

# 光纤环形腔损耗对相干性的影响分析\*

杨亚培

(电子科技大学光电子技术系 成都 610054)

**提要** 应用部分相干光理论, 推导出了光纤环光谱传递函数。结合光纤环光学长度和耦合输出系数, 就损耗对光纤环光谱传递函数和相干性的影响进行了分析讨论。

**关键词** 光纤环, 相干性, 损耗

## 1 引 言

随着光纤及相关技术的发展, 光纤环形腔在窄谱宽激光器、光谱分析、光波分复用、光纤传感等方面表现出了许多应用价值, 出现了各种结构形式的环形腔<sup>[1~5]</sup>。分析环形腔的各种性质, 也是人们感兴趣的研究问题, L. F. Stokes 等分析了光纤环形腔的自由光谱范围、延迟时间<sup>[6]</sup>; Z. K. Ioannidis 等对光学环的动态响应、相位调制器产生的相位偏移进行了研究<sup>[7]</sup>; Paul. Urquhart 对光纤环 F-P 谐振腔的输出光强、精细常数、峰值透过率进行了分析<sup>[8]</sup>; Jianluo Zhang 等用等效模型和变换矩阵方法, 分析了复合光纤环谐振腔的输出光强度<sup>[9, 10]</sup>。因为光腔的损耗是不可避免的, 而且光纤环形腔输入的, 腔内存在的总是一个有一定光谱宽度的部分相干光。本文应用部分相干光理论, 得到了光纤环输出光场的自相关函数和光谱传递函数。并结合光纤环光学长度和耦合输出系数, 分析讨论了损耗对光纤环的光谱传递函数和相干性的影响。

## 2 光纤环形腔输出自相关函数

设光纤环损耗用等效的光纤环单圈光强损耗系数  $\alpha$  (单位: dB) 描述, 若设如图 1 所示光纤环的入射光场为  $V_i(t)$ , 则环形  $n$  圈的输出光场为

$$V_n(t) = 10^{-\frac{\alpha}{20}n} p (1 - p)^n V_i \left[ t - \frac{nl}{c} \right] \quad (1)$$

其中,  $p, l$  分别是光纤环光场耦合输出系数和光学长度,  $c$  为真空中光速。光纤环形腔的输出光场为

$$V_o(t) = \sum_{n=0}^{\infty} 10^{-\frac{\alpha}{20}n} p (1 - p)^n V_i \left[ t - \frac{nl}{c} \right] \quad (2)$$

将(2)式代入光场自相干函数的定义式<sup>[11]</sup>

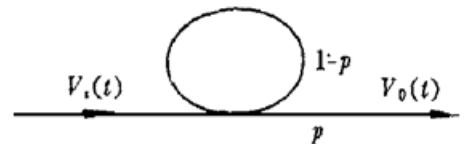


图 1 光纤环形腔示意图

Fig. 1 Scheme of an optical-fiber-ring cavity

\* 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点开放实验室基金资助项目。

$$\Gamma_o(\tau) = \left\langle V_o(t + \tau) V_o^*(t) \right\rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V_o(t + \tau) V_o^*(t) dt \quad (3)$$

并利用相干函数积分的时间平移性<sup>[12]</sup>

$$\left\langle V_i \left[ t - \frac{nl}{c} + \tau \right] V_i^* \left[ t - \frac{ml}{c} \right] \right\rangle = \Gamma_i \left[ \tau - \frac{(n-m)l}{c} \right] \quad (4)$$

得到光纤环输出光场的自相干函数

$$\Gamma_o(\tau) = \left\langle \left[ \sum_{n=0}^{\infty} p(1-p)^n 10^{-\frac{\alpha}{20}n} V_i \left[ t - \frac{nl}{c} + \tau \right] \right] \cdot \left[ \sum_{m=0}^{\infty} p(1-p)^m 10^{-\frac{\alpha}{20}m} V_i^* \left[ t - \frac{ml}{c} \right] \right] \right\rangle = \sum_{n,m=0}^{\infty} p^2(1-p)^{n+m} 10^{-\frac{\alpha}{20}(n+m)} \Gamma_i \left[ \tau - \frac{(n-m)l}{c} \right] \quad (5)$$

其中  $\Gamma_i(\tau)$  为入射光场的自相干函数。可见, 光纤环形腔输出光场自相干函数  $\Gamma_o(\tau)$  是由光纤环中环行第  $n$  与第  $m$  圈的两输入光场的互相干函数线性叠加而构成, 叠加系数由  $m, n$  以及耦合系数  $p$ , 损耗系数  $\alpha$  确定。因为  $0 < (1-p) 10^{-\frac{\alpha}{20}} < 1$ , 所以, 随着  $n, m$  的增大, 叠加系数  $(1-p)^{n+m} 10^{-\frac{\alpha}{20}(n+m)}$  越来越小, 对  $\Gamma_o(\tau)$  主要有作用的是  $(n+m)$  取小值的那些项。对于  $m = n$  的项,  $\Gamma_i \left[ \tau - \frac{(n-m)l}{c} \right] = \Gamma_i(\tau)$ , 这就是入射光场的自相干函数。

### 3 光纤环形腔光谱传递函数 $A(\nu)$

根据部分相干光理论<sup>[11]</sup>, 光场的光谱密度函数与其自相干函数互为傅里叶变换, 光纤环形腔输出光场的光谱密度函数  $G_o(\nu)$  为

$$G_o(\nu) = F\{\Gamma_o(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_o(\tau) \exp(j2\pi\nu\tau) d\tau \quad (6)$$

其中,  $F\{\}$  代表傅里叶变换。将(5)式代入(6)式, 并考虑到  $\int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_i(\tau) \exp(j2\pi\nu\tau) d\tau = G_i(\nu)$ , 可得

$$G_o(\nu) = \left[ \sum_{n,m=0}^{\infty} p^2(1-p)^{(n+m)} 10^{-\frac{\alpha}{20}(n+m)} \exp \left[ i2\pi\nu \frac{(n-m)l}{c} \right] \right] G_i(\nu) \quad (7)$$

其中,  $G_i(\nu)$  为入射光场光谱密度函数。再令  $G_o(\nu) = A(\nu) G_i(\nu)$ , 式中  $A(\nu)$  为光纤环形腔光谱传递函数, 有

$$A(\nu) = \sum_{n,m=0}^{\infty} p^2(1-p)^{(n+m)} 10^{-\frac{\alpha}{20}(n+m)} \exp \left[ i2\pi\nu \frac{(n-m)l}{c} \right] \quad (8)$$

可将(8)式展开为  $n = m, n > m, n < m$  三项相加; 再考虑到  $p, (1-p), 10^{-\frac{\alpha}{20}}$  取值范围均为  $[0, 1]$ , 利用级数公式<sup>[13]</sup>

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n = \frac{1}{1-x} \quad (|x| < 1)$$

可以化简(8)式, 得到光纤环形腔光谱传递函数

$$A(\nu) = \frac{p^2}{1 - 10^{-\frac{\alpha}{20}}(1-p)^2} \left[ 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (1-p)^j 10^{-\frac{\alpha}{20}j} \cos \left[ 2\pi\nu \frac{j l}{c} \right] \right] \quad (10)$$

光纤环形腔光谱传递函数  $A(\nu)$  与光纤环形腔耦合输出系数  $p$ , 光学长度  $l$  以及损耗密切相关。图 2 是  $l, p, \alpha$  取几组不同值时的光谱传递函数  $A(\nu)$  曲线。从图 2 可以看出,  $l$  相等曲线的透过峰间隔相等。这一点可以从分析(10)式得出, 光纤环的光学长度  $l$  一定时, 光频率  $\nu$  满足

$$v_0 \frac{l}{c} = k \quad (k \text{ 为整数}) \tag{11}$$

时,  $j$  无论取何值,  $\cos\left[2\pi v_0 \frac{j l}{c}\right] = 1$ , 此时,  $A(v)$  取最大值  $A_{\max}$ 。将  $\cos\left[2\pi v_0 \frac{j l}{c}\right] = 1$  代入(10)式, 并利用(9)式, 得到

$$A_{\max} = \frac{p^2}{1 - 10^{-\frac{\alpha}{10}}(1-p)^2} \cdot \frac{1 + (1-p)10^{-\frac{\alpha}{10}}}{1 - (1-p)10^{-\frac{\alpha}{10}}} \tag{12}$$

若令  $\alpha = 0$ , 上式 = 1。可见,  $v_0$  为光谱传递函数透过峰值频率。由(11)式可得透过峰值频率间隔为

$$\Delta v = c/l \tag{13}$$

此  $\Delta v$  就是光纤环形腔的自由光谱范围, 减小光纤环的长度可以增加光纤环的自由光谱范围, 这一点在图 2 中也清晰地表现出来。

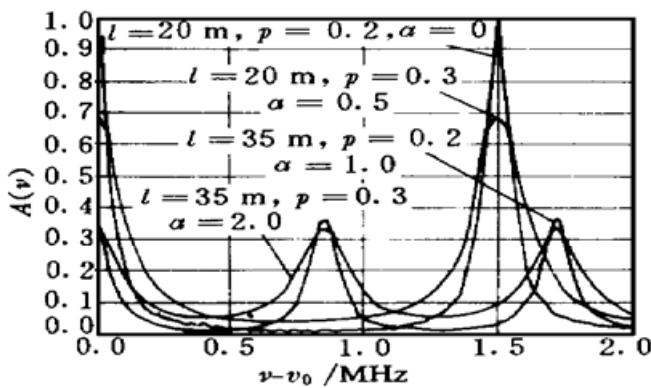


图 2 光学长度、耦合输出系数、损耗系数取几组不同值时的光纤环形腔光谱传递函数曲线

Fig. 2 Curves of the spectrum-transmission-function with different optical-lengths, different output-couple-coefficients, and the loss-coefficients

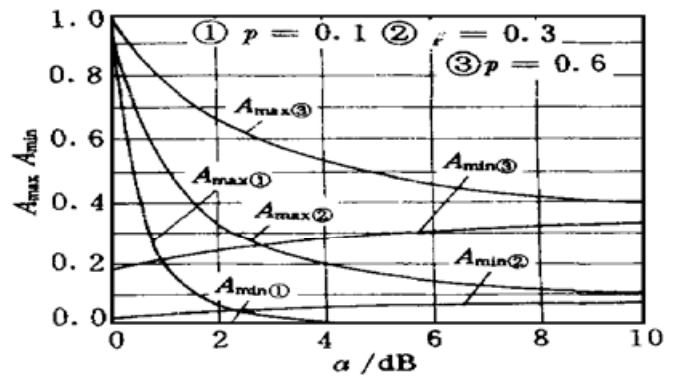


图 3 耦合系数取不同值时, 光纤环形腔光谱传递函数最大值、最小值随损耗系数变化曲线

Fig. 3 The maximum ( $A_{\max}$ ) and the minimum ( $A_{\min}$ ) of the spectrum-transmission-function as a function of the loss-coefficient  $\alpha$  with different output-couple-coefficients of the optical-fiber-ring

### 4 损耗对相干性的影响分析

光纤环形腔的相干性是指光纤环将输出光场的光谱能量有效地集中在尽可能少的频率成分附近的能力<sup>[12]</sup>。因此, 光纤环形腔的相干性, 不仅由光谱传递函数  $A(v)$  的透过峰间隔, 而且由  $A(v)$  的透过峰的大小、透过峰宽度、透过峰峰值对比度来表征。下面, 分析损耗系数对光谱传递函数  $A(v)$  的各种指标的影响, 即分析损耗对光纤环形腔相干性的影响。

从(13)式或者图 2 都可以得出, 损耗对光谱传递函数透过峰的间隔无影响。但是, 从图 2 可以看到, 随着损耗的增加,  $A(v)$  峰值下降, 峰值宽度变大, 光纤环的相干性明显变坏。由(10)式计算可知, 光谱传递函数  $A(v)$  的最大值  $A_{\max}$ , 最小值  $A_{\min}$  与光纤环光学长度  $l$  无关, 取决于  $\alpha$  和  $p$ 。图 3 是在  $p$  取不同值时,  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$  随损耗系数  $\alpha$  的变化曲线( $p = 0.1$  的  $A_{\min}$  曲线几乎就是横轴)。由图 3 可见, 随着损耗的增加,  $A_{\max}$  在减小, 这是损耗在光谱传递函数中的具体体现, 而且  $p$  取值愈小,  $A_{\max}$  随损耗下降得愈严重。对于某个  $p$  值, 随着损耗系数  $\alpha$  的增加,  $A_{\max}$  减小,  $A_{\min}$  增加,  $A(v)$  曲线起伏减缓, 尖锐程度随之下下降, 光纤环形腔相干性下降; 最终  $A(v)$  曲线趋于高度小于 1 的直线, 光纤环形腔也就无相干性可言。而且  $p$  越大,  $A(v)$  曲线趋于平缓、趋于直线的趋势更加明显。

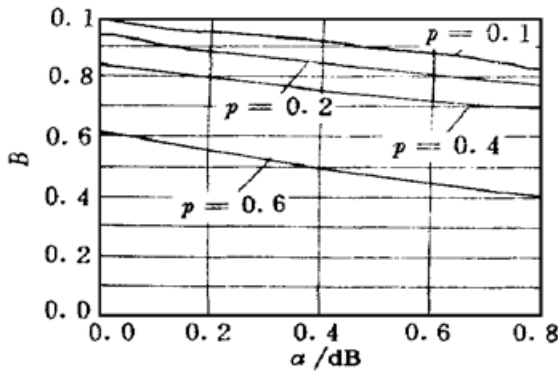


图 4 耦合输出系数取不同值时, 光谱传递函数对比度随损耗系数的变化曲线

Fig. 4 Contrast of the spectrum-transmission-function as a function of the loss-coefficient  $\alpha$  with diversified output-couple-coefficients of the optical-fiber-ring

用光纤环传递函数对比度  $B$  来描述  $A(\nu)$  曲线最大值  $A_{\max}$  与最小值  $A_{\min}$  差异,  $B$  的定义为

$$B = (A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min}) \quad (14)$$

$B$  越大, 表明透过峰在光谱传递函数  $A(\nu)$  曲线上越明显, 输出光谱能量越集中在透过峰频率附近, 相干性越好。图 4 是  $p$  取不同值时, 对比度  $B$  随着损耗系数  $\alpha$  的变化曲线。可见,  $B$  随着损耗的增加而减小; 而且  $p$  越大,  $B$  减小得越严重。

设透过峰峰值全宽度为  $\Delta\nu_{1/2}$ , 定义为

$$\frac{1}{2}(A_{\max} - A_{\min}) = \frac{p^2}{1 - 10^{-\frac{\alpha}{10}}(1 - p)^2} \left| 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (1 - p)^j 10^{-\frac{\alpha}{10}j} \cos \left[ 2\pi \frac{\Delta\nu_{1/2}}{2} \frac{j l}{c} \right] \right| \quad (15)$$

图 5(a) 所示的是, 光纤环形腔光学长度  $l$  取不同值时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随着损耗的变化曲线。可以看出, 在  $l$  一定时,  $\Delta\nu_{1/2}$

随着  $\alpha$  增加而增加, 而且, 光纤环形腔腔长  $l$  取小的值(如图中所示  $\leq 10$  m) 时,  $\alpha$  造成  $\Delta\nu_{1/2}$  变大的趋势严重。从图 5(a) 还可以看到, 即使不考虑损耗, 及令  $\alpha = 0$  时,  $\Delta\nu_{1/2}$  也随着  $l$  的减小而变大。因此, 在保证一定频率范围内光谱传递函数透过峰有一定数目, 即根据(13) 式, 频率间隔  $\Delta\nu$  取一定值的前提下, 光纤环形腔腔长  $l$  应尽量选取大的值。图 5(b) 所示的是, 光纤环耦合输出系数  $p$  取不同值时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随损耗系数的变化曲线。从图 5(b) 可看出, 在  $p$  一定时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随着  $\alpha$  增加而增加。而且, 光纤环耦合输出系数  $p$  取大的值(如图中所示  $\geq 0.6$ ) 时,  $\alpha$  造成  $\Delta\nu_{1/2}$  变大的趋势也更严重。图 5 还表明, 即使不考虑损耗, 及令  $\alpha = 0$  时,  $\Delta\nu_{1/2}$  也随着  $p$  的增大而变大。因此, 为了尽可能减小损耗引起的光纤环形腔相干性的下降, 耦合输出系数应选小的值。

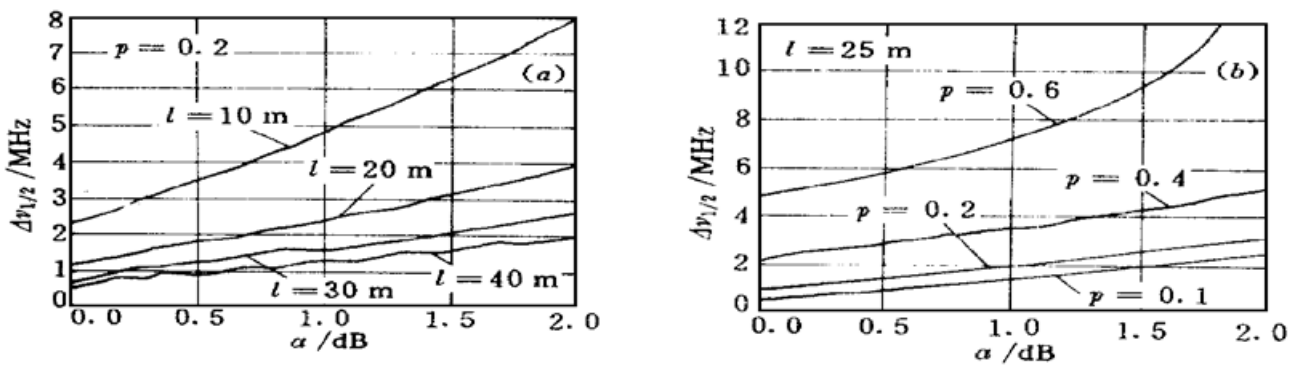


图 5 光谱传递函数透过峰宽度随着损耗系数的变化曲线

(a) 光纤环形腔光学长度取不同的值; (b) 耦合输出系数取不同的值

Fig. 5 Peak-bandwidth  $\Delta\nu_{1/2}$  of the spectrum-transmission-function as a function of the loss-coefficient  $\alpha$  with (a) different optical-lengths, and (b) different output-couple-coefficients of the optical-fiber-ring cavity

## 5 结 语

本文根据部分相干光理论得到的光纤环输出光场的自相关函数, 推导出了光纤环形腔的光谱传递函数, 它直接表示了光纤环形腔对于输入光场光谱分布函数的作用。结合光学长度和

耦合输出系数, 分析讨论了损耗对光谱传递函数  $A(\nu)$  即光纤环形腔相干性的影响。可以看到, 损耗不仅造成光纤环形腔输出光场在透过峰处的幅值减小, 而且造成峰值的宽度增大、光谱传递函数的对比度下降, 即光纤环形腔的相干性变坏。因此。尽可能减小损耗, 既是避免光纤环形腔输出光场能量损失的需要, 又是提高光纤环形腔相干性的需要, 这一点对于长度短、耦合输出系数大的光纤环形腔尤为重要。

### 参 考 文 献

- 1 Thomas J. Paul, Eric A. Swanson. Narrow-linewidth diode laser using a fiber-optic ring resonator. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1241~ 1243
- 2 A. Gloag, N. Langford. Continuously tunable single-frequency erbium ring fiber laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(5): 921~ 925
- 3 Kazuhiko Ogusu. Dynamic behavior of reflection optical bistability in a nonlinear fiber ring resonator. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(9): 1537~ 1543
- 4 G. Barbarossa, A. M. Matteo. Novel double-ring optical-guided-wave Vernier resonator. *IEE-Proc. -Optoelectron.*, 1997, **144**(4): 203~ 208
- 5 Y. H. Chew, Tjeng Thiang Tjhung, F. V. Chrys Mendis. An optical filter of adjustable finesse using an amplified fiber ring resonator. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2): 364~ 370
- 6 L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw. All-single-mode fiber resonator. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 288~ 290
- 7 Z. K. Ioannidis, P. M. Radmore, I. P. Giles. Dynamic response of an all-fiber ring resonator. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5): 422~ 424
- 8 Paul Urquhart. Transversely coupled fiber fabry-Perot resonator: theory. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3): 456~ 463
- 9 Jianluo Zhang, John. W. Y. Lit. Compound fiber ring resonator: theory. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(6): 1867~ 1873
- 10 Jianluo Zhang, John. W. Y. Lit. All-fiber compound ring resonator with a ring filter. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(7): 1256~ 1262
- 11 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics. Oxford England: Pergamon Press Ltd., 1980. 500~ 503
- 12 Yang Guoguang, Song Feijun. Advanced Physical Optics. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1991. 225~ 240 (in Chinese)
- 13 Fan Yingchuan *et al.*. Advanced Mathematics Teaching Material. Beijing: People Education Press, 1958. 47 (in Chinese)

## Analysis of the Influence of Loss on the Coherence of an Optical-fiber-ring cavity

Yang Yapei

(Department of Optoelectronic Technology, University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract** The spectrum-transmission-function (STF) of an optical-fiber-ring is obtained from the theory of partially-coherent-light. The influence of the optical-length, the output-couple-coefficient of the optical-fiber-ring cavity upon the STF and the coherence of the loss is also analyzed.

**Key words** optical-fiber-ring, coherence, loss