

# 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模特性研究\*

吕昌贵 崔一平<sup>†</sup> 王著元 恽斌峰

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

(2003 年 4 月 4 日收到, 2003 年 5 月 4 日收到修改稿)

分析了光纤布拉格光栅构成的法布里-珀罗(F-P)腔的透射谱特性, 讨论了光栅带宽、反射系数相位因子以及腔长对 F-P 腔透射特性的影响, 并对 F-P 腔随温度和应变的特性进行了分析, 然后给出如何在光栅中心耦合波长处单模运转的法布里-珀罗腔, 并提供了数值模拟结果和实验结果.

关键词: 光纤布拉格光栅, 法布里-珀罗(F-P)腔, 光纤激光器

PACC: 4281W, 4281, 4280S, 4280

## 1. 引 言

密集波分复用(DWDM)技术是光纤通信的主要发展方向. 窄带、波长可调的光源是用于波分复用光通信系统中的关键元件. 光纤激光器与光纤系统的可兼容性、紧凑的尺寸和简单的结构, 使得它在波分复用系统中的应用极具吸引力. 采用不同内腔调谐结构的可调环形光纤激光器已有报道<sup>[1, 2]</sup>. 这类激光器尽管是单频输出, 但是存在着模式之间的跳变. 在环形光纤激光器中加入两个光纤 Fabry-Perot 腔形成窄带宽滤波器可以抑制模式之间跳变. 但是这种环形腔至少有几米长, 邻近腔模间隔小, 其热诱导跳变依然存在<sup>[3, 4]</sup>.

减小腔长可以减少腔模数量, 腔长减小带来的腔增益减小成为需要解决的主要问题. 对紫外感光的宽抽运吸收带宽新型 Er/Yb 光纤的研制成功<sup>[5]</sup>解决了这个问题. 它在 980 nm 处的抽运吸收强度比普通 Er 掺杂光纤高出两个量级. 直接在增益光纤上写入一对布拉格光栅, 减小了腔内损耗及腔长. 这种线性腔光纤光栅激光器不仅阈值低、激光输出斜效率高、带宽窄、调谐范围大, 而且可在无需放大、反馈的自由运行条件下实现纯单频单偏振模高功率稳定输出<sup>[5, 6]</sup>. 它将会在对波长选择要求严格、波长稳定性要求高的应用中(如密集波分复用系统、光纤同轴有线电视系统及相干光纤光雷达系统等)成为半导

体分布反馈激光器强有力的竞争对手. 腔长 1cm 输出功率 57μW 的短腔单频掺铒光纤激光器已有报道. 由于腔长很短, 腔模间隔可与光栅带宽比拟, 因此这种短腔激光器加热至 90℃ 时都不存在模式的跳变<sup>[7]</sup>. 对于这种线性腔光纤激光器, 由一对光纤布拉格光栅组成的谐振腔的设计成为关键. 这种 F-P 腔与普通 F-P 腔不同之处在于布拉格光栅只在带宽内存在反射, 并且其反射系数相位因子不同. 目前对光纤光栅 F-P 腔的分析没有从反射系数相位因子的影响来研究腔的纵模特性, 也没有针对这种线性腔光纤激光器所关心的单模运转以及腔的温度和应变的变化特性等来进行. 本文先讨论了光纤光栅 F-P 腔的纵模特性, 着重讨论了光栅反射系数相位因子的影响, 并对这种 F-P 腔的温度和应变特性进行了分析, 然后给出了如何设计这种单模运转的光纤光栅 F-P 腔.

## 2. 理论分析

假定光栅折射率调制大小仅是对光纤导模有效折射率的一种微扰, 用下式描述:

$$n_{\text{eff}}(z) = n_{\text{eff}} + \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + \nu \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为光纤未曝光时的有效折射率,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z)$  为有效折射率平均调制,  $\nu$  为折射率变化的条纹可见

\* 国家杰出青年科学基金(批准号: 60125513)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: cyp@seu.edu.cn Tel: 86-25-3601769

度  $\Lambda$  为光栅周期,  $\phi(z)$  描述光栅的啁啾. 这种均匀布拉格光纤光栅的反射系数  $r$  和透射系数  $t$  分别为<sup>[8]</sup>

$$r = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}, \quad (2)$$

$t =$

$$\frac{\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}}{\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L) - i\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}. \quad (3)$$

从(2)式可以得到光栅反射系数的相位角  $\varphi_r$ , 即光波经光纤光栅反射后的相位变化

$$\varphi_r = \begin{cases} \pi + \arctan\left(-\frac{\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}\right), & \lambda \leq \lambda_B, \\ \arctan\left(-\frac{\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}\right), & \lambda > \lambda_B. \end{cases} \quad (4)$$

在(2)(3)(4)式中,  $\kappa = \frac{\pi}{\lambda} v \overline{\delta n_{\text{eff}}}$  为交流耦合系数,  $L$  为光栅长度,  $\hat{\sigma} = \left(\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}\right) + \frac{2\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}}}{\lambda} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$  为总的直流自耦合系数,  $\lambda_B = 2\Lambda(n_{\text{eff}} + \delta n_{\text{eff}})$  为中心反射波长.

由两个均匀布拉格光纤光栅(FBG)组成的 Fabry-Pero(F-P)腔结构如图 1 所示.

的耦合反射作用, 因此这种由一对 FBG 组成的法布里-珀罗腔只能在光纤光栅的反射带宽内谐振, 在反射带宽外没有谐振峰. 这是这种腔相对于普通光纤法布里-珀罗腔的突出特点.

为简化讨论, 假定组成 F-P 腔的一对光纤布拉格光栅完全相同.

如果光纤光栅 F-P 腔长和波长满足相位谐振条件

$$\delta + 2\varphi_r = 2m\pi \quad (m \text{ 为自然数}), \quad (7)$$

$\varphi_r$  是 FBG 在波长  $\lambda$  处的反射系数的相位因子, 则腔在该波长  $\lambda$  处有谐振峰. F-P 腔的谐振谱线宽度主要决定于光栅在该谐振波长附近的反射率大小. 反射率越小, 谐振谱线宽度越大. 由于光纤光栅在其中心反射波长  $\lambda_B$  处的反射率最强, 在波长  $\lambda_B$  处总直流自耦合系数  $\hat{\sigma}$  为零使得在该波长处反射系数的相位角始终为  $\frac{\pi}{2}$ , 并且光栅的反射谱线关于波长  $\lambda_B$  对称, 因此, 希望设计的光纤光栅 F-P 腔在光栅的中心反射波长  $\lambda_B$  处存在谐振, 在这种情况下

$$\frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda_B} = (2m - 1)\pi, \quad (8)$$

将  $\lambda_B = 2\Lambda(n_{\text{eff}} + \delta n_{\text{eff}})$  代入(7)式可以得到

$$L = \left(m - \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{\delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}\right) \Lambda. \quad (9)$$

也就是说, 当腔长  $L$  满足(9)式时, 光纤光栅 F-P 腔

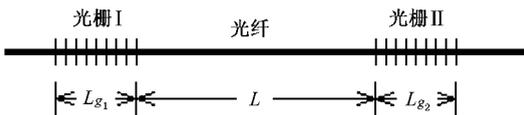


图 1 光纤光栅 F-P 腔的结构示意图

这种 F-P 腔的透射系数  $U_t$  和透射率  $I_t$  分别为<sup>[9]</sup>

$$U_t = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2 e^{i\delta}}, \quad (5)$$

$$I_t = U_t U_t^*. \quad (6)$$

(5)(6)式中的  $r_1$  和  $r_2$  分别为 FBG1 和 FBG2 的反射系数,  $t_1$  和  $t_2$  分别为 FBG1 和 FBG2 的透射系数, 光程差  $\delta = \frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda}$ .

光纤光栅的反射光谱特性决定了这种光纤光栅 F-P 腔谐振特性与普通 F-P 腔的不同. 光纤布拉格光栅只在中心耦合波长附近的窄带宽内对光有较强

在光栅的中心耦合波长  $\lambda_B$  处存在谐振. 从(7)(9)式还可以看出, 如果腔长满足(9)式, 当腔长再逐渐变化约一个光栅空间周期的长度时, F-P 腔的谐振峰先偏离光纤布拉格光栅的中心波长, 然后再重新出现在光纤布拉格光栅的中心波长处; 当腔长逐渐变化约半个光栅空间周期的长度时, F-P 腔的谐振峰关于光纤布拉格光栅的中心波长对称.

从(7)式可以得到光纤光栅 F-P 腔的相邻谐振峰之间的间隔  $\Delta\lambda$  满足

$$4\pi n_{\text{eff}} L \frac{|\Delta\lambda|}{\lambda_B} + 2|\varphi_r(\lambda_B) - \varphi_r(\lambda_B + \Delta\lambda)| = 2\pi. \quad (10)$$

从上式可以看出由于光纤光栅反射率相位因子的存在, 其腔的谐振谱线之间的间隔要比等腔长  $L$  的普通法布里-珀罗腔的谱线间距要小. 显然, 谐振谱线间隔与反射率大小无关, 而与腔长  $L$  和光纤光栅反射系数的相位因子有关.

从(4)式计算可以得到均匀光纤光栅反射系数的相位角, 其与波长的关系如图2. 如果以光纤光栅中心耦合波长两边光栅反射率为零所对应的波长之间的间隔作为光栅的带宽, 则光栅在带宽内反射系数相位角的变化是连续的, 从带宽的短波长反射率零点的  $\frac{3\pi}{2}$  逐渐减小到长波长反射率零点的  $-\frac{\pi}{2}$ . 因此, 光栅带宽越小, 其反射系数的相位因子随波长变化越大. 而且相位因子在光栅中心耦合波长  $\lambda_B$  处始终为  $\frac{\pi}{2}$ .

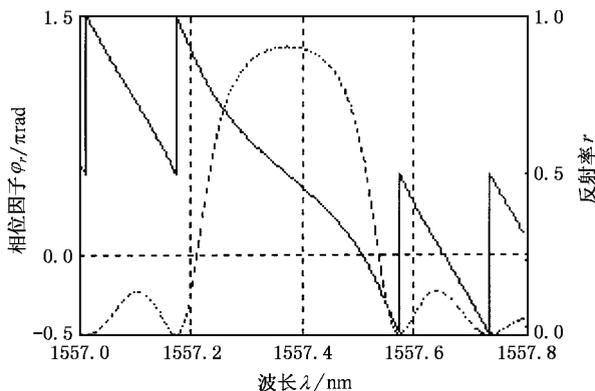


图2 光纤布拉格光栅反射系数相位因子与波长的关系(光栅的参数  $n_{\text{eff}} = 1.4545$ ,  $\Lambda = 535.295\text{nm}$ ,  $\delta n_{\text{eff}} = 0.0001875$ ,  $L_{\text{gl}} = L_{\text{gp}} = 4.8\text{mm}$ )

如果组成腔的光纤光栅特性不变, 两光栅之间的腔长  $L$  减小, 腔的谐振谱线间隔增大, 光纤光栅

带宽内的谐振纵模数减小. 与普通 F-P 腔不同的是, 由于  $L$  减小, 光纤光栅的反射率相位因子作用增大, 谐振谱线间隔增加的程度要比普通 F-P 腔的变化程度小. 从(10)式还可以看出, 由于光栅反射率相位因子的作用, 如果要求谱线间隔为带宽的一半, 光栅之间的腔长  $L$  值必须减小到零. 也就是说这种腔在上述第一对反射率零点带宽内总有多数谐振峰. 通常情况下, 只要谱线间隔大于光栅的 3dB 带宽的一半时, 就可以认为光纤光栅 F-P 腔实现了单模运转. 由(2)式和(10)式以及单模运转判定条件就可以得到光纤光栅 F-P 腔单模运转时的最大腔长  $L_r$ , 即阈值腔长. 由于光栅反射光谱的对称性, 当腔在光栅的布拉格波长处单模运转时, 允许最大的阈值腔长.

对于光纤光栅 F-P 腔, 如果其腔长  $L$  和光栅中心耦合波长  $\lambda_B$  都不变, 光纤光栅的带宽越小, 光栅的反射系数相位因子影响就越大, 其谐振谱线间隔就要比光栅带宽较大的 F-P 腔的谐振谱线间隔要小. 但是在带宽内相对应的位置上, 光栅反射系数相位因子的作用几乎相同, 而带宽越小, 腔在单模运转时所要求的谐振谱线间隔就越小, 所以腔的单模运转阈值腔长就越大. 也就是说, 光纤布拉格光栅的反射带宽越窄, 由其组成的 F-P 腔能够谐振的纵模数就越少, 越容易实现单模运转, 所允许的阈值腔长越大.

光纤布拉格光栅波长  $\lambda_B$  与应变和温度都成线性关系, 可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\Delta\lambda_B = K_{\epsilon B} \epsilon + K_{TB} \Delta T, \quad (11)$$

其中  $\epsilon$  和  $\Delta T$  分别为应变和温度变化量;  $K_{\epsilon B}$  和  $K_{TB}$  分别为光纤布拉格光栅的应变和温度系数, 其大小主要由光纤光栅的材料、光栅周期决定. 温度对光栅的影响可以等效为应变的影响. 对光纤布拉格光栅 F-P 腔整体施加应变时, 光栅的空间周期和腔长等比例变化, 从(9)式可以知道, 这种等比例变化使得腔的纵模相对于光纤布拉格光栅反射谱的位置不改变, 而是随着应变引起的光栅反射峰的漂移, 光纤光栅 F-P 腔透射光谱整体漂移, 漂移特性与光纤布拉格光栅相同. 因此, 实用中可以利用应变来补偿温度引起的光谱变化, 从而使得光纤光栅 F-P 腔的模式稳定. 这在光纤光栅的封装技术中称为结构补偿封装. 这种腔的温度应变特性与光纤光栅相同, 因此其封装可以采用与光纤光栅封装相同的结构.

光纤激光器要求单模稳频输出, 而直接在增益光纤上写入一对光纤布拉格光栅有下面两大优点:

1) 光纤布拉格光栅的窄带宽可以直接实现谐振腔的单模运转 2) 由于光纤布拉格光栅是直接写在增益光纤上的, 整个 F-P 腔由同一种材料构成, 便于对光纤光栅和腔进行统一的温度及其他特性补偿来实现稳频输出. 对于这种简单结构的光纤激光器, 其谐振腔的设计成为关键. 首先, 要求两个光纤光栅的中心耦合波长相同. 其次, 要求腔单模运转在光栅的中心耦合波长处. 因为均匀光纤光栅的中心耦合波长与折射率调制的大小和周期有关, 而与光栅长度无关. 因此可以选择不同长度而折射率调制完全相同的两个光纤布拉格光栅来构成谐振腔, 它们的中心耦合波长不变, 只是峰值反射率大小不同, 可以做成一端接近全反而另一端存在透射的腔. 当腔长  $L$  满足 (9) 式, 再选择合适的  $m$  值就可以满足腔在中心耦合波长处单模运转. 另外, 作为光纤激光器的谐振腔, 其阈值腔长  $L_t$  要求尽量大以便获得尽量大的腔增益, 即  $m$  的值要尽量大.

从前面的分析知道, 构成 F-P 腔的光纤布拉格光栅的反射带宽越小越好. 对于均匀光纤布拉格光栅, 在折射率调制不变的情况下, 光栅的带宽随着光栅长度的增加而减小, 直到带宽内光栅的反射率几乎都为 100% 的时候, 减小到最小值. 因此, 在设计光纤光栅 F-P 腔的光栅时, 尽量增加光栅的长度, 而减小光栅的折射率调制大小, 这样可以使得  $\kappa L$  不变, 即光栅的峰值反射率不变而带宽减小. 对于此时由于光栅折射率调制变化引起的中心耦合波长的漂移可以通过改变折射率调制周期来抵消掉. 用数学描述如下:

$$\delta n_{\text{eff}} = \delta n_{\text{eff0}} / \text{factor}, \quad (12)$$

$$\Delta \delta n_{\text{eff}} = \delta n_{\text{eff}} - \delta n_{\text{eff0}}. \quad (13)$$

要使得中心耦合波长  $\lambda_B$  不变, 则由  $\lambda_B = 2\Lambda(n_{\text{eff}} + \delta n_{\text{eff}})$  可以得到

$$\Lambda = \Lambda_0 - \frac{\Lambda_0 \Delta \delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}} + \delta n_{\text{eff0}}}. \quad (14)$$

当光栅的长度同时满足  $L_g = \text{factor} \cdot L_{g0}$  时, 光栅的峰值反射率也不变. 如果  $\text{factor} > 1$  则光栅的带宽减小.

### 3. 数值模拟及实验结果

数值模拟时, 选用两种特性参数的光栅, 第一种光栅的光纤有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.4545$ ,  $\delta n_{\text{eff}} = 0.0001875$ , 光栅周期  $\Lambda = 535.2812\text{nm}$ , 光栅长度  $L_{g1} = L_{g2} = 4.8\text{mm}$ , 构成的 F-P 腔长  $L = 5200.5 \times$

$(1 + \delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}) \times \Lambda = 2.784089\text{mm}$ ; 第二种光栅的光纤有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.4545$ ,  $\delta n_{\text{eff}} = 0.000075$ ,  $\Lambda = 535.3226\text{nm}$ ,  $L_{g1} = L_{g2} = 12\text{mm}$ , 构成的 F-P 腔长  $L = 12500.5 \times (1 + \delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}) \times \Lambda = 6.692145\text{mm}$ . 这两种光栅的条纹可见度都为 1, 中心耦合波长相同:  $\lambda_B = 1557.33\text{nm}$ , 峰值反射率相同:  $r_{\text{max}} = 0.9$ ,  $\kappa L = 1.82$ , 所不同的是两种光栅的带宽不同, 前者反射率零点带宽是  $0.40\text{nm}$ , 后者反射率零点带宽是  $0.16\text{nm}$ . 由第一种光栅构成的 F-P 腔和由第二种光栅构成的 F-P 腔的透射特性分别如图 3(a) 和 (b) 所示. 由于两种光栅的反射带宽不同, 由它们分别组成的 F-P 腔的单模运转阈值腔长不同. 从图 3 可以看出光栅带宽越小, 由其构成的腔的单模运转阈值腔长越长, 腔的增益就越强. 在腔长的选择上, 为了使得光栅的中心耦合波长处存在谐振, 腔长同时还满足了 (9) 式. 从图 3 还可以看出偏离于中心耦合波长处的谐振谱线半宽度明显增加, 这是由于光栅反射率在偏离中心波长时减小的缘故.

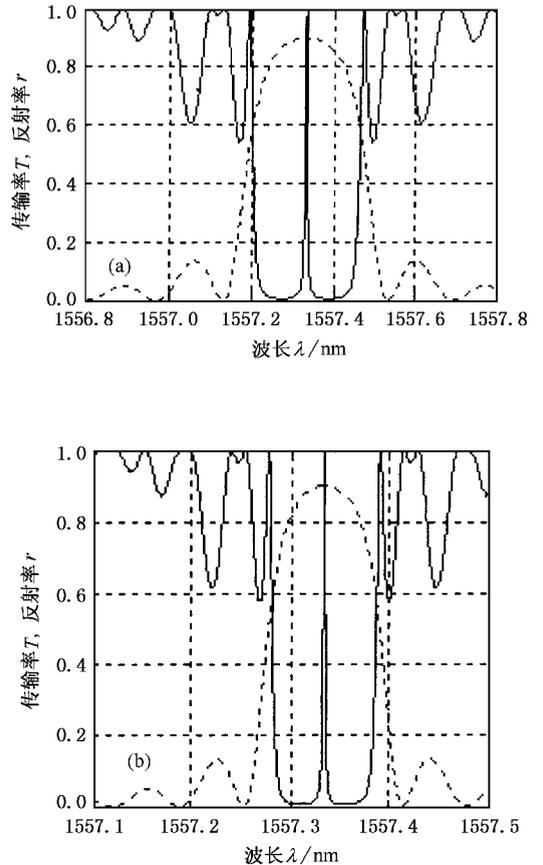


图 3 图中虚线表示组成光纤光栅 F-P 腔的光栅的反射谱特性, 实线表示腔的透射谱特性 (a) 光栅反射率零点带宽是  $0.40\text{nm}$  (b) 光栅反射率零点带宽是  $0.16\text{nm}$

使用 PS-RMS-50 的包层模抑制的光敏光纤以及波长 244nm 的氩离子倍频激光器,采用相位掩模板扫描刻写方法,在近似等同条件下刻写两段光栅.光栅的长度为 5mm,峰值反射率约为 98%,光栅的零点带宽约为 0.4nm.两段光栅的间隔约为 2.5mm.实验测得的 F-P 腔透射谱图如图 4 所示.从图 3 中数值模拟中知道,零点带宽为 0.4nm 的光栅组成的 F-P 腔在腔长小于 2.78mm 时是单模运转的.光谱测量使用的是 Agilent 8614A 光波测量系统,使用的测量分辨线宽为 0.001nm.

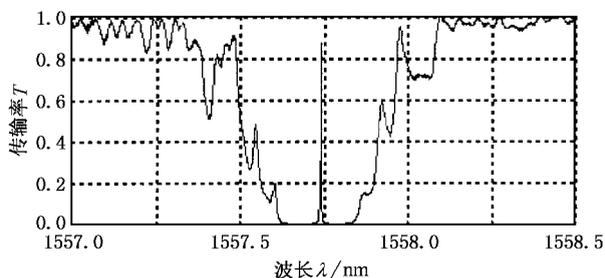


图 4 实验测得的光纤光栅 F-P 腔的透射谱图

## 4. 结 论

文章分析了光纤光栅 F-P 腔的透射特性,其谐振峰只出现在光栅的反射峰内;并且因为光栅的反射相位因子影响,在光栅的第一对零点带宽内总是存在多个谐振峰;由于光栅反射峰边缘反射率减小到零,因此认为 F-P 腔谐振谱线间隔大于光栅 3dB 带宽的一半时就处于单模运转状态.然后给出了如何设计窄带宽的特定透射率和中心耦合波长的光纤布拉格光栅,并讨论了光栅带宽对阈值腔长的影响,以及怎样选择两光栅之间的长度来实现腔在光栅的中心耦合波长处的单模运转,为线性腔光纤激光器的设计提供理论依据.

这种单模运转的光纤光栅 F-P 腔在同一根光纤材料上制作,其光谱形状随温度变化和应变的整体线性漂移特性,使其具有潜在的开发实用前景,如可调的窄带滤波器,带宽比光纤布拉格光栅带宽小一到两个量级,可调特性与光纤布拉格光栅相同;只调制腔长,还有可能实现光纤调制器等.

[ 1 ] Iwatsuki K, Okamura H and Saruwatari M 1990 *Electron. Lett.* **26** 2033  
 [ 2 ] Gloag A, Langford N, McCollion K *et al* 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 921  
 [ 3 ] Zyskind J L, Sulhoff J W, Sun J, Stone J, Stulz L W, Harvey G T, Digiovanni D J, Presby, H M, Piccirilli A, Koren U and Jopson R M 1991 *Electron. Lett.* **27** 2148  
 [ 4 ] Park N, Dawson J W and Vahala K J 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 2369  
 [ 5 ] Dong L, Loh W H, Caplen J E *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 694

[ 6 ] Hsu K *et al* 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1438  
 [ 7 ] Xu Y Z, Tan H Y, Du W C and Liu S H 1999 *Acta Optica Sinica* **19** 1327 [ in Chinese ] 许远忠、谭华耀、杜卫冲、刘水华 1999 光学学报 **19** 1327 ]  
 [ 8 ] Turan Erdogan 1997 *Journal of Lightwave Technology* **15** 1277  
 [ 9 ] Zhao K H and Zhong X H 1996 *Optics* ( Peking University Press ) p332—333 [ 赵凯华、钟锡华 1996 光学(北京大学出版社)第 332—333 页 ]  
 [ 10 ] Wang M G, Wei H and Jian S H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 609 ( in Chinese ] 王目光、魏淮、简水生 2003 物理学报 **52** 609 ]

# A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg grating<sup>\*</sup>

Lü Chang-Gui Cui Yi-Ping<sup>†</sup> Wang Zhu-Yuan Yun Bin-Feng

(*Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

(Received 4 April 2003; revised manuscript received 4 May 2003)

## Abstract

The characteristics of transmission spectrum of Fabry-Perot (F-P) cavity composed of two fiber Bragg gratings (FBG) are analysed in this paper. As the influence factors, bandwidth of FBG, phase factor of reflection coefficient of FBG and length of cavity are included. The changes of its characteristics caused by temperature and strain are discussed. Then the method of how to design this kind of F-P cavity with single mode at the Bragg wavelength of FBG is provided. The numerical simulation spectrum and experimental result are also given.

**Keywords** : fiber Bragg grating, Fabry-Perot cavity, fiber laser

**PACC** : 4281W, 4281, 4280S, 4280

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Scholars of China (Grant No. 60125513).

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: cyp@seu.edu.cn