

光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究*

关柏鸥 余有龙 葛春风 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要 推导了光纤光栅法布里-珀罗腔强度透射率的解析表达式, 理论上研究了这种腔的透射特性, 并同普通法布里-珀罗腔做了比较; 讨论了光纤光栅法布里-珀罗腔单模输出阈值腔长与光纤光栅长度和反射率之间的关系。

关键词 光纤光栅, 法布里-珀罗腔, 透射特性。

1 引 言

自 1978 年 Hill 小组首次报道了光纤中的光致光栅效应以来^[1], 光折变光纤光栅一直为人们所重视。特别是 1989 年 Meltz 等人发展了紫外光侧面写入光纤光栅技术以后, 光纤光栅的应用研究迅猛发展, 各种光纤光栅有源、无源器件不断涌现^[2, 3]。利用光纤光栅的反馈作用构造光纤光栅法布里-珀罗腔, 是光纤光栅的一个典型应用。这种腔结构可以用来构成线形腔光纤激光器^[4, 5], 亦可以用作环形腔光纤激光器的选频、调谐装置^[6]。本文对光纤光栅法布里-珀罗腔的透射特性进行了理论分析, 给出了强度透射率的解析表达式; 将其同普通法布里-珀罗腔做了比较; 讨论了光纤光栅法布里-珀罗腔单模输出阈值腔长与光纤光栅长度及反射率之间的关系, 为光纤光栅法布里-珀罗腔的优化设计与实际应用提供了理论基础。

2 理 论

图 1 是周期为 Λ 的光纤布拉格光栅的结构示意图。其反射、透射特性可用耦合模理论描述。后向传播和前向传播的光波分别表示为 $a(z) = A(z) \exp(i\beta z)$ 和 $b(z) = B(z) \exp(-i\beta z)$, β 为传播常数。如果给定边界条件 $B(0) = B_0$ 和 $A(L) = 0$, 即只有前向波 $b(0) = B_0$

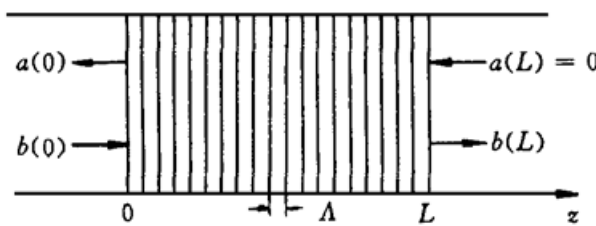


Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating

入射时, 反射波(后向输出)和透射波(前向输出)可分别表示为^[7]

$$a(0) = \frac{k \sinh(SL)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} b(0), \quad (1)$$

$$b(L) = \frac{iS \exp(-i\beta_0 L)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} b(0), \quad (2)$$

式中 L 为光栅长度, k 为耦合系数, $S = (k^2 -$

* 国家自然科学基金重点项目资助。

收稿日期: 1998-04-17; 收到修改稿日期: 1998-09-28

$\Delta\beta^2)^{1/2}$, $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 2n\pi/\lambda - 2n\pi/\lambda_B$, λ 为光波波长, $\lambda_B = 2n\Lambda$ 为布拉格波长。

定义光纤光栅的反射系数 r_g 和透射系数 t_g 分别为 $r_g = a(0)/b(0) = |r_g| \exp(i\Phi)$ 和 $t_g = b(L)/b(0) = |t_g| \exp(i\Phi)$, 由(1)式、(2)式可得

$$|r_g| = \frac{k \sinh(SL)}{[\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)]^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\Phi = \pi + \arctan \frac{S \cosh(SL)}{\Delta\beta \sinh(SL)}, \quad (4)$$

$$|t_g| = \frac{S}{[\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$\Phi = -\frac{\pi}{2} - \beta_0 L + \arctan \frac{S \cosh(SL)}{\Delta\beta \sinh(SL)}. \quad (6)$$

光纤光栅的光强反射率和透射率分别为 $R_g = |r_g|^2$ 和 $T_g = |t_g|^2$ 。

同一根光纤上的两个布拉格波长相同的光栅便构成光纤光栅法布里-珀罗腔, 如图 2 所示。光纤光栅 1(FBG₁) 的反射系数和透射系数分别为 r_{g1} 、 t_{g1} , 长度为 L_1 ; 光纤光栅 2(FBG₂) 的反射系数和透射系数分别为 r_{g2} 、 t_{g2} , 长度为 L_2 ; 法布里-珀罗腔的腔长为 h 。

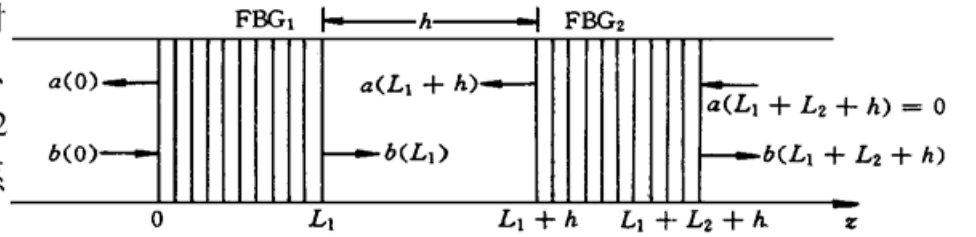


Fig. 2 Schematic diagram of fiber grating Fabry-Perot cavity

如果给定边界条件 $B(0) = B_0$

和 $A(L_1 + L_2 + h) = 0$, 则法布里-珀罗腔内 $z = L_1$ 处的前向波 $b(L_1)$ 应满足如下方程式

$$b(L_1) = t_{g1}b(0) + r_{g1}r_{g2} \exp(-i2\beta h)b(L_1), \quad (7)$$

解得

$$b(L_1) = \frac{t_{g1}b(0)}{1 - r_{g1}r_{g2} \exp(-i2\beta h)}, \quad (8)$$

由此可得法布里-珀罗腔外 $z = L_1 + L_2 + h$ 处的透射波为

$$b(L_1 + L_2 + h) = t_{g2} \exp(-i\beta h)b(L_1) = \frac{t_{g1}t_{g2} \exp(-i\beta h)}{1 - r_{g1}r_{g2} \exp(-i2\beta h)}b(0). \quad (9)$$

为了简化分析, 假定两个光纤光栅是完全一样的, 并令 $r_{g1} = r_{g2} = |r_g| \exp(i\Phi)$, $t_{g1} = t_{g2} = |t_g| \exp(i\Phi)$, 则透射波可表示为

$$b(L_1 + L_2 + h) = \frac{|t_g|^2 \exp[i(2\Phi - \beta h)]}{1 - |r_g|^2 \exp[i2(\Phi - \beta h)]}b(0). \quad (10)$$

法布里-珀罗腔的透射光强为 $I_t = b(L_1 + L_2 + h)b^*(L_1 + L_2 + h)$, 光强透射率为 $T_{F-P} = I_t/I_i$, 将(10)式代入并化简后可得

$$T_{F-P} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\beta h - \Phi)}, \quad (11)$$

式中

$$F = 4R_g/(1 - R_g)^2. \quad (12)$$

同样地, 可得到光纤光栅法布里-珀罗腔的光强反射率为

$$R_{F-P} = \frac{F \sin^2(\beta h - \Phi)}{1 + F \sin^2(\beta h - \Phi)}. \quad (13)$$

3 讨 论

由(11)式可以看出,与普通法布里-珀罗腔相比,光纤光栅法布里-珀罗腔的光强透射率 T_{F-P} 的表达式中多了一个相位因子 ϕ ; 另外,光纤光栅的光强反射率 R_g 不是常数,而是波长 λ 的函数。由此导致光纤光栅法布里-珀罗腔与普通法布里-珀罗腔透射特性上的差异。

3.1 谱线数目与谱线间距

光纤光栅法布里-珀罗腔的透射谱如图3中实线所示,图中计算所用的参数分别为 $\lambda_B =$

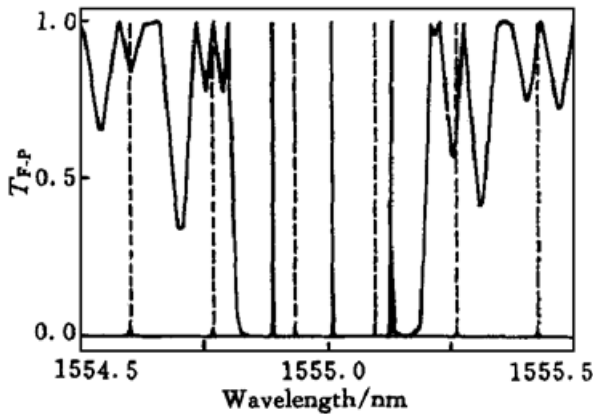


Fig. 3 Transmission spectrum of Fabry-Perot cavity. Solid line and dashed line correspond to fiber grating Fabry-perot cavity and ordinary Fabry-Perot cavity, respectively

1555 nm, $k = 6.0 \times 10^{-7}$, $L = 0.5$ cm, $h = 0.5$ cm。光纤光栅的最大反射率为 $R_g^{(\max)} = R_g(\Delta\beta = 0) = \tanh^2(kL)$, 计算可得 $R_g^{(\max)} = 0.99$ 。图中的虚线为由反射率为 0.99 的普通反射镜构成的法布里-珀罗腔(腔长为 0.5 cm)的透射谱。由图3可见,光纤光栅法布里-珀罗腔只有 3 条输出谱线。由于光纤光栅具有一定的反射带宽,它只能对其反射带以内的光波提供反馈,反射带以外的光波无法在法布里-珀罗腔内谐振,因此在光纤光栅反射带以外没有谐振峰。

可见,光纤光栅的反射带宽起着对腔内模式数(即输出谱线数目)的限制作用,光纤光栅的反射带宽越窄,法布里-珀罗腔所能容纳的模式数越少。从图3中还可以看出光纤光栅法布里-珀罗腔的谱线间距同普通法布里-珀罗腔相比有所不同,由于光纤光栅反

射率相位因子 ϕ 的作用,使得光纤光栅法布里-珀罗腔的谱线间距变小。

3.2 谱线的半宽度

从图3中可以看出,光纤光栅法布里-珀罗腔的透射谱线的半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 随波长 λ 发生明显变化,位于两侧的谱线明显比中心处谱线宽得多。

普通法布里-珀罗腔的透射谱线的半宽度为^[8]

$$\Delta\lambda_{1/2} = \frac{\lambda^2}{2\pi h} \frac{1-R}{\sqrt{R}}, \quad (14)$$

其中,腔镜的反射率 R 为常数。在较小的波长范围内,谱线半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 无明显变化,如图3中虚线所示。光纤光栅法布里-珀罗腔的情况却有所不同,光纤光栅的反射率 $R_g(\lambda)$ 是波长 λ 的函数。当光波波长 λ 偏离光纤光栅布拉格波长 λ_B 时,反射率 $R_g(\lambda)$ 降低;偏离程度越大,反射率 $R_g(\lambda)$ 降低越严重,如图4所示(计算所用参数同上)。因此导致光纤光栅法布里-珀罗腔透射谱线半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 随光波波长 λ 明显变化,当透射谱线波长 λ 偏离布拉格波长 λ_B 时,谱线明显变宽。由此可见,要想利用光纤光栅法布里-珀罗腔产生窄线宽输出,应使工作波长 λ 尽可能接近光纤光栅布拉格波长 λ_B , 这一点对于实际应

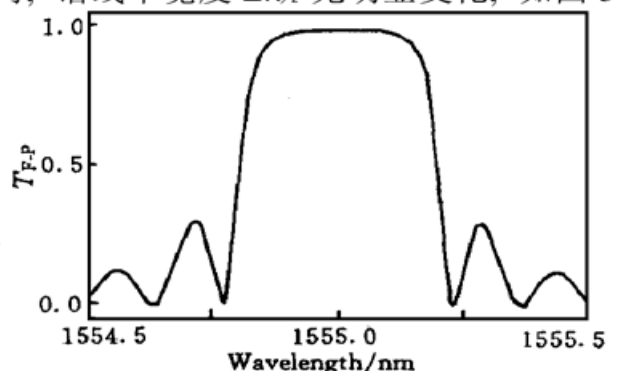


Fig. 4 Reflection spectrum of fiber grating reflector

用来说是很重要的。

3.3 单模输出的阈值腔长

当光纤光栅法布里-珀罗腔的腔长 h 逐渐减小时, 其输出谱线间距 $\Delta\lambda$ 逐渐增大。当腔长减小到一定程度时, 腔内至多只能容纳一个模式运转, 法布里-珀罗腔呈现单模输出。因此把光纤光栅法布里-珀罗腔单模运转的最大腔长值定义为单模输出的阈值腔长 h_t 。如果 λ_B 、 k 和 L 取值同上, 通过计算得到此时的阈值腔长为 $h_t = 0.18 \text{ cm}$, 此时光纤光栅法布里-珀罗腔的输出谱线如图 5(a) 所示。图 5(b) 为 1555 nm 附近输出谱线的放大图, 谱线半宽度为 0.00075 nm (约为 100 MHz)。

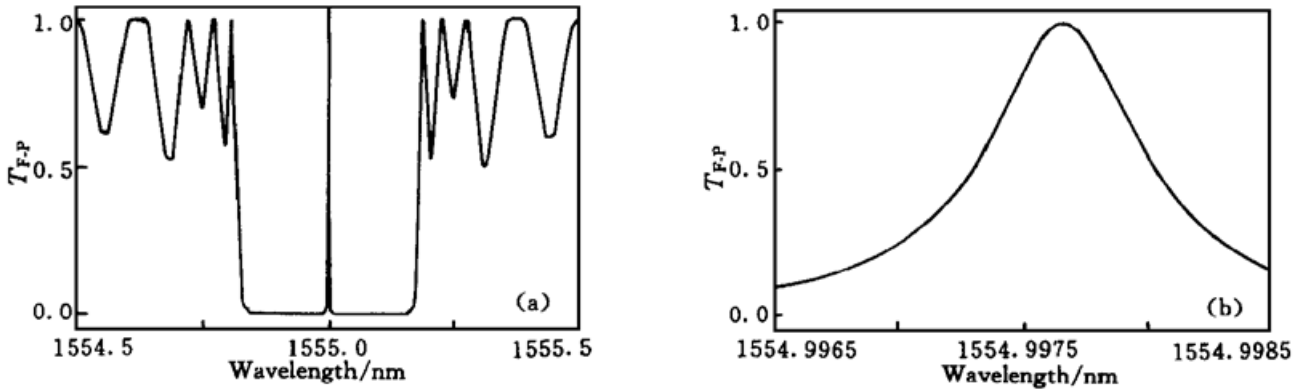


Fig. 5 Transmission spectrum of Fabry-Perot cavity. Curve (a) correspond to $h = 0.18 \text{ cm}$; curve (b) is amplification of resonance speak in curve (a)

显然, 阈值腔长 h_t 与光纤光栅反射带宽 $\Delta\lambda_g$ 有关, h_t 随 $\Delta\lambda_g$ 的减小而增大。光纤光栅反射带宽 $\Delta\lambda_g$ 由下式给出^[3]

$$\Delta\lambda_g = \frac{\lambda_B^2}{\pi mL} [(kL)^2 + \pi^2]^{1/2}. \quad (15)$$

当光栅最大反射率 $R_g^{(\max)} = \tanh^2(kL)$ 一定(即 kL 一定)时, 光纤光栅反射带宽 $\Delta\lambda_g$ 随光栅长度 L 的增大而减小。因此, 光纤光栅法布里-珀罗腔的单模输出阈值腔长 h_t 随光纤光栅长度 L 的增大而增大。 h_t 随 L 的变化情况如图 6 所示。

计算表明, 光纤光栅法布里-珀罗腔单模输出的阈值腔长 h_t 还与光纤光栅反射率 R_g 有关。 h_t 随 R_g 的增大而减小, 如图 7 所示。

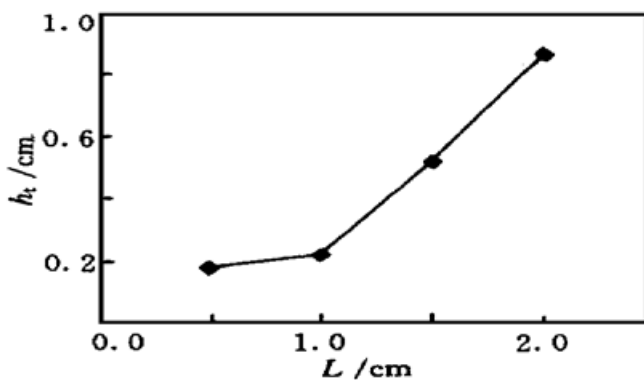


Fig. 6 Threshold cavity length h_t of fiber grating Fabry-Perot cavity with single mode output versus fiber grating length L using theoretical data

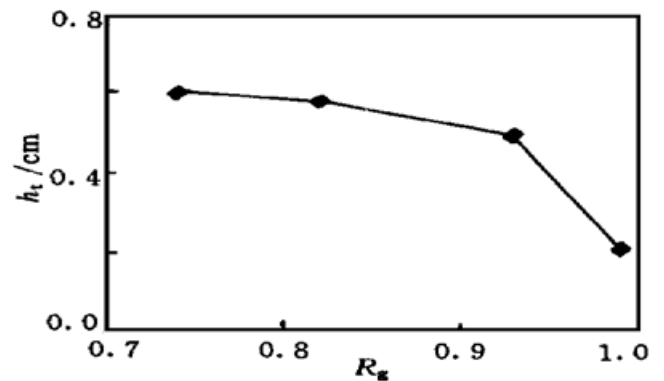


Fig. 7 Threshold cavity length h_t of fiber grating Fabry-Perot cavity with single mode output versus fiber grating reflectivity R_g using theoretical data

结 语 本文推导了光纤光栅法布里-珀罗腔光强透射率的解析表达式, 对其透射特性进行

了理论分析。与普通法布里-珀罗腔相比, 光纤光栅法布里-珀罗腔的输出谱线间距变窄; 其谱线半宽度与波长有关, 透射波长偏离光栅布拉格波长时, 谱线明显变宽; 光纤光栅法布里-珀罗腔单模输出的阈值腔长随光纤光栅长度的增大而增大, 随光纤光栅反射率的增大而减小。通过以上分析, 为光纤光栅法布里-珀罗腔的优化设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10) : 647~ 649
- [2] Meltz G, Morey W W, Geleyn W H. Formation of Bragg grating in optical fibers by transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15) : 823~ 825
- [3] Bennion I, Williams J A R, Zhing L *et al.*. UV-written in-fiber Bragg gratings. *Opt. and Quant. Electron.*, 1996, **28**(2) : 93~ 135
- [4] Zyskind J L, Mizrahi V, DiGiovanni D J *et al.*. Short single frequency erbium-doped fiber laser. *Electron Lett.*, 1992, **28**(15) : 1385~ 1387
- [5] Andreas Othonos, Xavier Lee, Din Ping Tsai. Spectrally broadband Bragg grating mirror for an erbium-doped fiber laser. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(4) : 1088~ 1092
- [6] Tetsuro Komukai, Masataka Nakazawa. Tunable single frequency erbium-doped fiber ring laser using fiber grating etalons. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(6A) : L679~ L680
- [7] Lam D K W, Garside B K. Characterization of single-mode optical filters. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(3) : 440~ 445
- [8] 廖延彪编. 物理光学. 北京: 电子工业出版社, 1986. 91

Theoretical Studies on Transmission Characteristics of Fiber Grating Fabry-Perot Cavity

Guan Bai-ou Yu Youlong Ge Chunfeng Dong Xiaoyi
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 17 April 1998; revised 28 September 1998)

Abstract The transmission characteristics of Fiber Grating Fabry-Perot Cavity have been analyzed theoretically. The analytical expression of transmissivity has been given and compared with ordinary Fabry-Perot cavity. The influences of grating length and reflectivity on threshold cavity length for fiber grating Fabry-Perot cavity with single mode output have been discussed.

Key words fiber grating, Fabry-Perot cavity, transmission characteristics.