$  rad/sec

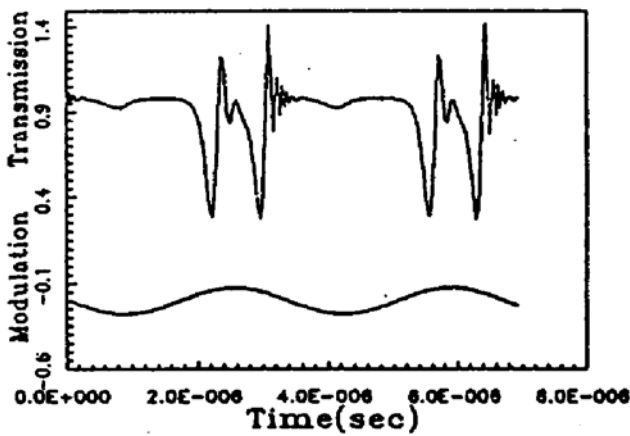


Fig. 4 Intensity transmission of the FORR

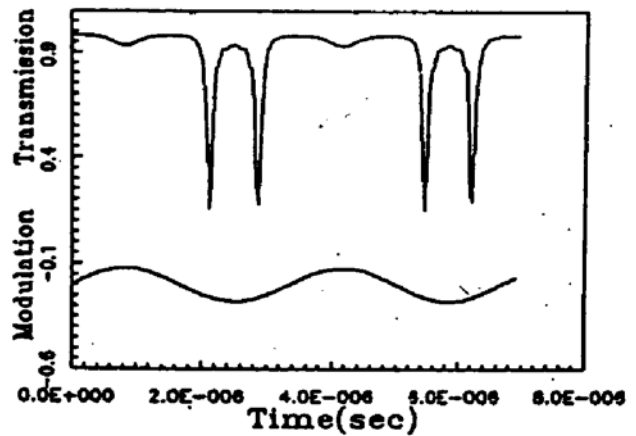


Fig. 5 Intensity transmission of the FORR (neglect dynamic factor)

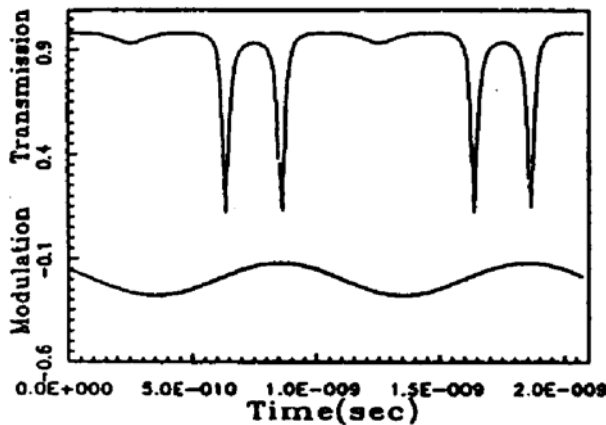


Fig. 6 Intensity transmission of the FORR.  
 $\omega_m = 2\pi \times 10^9$  rad/s,  $r = 0.01$ ,  $k = T_L = 0.88$ ,  $\tau = 25$  ns,  $\varphi_m = \pi$

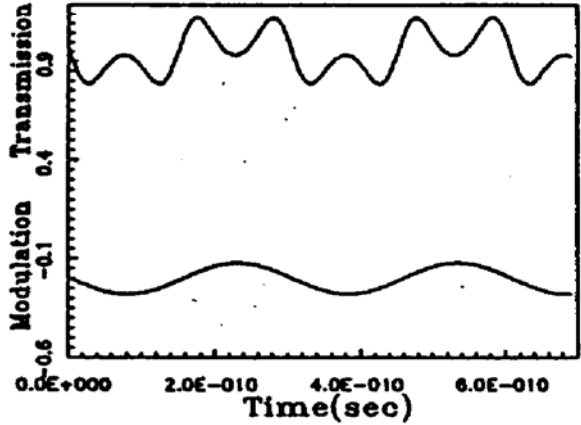


Fig. 7 Intensity transmission of the FORR  
 $r = 0.01$ ,  $\tau = 25$  ns,  $k = T_L = 0.88$ ,  $\varphi_m = \pi$ ,  $\omega_m = 2\pi \times 3.3 \times 10^9$  rad/s

动态响应很弱。例如， $\tau = 25$  ns,  $\omega_m = 2\pi \times 10^9$  rad/s,  $\omega_m \tau = 50\pi$  时，光纤环形腔的稳态输出如图 6 所示。  $\tau = 25$  ns,  $\omega_m = 2\pi \times 3.3 \times 10^9$  rad/s,  $\omega_m \tau = 2\pi \times 82.5$  时，光纤环形腔的动态输出如图 7 所示。光纤环形腔是否处于动态响应，由环中的  $T_L$  和  $k$  决定。(5) 式中的  $(T_L T_{23})$  为  $T_L$  和  $k$  的函数，而且因  $T_L T_{23} < 1$ ,  $n$  没有必要取到  $\infty$ , 一般取 20 ~ 40 之间的某一值，具体由  $T_L T_{23}$  的值来决定。动态因子  $(n+1)\omega_m \tau / 2$  与  $n$  即与  $T_L$ 、 $k$  有关，因为  $(n+1)\omega_m \tau / 2$  近似为零时， $\sin[\omega_m t$

$$-(n + 1)\omega_m\tau/2] = \sin \omega_m t,$$

Table 1 The condition of dynamic response of fiber optic ring resonator

| $K$ | $T_L=K$      | $T_L=0.99$    |
|-----|--------------|---------------|
| 0.1 | $F > 0.3770$ | $F > 0.0038$  |
| 0.2 | $F > 0.2073$ | $F > 0.0063$  |
| 0.3 | $F > 0.1508$ | $F > 0.0043$  |
| 0.4 | $F > 0.0879$ | $F > 0.0030$  |
| 0.5 | $F > 0.0547$ | $F > 0.0022$  |
| 0.6 | $F > 0.0314$ | $F > 0.0017$  |
| 0.7 | $F > 0.0176$ | $F > 0.0011$  |
| 0.8 | $F > 0.0082$ | $F > 0.0006$  |
| 0.9 | $F > 0.0025$ | $F > 0.00019$ |

环形腔处于稳定输出状态. 若将  $T_L$  和  $k$  减小, 则  $n$  也随之而减小. 此时  $\omega_m\tau$  即使增大, 但因  $n$  的减小,  $(n + 1)\omega_m\tau/2$  仍近似为零, 光纤环形腔仍处于稳定干涉状态. 即  $\omega_m\tau$  在什么范围内时环形腔处于动态响应是由  $k$  和  $T_L$  决定的. 表 1 列出了环形腔处于动态响应的条件, 其中的  $F$  为  $\omega_m\tau$  除以  $2\pi$  的余数.

综上所述, 对于单模光纤环形腔, 不论采用何种方式调制相位, 其输出特性取决于相位调制周期及光在环中的延迟时间, 若相位调制周期远大于延迟时间, 则环形腔处于稳态输出, 否则, 处于动态输出.

### 3 实验结果

系统如图所示, 取  $r = 0.01, k = 0.88, T_L = 0.71, \tau = 25 \text{ ns}, \varphi_m = \pi, \lambda_{\text{激光}} = 1.5385 \mu\text{m}$ .

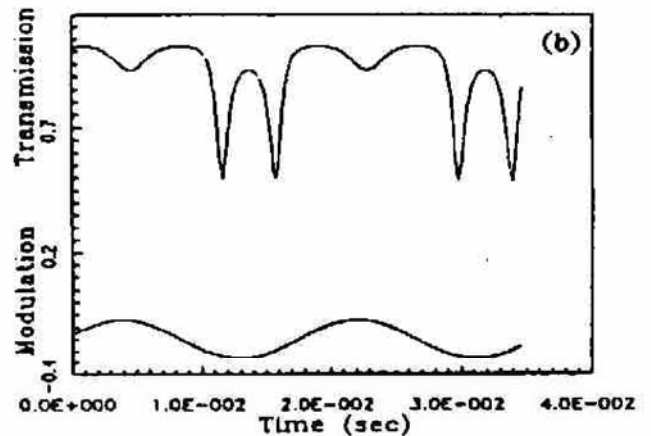
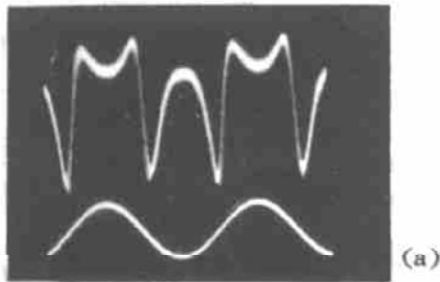


Fig. 8 Intensity transmission of the FORR  $\omega_m = 110 \pi$

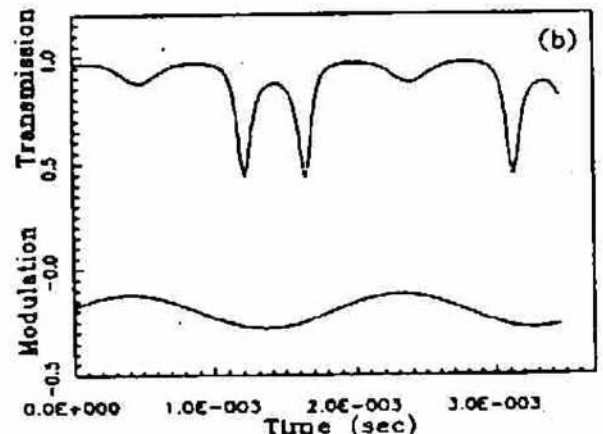
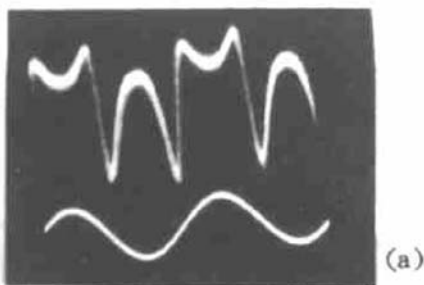


Fig. 9 Intensity transmission of the FORR  $\omega_m = 1046 \pi$

图 8 和图 9 为光纤环形腔在低频正弦波调制下的稳态输出. (a) 是实验结果, (b) 是理论结果. 图 10 和图 11 是光纤环形腔在高频正弦波调制时的动态响应. (a) 是实验结果, (b) 是理论结果. 本文分析了光纤环形腔的动态干涉及稳态干涉现象, 指出了正弦波相位调制时动态因子  $f_m\tau$  的值由光纤环形腔的  $T_L$  和  $k$  决定, 并且给出了当调制频率为 55 Hz-300 kHz 时的理论及实验结果. 理论和实验符合得很好.

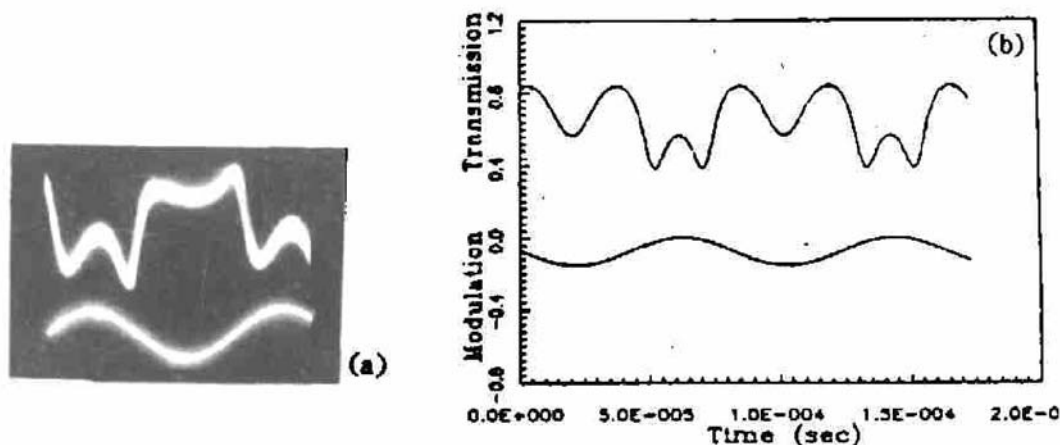


Fig. 10 Intensity transmission of the FORR  $\omega_m = 2.46 \times 10^4 \pi$  rad/s

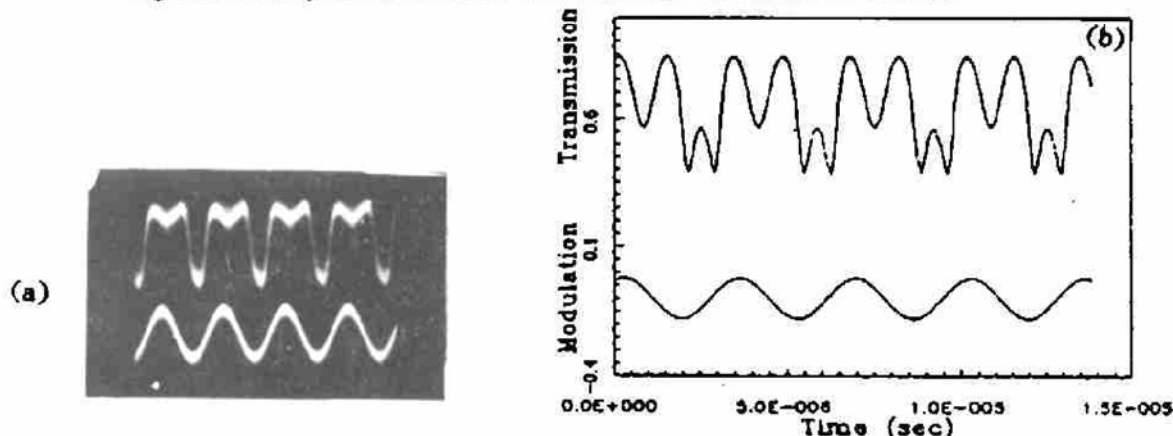


Fig. 11 Intensity transmission of the FORR  $\omega_m = 6 \times 10^5 \pi$  rad/s

(a) Experimental output intensity (b) theoretical intensity transmission

### 参 考 文 献

- [1] Yoshihiro Ohtsuka, Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope; dependence on resonator parameters and light-source coherence. *J. Lightwave Technology*, 1985, LT-3(2): 378~384
- [2] Katsumi Iwatsuki, Kazuo Hotate, Minoru Higashiguchi, Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro. *Appl. Opt.*, 1986, 25(15): 2006~2611
- [3] K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi, Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro. *Appl. Opt.*, 1984, 23(21): 3916~3924
- [4] Faramarz E. Seraji, G. Soundra Pandian, Dynamic response of a fiber optic ring resonator with sinusoidal phase modulation of the loop. *J. Mod. Opt.*, 1991, 38(4): 671~676
- [5] Z. K Ioannidis P. M. Radmore, I. P. Giles, Dynamic response of an all-fiber ring resonator. *Opt. Lett.*, 1988, 13(5): 422~424

### Dynamic Response of Fiber Optic Ring Resonator at 1.5 $\mu\text{m}$

An Haozhe Fang Yicen Liu Chongqi Jiang Peixuan Xu Daxiong  
(Department of Radio Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

(Received 23 August 1993; revised 20 December 1993)

**Abstract** In this paper, the dynamic response of a fiber optic ring resonator (FORR) is investigated by considering a sinusoidal phase modulation. The modulation frequency is from 55 Hz to 300 KHz and the amplitude is  $\pi$ . The steady factor and dynamic factor in a sinusoidal phase modulation and a sawtooth wave phase modulation is analyzed. The theoretical and experimental results are given.

**Key words** ring resonator, optical fiber, steady-state, dynamic response.