第28卷 第5期
2008年5月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 28, No. 5
May, 2008

文章编号：0253-2239(2008)05-0840-06

用于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的改进的Rouard算法

王燕花[1,2] 刘 艳[1,2] 谭中伟[1,2] 任文华[1,2] 简水生[1,2]

([1] 全光网络与现代通信网教育部重点实验室，北京 100044；[2] 北京交通大学光波技术研究所，北京 100044)

摘要 比较了光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的极限法、平衡法及传输矩阵法3种算法，证明了它们是一致的，指出了光纤布拉格光栅复振幅传输矩阵的相移特性对法布里-珀罗腔透射率的影响。对计算任意折射率调制的光纤布拉格光栅的Rouard算法进行了改进，在分层方法中考虑了折射率分布初始相位的影响，获得了更为准确的反射复振幅相位特性，将该结果应用于计算光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔，得到了光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔具有多峰结构的透射谱，并经过实验验证了该理论的正确性。

关键词 光纤光学；法布里-珀罗腔；光纤布拉格光栅；Rouard算法；相位

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Modified Rouard Method for Fiber Bragg Grating Fabry-Pérot Cavity

Wang Yanhua[1,2] Liu Yan[1,2] Tan Zhongwei[1,2] Ren Wenhua[1,2] Jian Shuisheng[1,2]

[1] *Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*

[2] *Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*

Abstract The limit method, balance method and transfer matrix method for fiber Bragg grating (FBG) Fabry-Pérot (F-P) cavity are studied and proved uniform. The influence of the reflection phase of fiber Bragg grating complex amplitude transfer matrix on the transmission of fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity is emphasized. The Rouard method, which is capable of calculating fiber Bragg grating with arbitrary refractive index modulation, is used to calculate fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity and modified by introducing initial phase of refractive index distribution to calculate the reflection phase precisely. The transmission spectrum of fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity with multi-peak structure is obtained with the above results and the calculation results are proved by experiments.

Key words fiber optics; Fabry-Pérot cavity; fiber Bragg grating; Rouard method; phase

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种将前向传播的导波模式耦合到后向传播的导波模式的光纤结构[1]。利用光纤布拉格光栅的反射特性构造的法布里-珀罗(F-P)腔，在通信和传感领域应用十分广泛。一方面，可以直接构成线性腔光纤激光器[2]，用作环形腔光纤激光器的选频、调谐装置[3]，抑制光纤激光器的模式跳变[4,5]等；另一方面，可以广泛地应用于温度、应力、位移、振动、磁场等物理量的测量[6,7]。

本文研究了光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的理论模型及数值计算方法，证明了极限法、平衡法及传输矩阵法3种光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔计

收稿日期：2007-09-05；**收到修改稿日期**：2007-11-13

基金项目：国家自然科学基金(60607001)和北京交通大学校基金(2006XZ010)资助课题。

作者简介：王燕花(1982—)，女，山西人，博士研究生，主要从事光纤通信及光纤传感等方面的研究。E-mail：wyh-yan@163.com

导师简介：简水生(1929—)，男，江西人，院士，教授，博士生导师，主要从事光纤通信及光纤传感等方面的研究。E-mail：ssjian@bjtu.edu.cn

算方法是一致的。基于法布里-珀罗腔对光纤布拉格光栅复振幅传输矩阵相移特性的严格要求，引入了折射率分布初始相位的影响，对 Rouard 算法[8-12]进行了改进，并应用于计算光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的透射谱特性。

2　光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔理论

光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔结构如图 1 所示。两个光纤布拉格光栅间距为 L，腔内损耗因子为$\sqrt{\alpha}$，传输常量为 β，两端光纤布拉格光栅的前向透射系数和反射系数分别为：t_1，r_1，t_2，r_2，反向透射系数和反射系数分别为：t'_1，r'_1，t'_2，r'_2，输入光复振幅为 A_{in}，经光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射和反射后的光复振幅分别为 A_{out}、B_{out}。

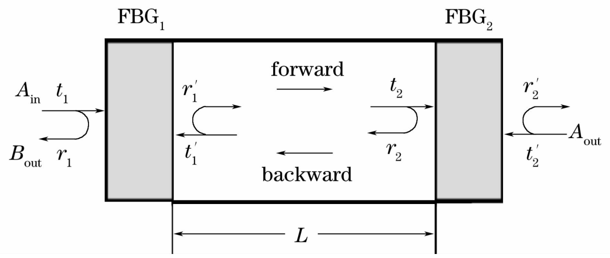

图 1　光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔示意图

Fig. 1　Schematic of fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity

2.1　极限法

将最终的出射光看作腔内若干次反射后叠加的效果[13,14]。其中，未经腔内反射直接透射或反射出的光复振幅为

$$A(0) = \sqrt{\alpha} t_1 t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L) A_{\text{in}}, \tag{1}$$

$$B(0) = r_1 A_{\text{in}}, \tag{2}$$

经腔内 p 次反射后透射或反射出的光复振幅为

$$A(p) = \sqrt{\alpha} t_1 t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L) A_{\text{in}} \cdot [\alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)]^p, \tag{3}$$

$$B(p) = \alpha t_1 t'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L) A_{\text{in}} \cdot [\alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)]^{p-1}, \tag{4}$$

于是最终经法布里-珀罗腔透射或反射的总的光复振幅为

$$A_{\text{out}} = \lim_{p\to\infty} \sum_0^p A(p) = \frac{\sqrt{\alpha} t_1 t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L)}{1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(2\mathrm{j}\beta L)} A_{\text{in}}, \tag{5}$$

$$B_{\text{out}} = \lim_{p\to\infty} \sum_0^p B(p) = r_1 A_{\text{in}} + \frac{\alpha t_1 t'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)}{1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)} A_{\text{in}}. \tag{6}$$

2.2　平衡法

根据最终平衡态下光波的实际传输过程求解[15]。设法布里-珀罗腔内到达第一个光纤布拉格光栅位置处前向传播的光复振幅为 A_1，反向传播光复振幅为 B_1，有

$$A_1 = t_1 A_{\text{in}} + r'_1 B_1, \tag{7}$$

$$B_1 = \alpha r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L) A_1, \tag{8}$$

从中求解出 A_1、B_2 与输入光复振幅 A_{in} 的关系，于是

$$A_{\text{out}} = \sqrt{\alpha} t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L) A_1 = \frac{\sqrt{\alpha} t_1 t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L)}{1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)} A_{\text{in}}, \tag{9}$$

$$B_{\text{out}} = r_1 A_{\text{in}} + t'_1 B_1 = r_1 A_{\text{in}} + \frac{\alpha t_1 t'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)}{1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)} A_{\text{in}}. \tag{10}$$

2.3　传输矩阵法

将光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔分层，总的传输特性通过各层传输矩阵相乘获得。对于光纤布拉格光栅，无论以任何方式求解，只要确定了前向和后向的反射、透射系数分别为：r，r'，t，t'，就可以通过一个总的传输矩阵 $\boldsymbol{T}_{\text{FBG}}$ 表示。于是，光纤布拉格光栅正反两个方向的反射透射特性分别满足

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_{\text{FBG}} \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 \\ t' \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_{\text{FBG}} \begin{bmatrix} r' \\ 0 \end{bmatrix}.$$

从中求解得

$$\boldsymbol{T}_{\text{FBG}} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} 1 & -r' \\ r & tt' - rr' \end{bmatrix}, \tag{11}$$

对于两个光纤布拉格光栅之间的腔内部分，仅仅是一段光纤，视为一层，传输矩阵为[16]

$$\boldsymbol{T}_{\text{F-P}} = \begin{bmatrix} \exp(\mathrm{j}\beta L)/\sqrt{\alpha} & 0 \\ 0 & \sqrt{\alpha}\exp(\mathrm{j}\beta L) \end{bmatrix}, \tag{12}$$

整个光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的传输矩阵为

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}_{\text{FBG}} \boldsymbol{T}_{\text{F-P}} \boldsymbol{T}_{\text{FBG}} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\alpha} t_1 t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L)} \times \begin{bmatrix} 1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}\beta L) & -r'_2 - \alpha r'_1 (t_2 t'_2 - r_2 r'_2) \exp(\mathrm{j}\beta L) \\ r_1 + \alpha r_2 (t_1 t'_1 - r_1 r'_1) \exp(\mathrm{j}\beta L) & -r'_1 r_2 + \alpha (t_1 t'_1 - r_1 r'_1)(t_2 t'_2 - r_2 r'_2) \exp(\mathrm{j}\beta L) \end{bmatrix}, \tag{13}$$

根据$\begin{bmatrix} A_{\text{in}} \\ B_{\text{out}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{T} \begin{bmatrix} A_{\text{out}} \\ 0 \end{bmatrix}$，于是：

$$A_{\text{out}} = \frac{k}{a_{11}} = \frac{\sqrt{\alpha} t_1 t_2 \exp(\mathrm{j}\beta L)}{1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)} A_{\text{in}}, \tag{14}$$

$$B_{\text{out}} = \frac{a_{21}}{a_{11}} = r_1 A_{\text{in}} + \frac{\alpha t_1 t'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}\beta L)}{1 - \alpha r'_1 r_2 \exp(\mathrm{j}2\beta L)} A_{\text{in}}. \tag{15}$$

以上各类求解方法出发点不同，最终所得结果一致。在此基础上，分别设两端光纤布拉格光栅前向透射系数和反射系数的相位分别为：φ_{t_1}，φ_{r_1}，φ_{t_2}，φ_{r_2}，反向透射系数和反射系数的相位分别为：$\varphi_{t'_1}$，$\varphi_{r'_1}$，$\varphi_{t'_2}$，$\varphi_{r'_2}$，可求得光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的反射率和透射率分别为

$$\tau = \left|\frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\right|^2 = \frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\left(\frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\right)^* = \frac{\alpha |t_1|^2 |t_2|^2}{1 + (\alpha |r'_1| |r_2|)^2 - 2\alpha |r'_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{r'_1} + \varphi_{r_2})}, \tag{16}$$

$$\begin{aligned}\rho = \left|\frac{B_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\right|^2 = \frac{B_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\left(\frac{B_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\right)^* = |r_1|^2 + \frac{\alpha^2 |t_1|^2 |t'_1|^2 |r_2|^2}{1 + (\alpha |r'_1| |r_2|)^2 - 2\alpha |r'_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{r'_1} + \varphi_{r_2})} + \\ \frac{2\alpha |t_1| |t'_1| |r_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{t_1} + \varphi_{t'_1} - \varphi_{r_1} + \varphi_{r_2})}{1 + (\alpha |r'_1| |r_2|)^2 - 2\alpha |r'_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{r'_1} + \varphi_{r_2})} - \\ \frac{2\alpha^2 |t_1| |t'_1| |r_1| |r'_1| |r_2|^2 \cos(\varphi_{t_1} + \varphi_{t'_1} - \varphi_{r_1} - \varphi_{r'_1})}{1 + (\alpha |r'_1| |r_2|)^2 - 2\alpha |r'_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{r'_1} + \varphi_{r_2})}.\end{aligned} \tag{17}$$

对于一般的薄膜型法布里-珀罗腔，根据菲涅耳定理，前向和后向透射及反射系数满足关系[13]：$t = t'$，$r = -r'$。对于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔，在反射和透射系数中引入了由光纤布拉格光栅引起的相位变化，不再满足简单的相等或互为相反数的关系。根据耦合模理论[1]，可推导出均匀光纤布拉格光栅反射和透射系数在严格的相位条件下满足如下关系：$|r| = |r'|$，$|t| = |t'|$，$|r|^2 + |t|^2 = 1$，$\varphi_r = \varphi_{r'}$，$\varphi_t = \varphi_r + \pi/2 + \pi L_{\text{FBG}}/\Lambda$，$\varphi_{t'_1} = \varphi_{r'} + \pi/2 - \pi L_{FBG}/\Lambda$，代入(17)式，化简得

$$\rho = \frac{|r_1|^2 + \alpha^2 |r_2|^2 - 2\alpha |r_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{r'_1} + \varphi_{r_2})}{1 + (\alpha |r'_1| |r_2|)^2 - 2\alpha |r'_1| |r_2| \cos(2\beta L + \varphi_{r'_1} + \varphi_{r_2})}. \tag{18}$$

忽略腔内损耗，$\alpha = 1$，此时，$\tau + \rho = 1$。因此，对于两端为均匀光纤布拉格光栅的法布里-珀罗腔，可以仅研究透射率。以上推导证明，与一般法布里-珀罗腔相比，光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射率还受到光纤布拉格光栅反射复振幅相位的影响。因此计算光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射率时，光纤布拉格光栅反射复振幅相位的准确性非常重要。

3 Rouard 算法误差分析及修正

Rouard 算法将光栅看作多层膜叠合结构，用阶跃式的折射率分布代替实际的近似余弦的折射率分布[8~12]。理论上可以通过在一个光纤布拉格光栅周期范围内不断增加分层精细度，准确计算任意折射率调制的光纤布拉格光栅[12]，但是计算量往往比较大。实际上，以半个光纤布拉格光栅周期为一层，各层采用真实的反射、透射系数，就可以在较少的计算量下，获得基本准确的反射谱特性[10,11]。具有 N 个周期的光纤布拉格光栅，一般分为 $2N$ 层。每层的有效折射率近似为均匀分布，相邻两层折射率差 $\Delta n = \pi\delta n_{\text{eff}}/2$，其中，$\delta n_{\text{eff}}$ 为光致有效折射率变化直流分量。每一层的传输矩阵可以表示为一个界面矩阵 $\boldsymbol{I}_i$ 与相位矩阵 $\boldsymbol{P}_i$ 的乘积[12]，其中

$$\boldsymbol{I}_i = \frac{1}{t_i}\begin{bmatrix} 1 & r_i \\ r_i & 1 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{P}_i = \begin{bmatrix} \exp(\mathrm{j}\beta_i L_i) & 0 \\ 0 & \exp(\mathrm{j}\beta_i L_i) \end{bmatrix},$$

r_i，t_i 分别为第 i 个界面的反射和透射系数，通过菲涅耳定理求得。β_i 为第 i 层的传输常量，第 i 层薄膜的厚度为 $L_i = \Lambda/2$，Λ 为光纤布拉格光栅的周期。于是整个光纤布拉格光栅的传输矩阵表示为

$$\boldsymbol{T}_{\text{FBG}} = \prod_i \boldsymbol{T}_i = \prod_i \boldsymbol{I}_i \boldsymbol{P}_i.$$

分别按照 Rouard 算法和耦合模理论计算由一对相同的均匀光纤布拉格光栅构成的法布里-珀罗腔的透射谱，计算结果如图 2 所示。通常的耦合模理论采用横向模场的简明形式表示反射系数。由于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔对光纤布拉格光栅反射复振幅相位特性的严格要求，应采用真实的横向模场分量与纵向分量合成后得到的实际反射系数用于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的计算。光纤布拉格光栅长 8 mm，间距 $L = 20$ mm，光纤有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.447$，光致有效折射率变化直流分量 $\delta n_{\text{eff}} = 1.5 \times 10^{-4}$。采用 Rouard 算法与采用耦合模理论计算结果的峰值位置有明显偏差。这是因为

Rouard 算法假设的折射率分布与耦合模理论假设的折射率分布存在相差，如图 3 所示，Rouard 算法假设第一层折射率分布均匀且为半个光纤布拉格光栅周期长度[10,11]，相当于在余弦分布下设折射率分布初始相位为 $3\pi/2$。而耦合模理论假设折射率在 $[-L/2, L/2]$ 范围内对称分布且光栅长度中点为余弦分布 0 相位[1]，其折射率分布初始相位因光纤布拉格光栅周期及长度而异。这里求得的折射率分布初始相位约为 0.56π。实际中，由于不同的光栅制作方法以及曝光起始位置，折射率分布的初始相位可能是 $[0, 2\pi)$ 范围内的任意值。

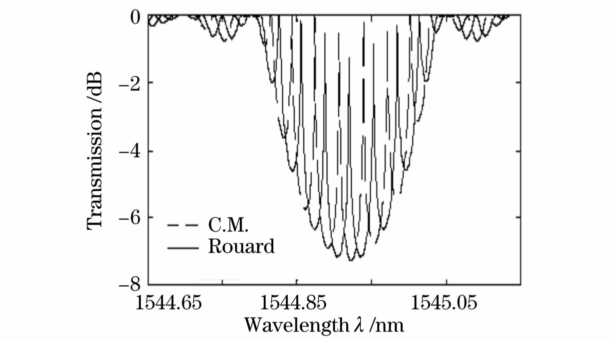

图 2　采用耦合模理论和 Rouard 算法的光纤布拉格光栅法布里-珀罗透射谱计算结果（L=20 mm）

Fig. 2　Calculated results of fiber Bragg grating Fabry-Pérot transmission spectrum by coupled mode theory and Rouard method (L=20 mm)

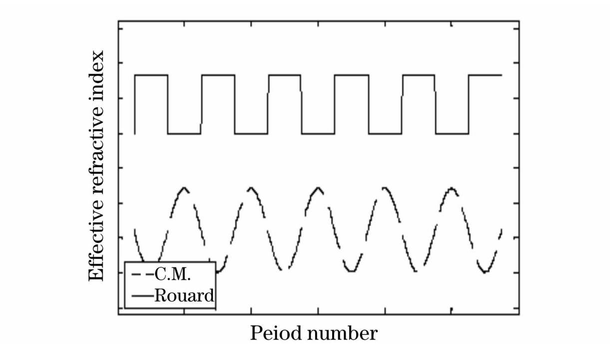

图 3　耦合模理论和 Rouard 算法的折射率分布近似

Fig. 3　Refractive index approximation of coupled mode theory and Rouard method

为简单计，考虑折射率分布初始相位为 π 的光纤布拉格光栅。对 Rouard 算法的分层进行调整，将光纤布拉格光栅第一层长度调整为 $\Lambda/4$，除最后一层外其余层长度为 $\Lambda/2$ 不变，剩余长度为最后一层。对其它折射率分布初始相位，分层也做出相应的调整，如图 4 所示。当初始相位 $\varphi_0 \in [0, \pi/2)$，第一层长度 $L_0 = \Lambda(\pi/2 - \varphi_0)/2\pi$；当 $\varphi_0 \in [\pi/2, 3\pi/2)$，$L_0 = \Lambda(3\pi/2 - \varphi_0)/2\pi$；当 $\varphi_0 \in [3\pi/2, 2\pi)$，$L_0 = \Lambda(5\pi/2 - \varphi_0)/2\pi$。计算初始相位分别为 $\pi/3$、$2\pi/3$、π，其他参量同上的光纤布拉格光栅的反射相移特性，计算结果如图 5 所示。不同初始相位虽然不会影响光纤布拉格光栅的反射复振幅的幅度（即反射谱），但会使反射复振幅的相位受到影响，进而影响光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射峰值的位置，如图 6 所示。

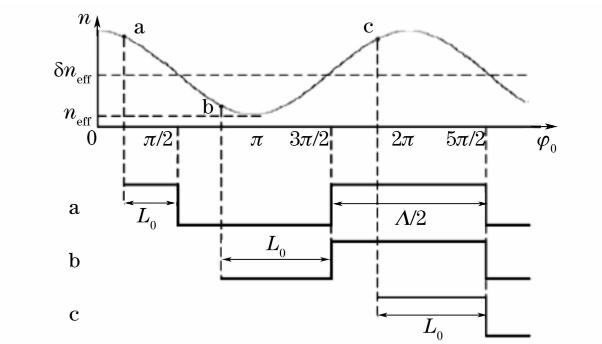

图 4　不同折射率分布初始相位下光纤布拉格光栅 Rouard 算法第一层分层厚度

Fig. 4　Thickness of the first layer of Rouard method for fiber Bragg grating with different initial phase of refractive index distribution

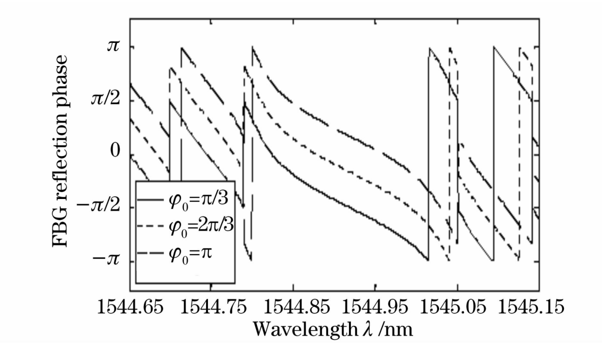

图 5　不同折射率分布初始相位的光纤布拉格光栅反射相位计算结果

Fig. 5　Calculated reflection phase of fiber Bragg grating with different initial phase of refractive index distribution

光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔用于光纤激光器时，往往需要单纵模输出。对于光纤布拉格光栅法布里-珀罗，相邻谐振峰之间的间隔 $\Delta\lambda$ 满足[17]

$$4\pi n_{\mathrm{eff}} L \Delta\lambda/\lambda^2 + 2\left|\varphi_r(\lambda+\Delta\lambda) - \varphi_r(\lambda)\right| = 2\pi. \quad (19)$$

通常地，当谱线间隔 $\Delta\lambda$ 大于光纤布拉格光栅的 3 dB 带宽的一半时，可以认为光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔实现单模运转[17]。为使谐振峰恰好位于光纤布拉格光栅反射峰中心，腔长应满足[17]

$$L = (m - 0.5)(1 + \delta n_{\mathrm{eff}}/n_{\mathrm{eff}})\Lambda. \quad (20)$$

$$m = 1, 2, \cdots$$

根据(19)式、(20)式，计算由长度为 8 mm、光

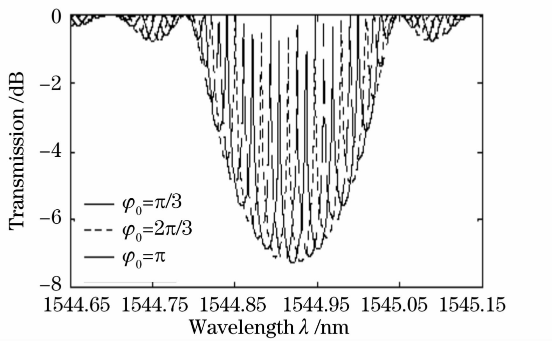

图 6 不同折射率分布初始相位的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射谱计算结果(L=20 mm)

Fig. 6 Calculated transmission spectrum of fiber Bragg graing Fabry-Pérot cavity with different initial phase of refractive index distribution (L=20 mm)

纤有效折射率 $n_{\mathrm{eff}}=1.447$、光致有效折射率变化直流分量 $\delta n_{\mathrm{eff}}=1.0\times10^{-4}$、折射率分布初始相位 $\varphi_0=\pi$ 的一对光纤布拉格光栅构成的法布里-珀罗腔。当光纤布拉格光栅间距 L 约 1 mm,$m=1874$ 时,可在腔长尽可能较长的前提下实现单模运转,并且单模谐振峰恰好位于光纤布拉格光栅反射峰中心。分别采用改进前和改进后的 Rouard 算法计算单模光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔,结果如图 7 所示,改进前的 Rouard 算法计算得到在腔内对称出现两个谐振峰。改进后的 Rouard 算法计算结果与预期吻合良好。

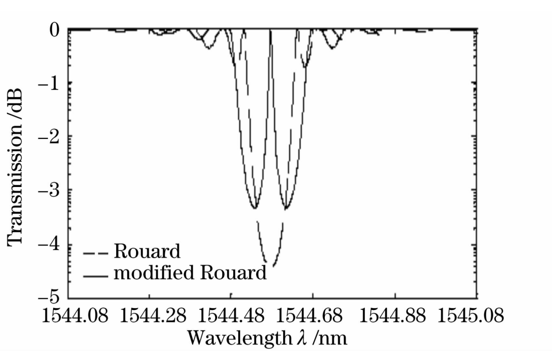

图 7 采用耦合模理论和 Rouard 算法的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射谱计算结果 (L≈1 mm)

Fig. 7 Calculated results of fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity transmission spectrum by coupled mode theory and Rouard method (L≈1 mm)

4 实验结果

实验中采用 KrF 准分子激光器 248 nm 紫外光对氢载 Corning 光纤曝光,光纤有效折射率为 1.447,采用相位掩膜法制作光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔。通过程序精确控制扫描平台移动距离,精度可达 0.1 μm。鉴于折射率分布初始相位精度实际控制的难度,仅制作了较易实现的 $\varphi_0=\pi$ 的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔。调整移动平台,使曝光从掩膜起始位置开始,则光栅折射率分布初始相位 $\varphi_0=\pi$。制作参量同上的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔,即光纤布拉格光栅长度为 8 mm,曝光时间为 45 s,间距为 20 mm,以及光纤布拉格光栅长度为 8 mm,间距约为 1 mm,$m=1874$,曝光时间约为 1 min的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔。在光谱仪上观察的结果如图 8、图 9 所示。由于实验过程中不可避免的损耗、光路的严格精确性问题以及光谱仪扫描精度限制,在光谱仪上实际观察到的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的深度更深一些,关于中心波长的对称性有所降低,并且直接观察到的谐振峰远不如理论计算的尖锐。但是,与耦合模理论及改进前的 Rouard 算法相比,实验中谐振峰的位置与改进后 Rouard 算法的计算结果更接近。改进后的 Rouard算法可以更准确的计算光纤布拉格光栅法

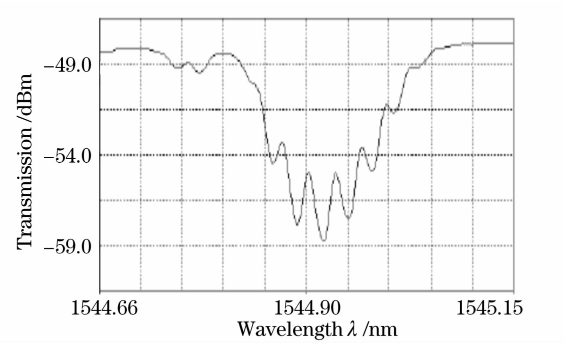

图 8 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射谱实验结果(L=20 mm)

Fig. 8 Experimental results of transmission spectrum of fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity (L=20 mm)

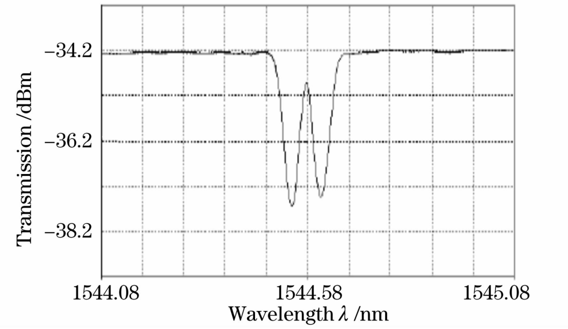

图 9 单纵模光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射谱实验结果(L≈1 mm)

Fig. 9 Experimental results of transmission spectrum for single longitudinal-mode fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity (L≈1 mm)

布里-珀罗腔的特性。

5 结 论

改进后的 Rouard 算法可以相对更准确地计算光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的透射峰位置，对于进一步研究光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的各种特性，特别是单模特性等，提供了准确的理论依据。

参 考 文 献

1 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277～1294

2 Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Pérot cavity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 350～353
伍 波，刘永智，张谦述 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光，2007，**34**(3)：350～353

3 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 50～54
张 欣，陈 伟，刘 宇 等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. 中国激光，2007，**34**(1)：50～54

4 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 217～220
俞本立，甄胜来，朱 军 等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报，2006，**26**(2)：217～220

5 Liu Yange, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883～894
刘艳格，冯新焕，董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. 中国激光，2007，**34**(7)：883～894

6 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Cengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631～635
饶云江，周昌学，冉曾令 等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. 中国激光，2006，**33**(5)：631～635

7 Liang Youcheng, Jiang Shaoji. A new asymmetric Fabry-Pérot interferometric cavity for fiber optical sensors[J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(4): 14～17
梁有程，江绍基. 用于光纤传感的非对称法布里-珀罗腔[J]. 光学仪器，2006，**28**(4)：14～17

8 L. A. Weller-Brophy, D. G. Hall. Analysis of waveguide gratings: Application of Rouard's method[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(6): 863～871

9 L. A. Weller-Brophy, D. G. Hall. Analysis of waveguide gratings: a comparison of the results of Rouard's method and coupled-mode theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(1): 60～65

10 Wang Zihua. An improved Rouard's method for grating analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 605～608
王子华. 计算光栅的一个改进的 Rouard 方法[J]. 光学学报，2001，**21**(5)：605～608

11 Wang Zihua, Huang Zhaoming. A new fiber grating analysis method using thin-film stack model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 26～30
王子华，黄肇明. 多层薄膜模型分析光纤光栅的一个新方法[J]. 光学学报，2003，**23**(1)：26～30

12 Han Qun, Lü Kecheng, Li Yigang. Improved Rouard's analysis method for fiber gratings[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(1): 41～45
韩 群，吕可诚，李乙钢. 改进的光纤光栅多层膜分析方法[J]. 光电子·激光，2003，**14**(1)：41～45

13 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun transl., Beijing: Science Press, 1975. 422～425
M. 波恩，E. 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙 译. 北京：科学出版社，1975. 422～425

14 Wang Zhiyuan, Zhou Fuhong, Wang Wenzhi. Characteristics of Fabry-Pérot interferometric type optic fiber hydrophone[J]. *J. Transducer Technology*, 1998, **17**(2): 9～12
王智元，周福洪，王文芝. 法布里-珀罗干涉型光纤水听器的特性[J]. 传感器技术，1998，**17**(2)：9～12

15 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfeng *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Pérot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 34～38
关柏鸥，余有龙，葛春风 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. 光学学报，2000，**20**(1)：34～38

16 Liang Meng, Fang Qiang, Wang Yongchang. Theoretical analysis on characteristics of fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(8): 821～824
梁 猛，方 强，王永昌. 光纤光栅 F-P 腔特性分析[J]. 光电子·激光，2001，**12**(8)：821～824

17 Lü Changgui, Cui Yiping, Wang Zhuyuan *et al.*. A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Pérot cavity composed of fiber Bragg grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1): 145～150
吕昌贵，崔一平，王著元 等. 光纤布拉格光栅法布里－珀罗腔纵模特性研究[J]. 物理学报，2004，**53**(1)：145～150