

# 光纤光栅法布里-珀罗腔的 $V-I$ 传输矩阵法研究\*

李卓轩 裴丽<sup>†</sup> 祁春慧 彭万敬 宁提纲 赵瑞峰 高嵩

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

(2009 年 12 月 6 日收到; 2010 年 7 月 8 日收到修改稿)

快速有效地获得多级联光纤光栅法布里-珀罗(F-P)腔的光谱特性, 是优化设计基于上述结构建立的级联多波长激光器、放大器等各种光器件以及复杂分布式传感网络的重要基础和保障. 将  $V-I$  传输矩阵法用于光纤光栅 F-P 腔反射光谱特性的分析, 并建立了  $V-I$  传输矩阵模型. 采用该模型对三种不同结构的光纤光栅 F-P 腔在不同参数下的光谱特性进行分析, 并与传统多层膜法的分析结果相比较, 表明  $V-I$  传输矩阵法能够在保证分析精度的前提下大大节省运算时间. 实验结果表明,  $V-I$  传输矩阵法对光纤光栅 F-P 腔光谱特性的分析结果比耦合模法更准确.

**关键词:**  $V-I$  传输矩阵法, 光纤光栅法布里-珀罗腔特性, 分析精度, 运算时间

**PACC:** 4280F, 4281W

## 1. 引言

光纤光栅法布里-珀罗(F-P)腔以其优良的选频特性、灵活的可调谐性、低差损以及与光通信系统的良好兼容性等优点, 在光器件、光传感、光网络等研究领域发挥着越来越重要的作用. 尤其是近年来全光网络研究的迅速发展, 对于能有效降低光网络成本的高性能光器件的需求更为迫切, 基于多级联光纤光栅 F-P 腔可满足更大波长范围的光纤激光器<sup>[1,2]</sup>、光纤放大器、光纤上下话路器、光纤滤波器<sup>[3]</sup>等光器件已成为研究的热点. 此外, 随着光纤传感在越来越多领域的应用, 基于多级联光纤光栅 F-P 腔的分布式传感对于实现三维空间、长距离信号检测的研究也引起了各国研究者的广泛关注<sup>[4]</sup>.

目前, 对于由结构简单的光栅构成 F-P 腔的特性分析多采用耦合模理论<sup>[5,6]</sup>. 但对于复杂结构光栅, 由于难以得到耦合模方程的解析解, 一般采用四阶 Runge-Kutta 法进行数值求解或采用多层膜法进行分析计算<sup>[7]</sup>. 这两种方法都可以保证分析精

度, 但求解速度较慢. 要快速实时获得基于多级联光栅 F-P 腔的光器件、光通信系统以及光传感系统等的特性, 由于庞大的运算量而引起耗费时间过长将成为突出问题.

2003 年, Capmany 等<sup>[8]</sup>提出了基于多层膜方法的  $V-I$  传输矩阵法, 并将该方法用于计算光纤光栅反射谱特性. 本文将  $V-I$  传输矩阵法用于光纤光栅 F-P 腔特性的分析, 建立了分析光纤光栅 F-P 腔特性的  $V-I$  传输矩阵模型, 利用此模型讨论了在均匀光纤光栅 F-P 腔、啁啾光纤光栅 F-P 腔、非匹配光栅 F-P 腔三种结构下的数值分析结果, 实验结果与理论分析结果相一致.

## 2. 模型

多层膜法将光栅看成多层膜结构, 相邻两层膜之间的光场可以表示为正向波与反向波之和, 如图 1 所示. 每层薄膜内传输的光场可用界面矩阵和传输矩阵的乘积来表示, 将各层矩阵连乘, 得到一个二阶矩阵, 继而分析光纤光栅的特性.

\* 国家自然科学基金(批准号:60771008, 60837002)、北京市自然科学基金(批准号:4082024)、教育部留学回国人员科研启动基金(批准号:2008890)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:200800040002)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: lippei@bjtu.edu.cn

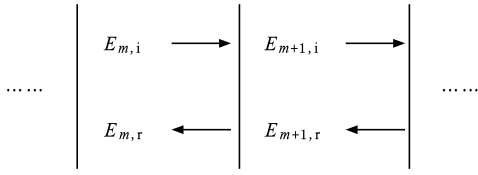


图1 光纤光栅相邻两层膜光传播示意图

用  $E_m$  和  $E_{m+1}$  分别表示第  $m$  层和第  $m+1$  层的光场,两者有如下关系:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{m,i} \\ E_{m,r} \end{bmatrix} &= \mathbf{A}_m \begin{bmatrix} E_{m+1,i} \\ E_{m+1,r} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_{m11} & A_{m12} \\ A_{m21} & A_{m22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+1,i} \\ E_{m+1,r} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\mathbf{A}_{mt} = \frac{1}{2a_m} \begin{bmatrix} (a_m + 1) & (a_m - 1) \\ (a_m - 1) & (a_m + 1) \end{bmatrix}, \quad (1b)$$

$$\mathbf{A}_{mp} = \begin{bmatrix} e^{j\phi_m} & 0 \\ 0 & e^{-j\phi_m} \end{bmatrix}.$$

这里  $\mathbf{A}_{mt}$  为第  $m$  层的界面矩阵,且  $a_m = n_{m+1}/n_m$  为相邻层的折射率比; $\mathbf{A}_{mp}$  为第  $m$  层的传输矩阵,且  $\phi_m = \beta_m l_m = (2\pi n_m/\lambda) l_m$ ,其中  $l_m$  为第  $m$  层薄膜厚度, $\beta_m$  表示波长为  $\lambda$  的光波在折射率为  $n_m$  的光纤中传输时的传播常数.由于多层膜法求解的第  $m$  层薄层分矩阵  $\mathbf{A}_m$  可以写成第  $m$  层界面矩阵  $\mathbf{A}_{mt}$  与传输矩阵  $\mathbf{A}_{mp}$  的乘积.因此,对于整个光栅段有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{1,i} \\ E_{1,r} \end{bmatrix} &= \mathbf{A}_{0t} \mathbf{A}_{0p} \mathbf{A}_{1t} \mathbf{A}_{1p} \cdots \mathbf{A}_{(N-1)t} \mathbf{A}_{(N-1)p} \mathbf{A}_{Nt} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} E_{N,i} \\ E_{N,r} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

采用下列变量替换:

$$V_m = E_{m,i} + E_{m,r}, \quad (3a)$$

$$I_m = \frac{1}{Z_m} (E_{m,i} - E_{m,r}), \quad (3b)$$

其中  $Z_m = 120\pi/n_m$  ( $n_m$  为第  $m$  层光场的折射率).

$V-I$  传输矩阵法将传输光场表示为<sup>[8]</sup>

$$\begin{bmatrix} V_m \\ I_m \end{bmatrix} = \mathbf{VI}_m \begin{bmatrix} V_{m+1} \\ I_{m+1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} VI_{m11} & VI_{m12} \\ VI_{m21} & VI_{m22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m+1} \\ I_{m+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

这里  $\mathbf{VI}_m$  的物理意义为用  $V-I$  传输矩阵法求解的第  $m$  层薄层分矩阵,它可以写成第  $m$  层界面矩阵  $\mathbf{VI}_{mt}$  与传输矩阵  $\mathbf{VI}_{mp}$  的乘积.将  $V_m$  和  $I_m$  代入(4)式,再与(1)式进行比较后可得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} VI_{m11} \\ VI_{m12} \\ VI_{m21} \\ VI_{m22} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ Z_2/2 & -Z_2/2 & Z_2/2 & -Z_2/2 \\ 1/2Z_1 & 1/2Z_1 & -1/2Z_1 & -1/2Z_1 \\ Z_2/2Z_1 & -Z_2/2Z_1 & -Z_2/2Z_1 & Z_2/2Z_1 \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} A_{m11} \\ A_{m12} \\ A_{m21} \\ A_{m22} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

利用(5)式,可得第  $m$  层界面矩阵

$$\mathbf{VI}_{mt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

利用(5)式,可得第  $m$  层传输矩阵

$$\mathbf{VI}_{mp} = \begin{bmatrix} \cos\phi_m & jZ_m \sin\phi_m \\ j \frac{\sin\phi_m}{Z_m} & \cos\phi_m \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $\phi_m = (2\pi n_m/\lambda) Z_m$ .由于界面矩阵为单位矩阵,联乘的结果等于1,因此对于整个光栅段,利用  $V-I$  传输矩阵法有

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \mathbf{VI}_{0p} \mathbf{VI}_{1p} \cdots \mathbf{VI}_{(N-1)p} \begin{bmatrix} V_N \\ I_N \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对比(2)和(8)式可以发现: $V-I$  传输矩阵法利用变量替换将界面矩阵演变为单位矩阵,与多层膜法相比, $V-I$  传输矩阵法参与运算的矩阵数量减少了一半,有效缩短了运算时间.

根据多层膜法计算单一光栅的反射系数公式  $r = A_{21}/A_{11}$ ,利用(5)式可得  $V-I$  传输矩阵法计算单一光栅的反射系数表达式

$$r = \frac{VI_{11} + VI_{12}/Z_2 - VI_{21}Z_1 - VI_{22}Z_1/Z_2}{VI_{11} + VI_{12}/Z_2 + VI_{21}Z_1 + VI_{22}Z_1/Z_2}. \quad (9)$$

进而得到光纤光栅 F-P 腔的反射率为<sup>[9,10]</sup>

$$R_{F-P} = |r_{F-P}|^2 = \frac{|r_1|^2 + |r_2|^2 - 2|r_1||r_2|\cos(2\beta h - \Phi_{r_1} - \Phi_{r_2})}{1 + |r_1|^2|r_2|^2 - 2|r_1||r_2|\cos(2\beta h - \Phi_{r_1} - \Phi_{r_2})}, \quad (10)$$

其中  $r_1$  和  $r_2$  是由(9)式计算得到的光纤光栅反射系数,  $\beta = 2\pi n/\lambda$  表示波长为  $\lambda$  的光波在折射率为  $n$  的光纤中传输时的传播常数,  $\Phi_{r_1}$  和  $\Phi_{r_2}$  分别是光栅反射系数  $r_1$  和  $r_2$  的相位。

### 3. 数值仿真

图2所示为将两个光栅串联在一起形成本征型的光纤光栅 F-P 腔结构。图2中的  $L_1, L_2$  和  $h$  分别为光栅1的长度、光栅2的长度和光纤光栅 F-P 腔腔长。下面将利用建立的  $V-I$  传输矩阵模型分别对三种结构的光纤光栅 F-P 腔反射光谱特性进行分析。

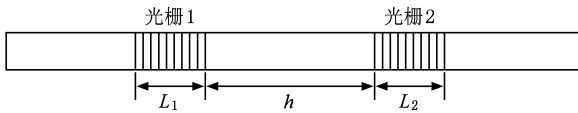


图2 光纤光栅 F-P 腔结构

#### 3.1. 均匀光纤光栅 F-P 腔结构

##### 3.1.1. $V-I$ 传输矩阵法分析的准确性和快速性

两均匀光纤光栅参数选取如下: 光栅长度  $L = L_1 = L_2 = 5$  mm, 有效折射率  $n = 1.4513$ , 折射率调制量  $\Delta n = 1.26 \times 10^{-4}$ , 条纹可见度  $v = 1$ , 光栅周期  $\Lambda = 534$  nm, 分层数  $N = 2L/\Lambda = 18726$ , F-P 腔长  $h = 2.5$  mm。图3所示为  $V-I$  传输矩阵法求解的单一均匀光栅反射谱和均匀光栅 F-P 腔反射谱。

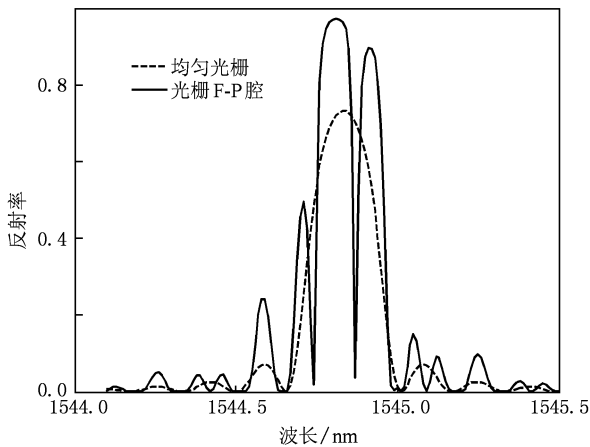


图3  $V-I$  传输矩阵法计算的均匀光纤光栅反射谱和 F-P 腔反射谱

选取相同参数, 图4所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法求解的均匀光纤光栅 F-P 腔反射谱的比较结果, 两种分析方法获得的结果误差在  $10^{-4}$  量级。在相同参数和相同求解目的下, 两种方法的运算时间分别为 4.553 和 7.422 s。当  $V-I$  传输矩阵法用于求解级联 F-P 腔反射谱特性时, 这种运算效率的提升与 F-P 腔级联个数成正比。

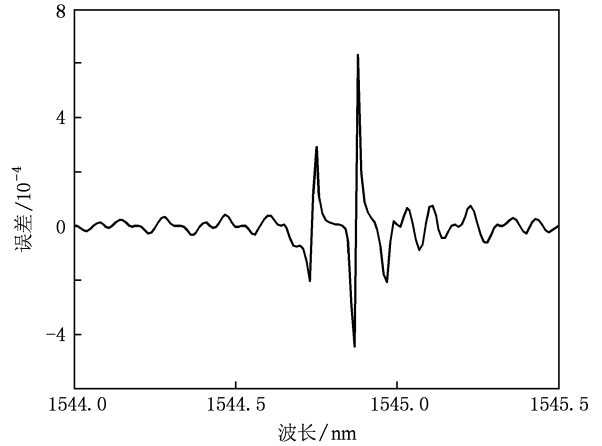


图4  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射谱的误差

##### 3.1.2. 不同光栅长度的 $V-I$ 传输矩阵法分析

光栅长度参数分别取  $L = 3, 5, 8$  mm, 其他参数不变。图5所示为  $V-I$  传输矩阵法计算 F-P 腔反射率随  $L$  的变化。由图5可以看出, 随着光栅长度  $L$  的增大, F-P 腔谐振峰宽度变窄, 峰值反射率增大, 通过公式  $r_{\max} = \tanh^2(\kappa L)$  ( $\kappa$  为交流耦合系数)<sup>[11]</sup> 可知, 光栅峰值反射率  $r_{\max}$  与光栅长度  $L$  成正比, 光栅峰值反射率的增加导致 F-P 腔峰值反射率增大、谐

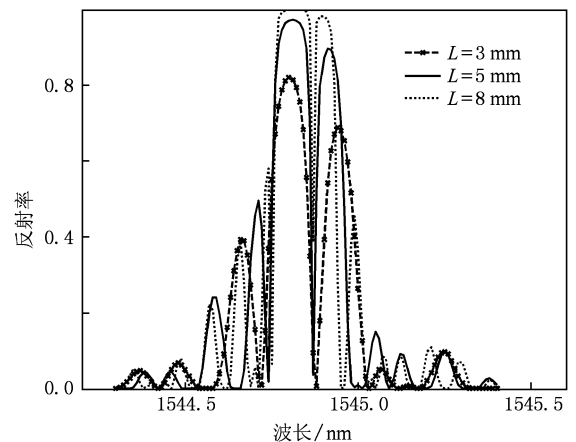


图5  $V-I$  传输矩阵法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射率随  $L$  的变化

振峰宽度变窄.同时,随着  $L$  增大,位于中心波长处的透射峰线宽变窄,透射深度变小,因此,当这种 F-P 腔用作滤波器时,可以根据需要选取适当的光栅长度<sup>[12]</sup>.

图 6 所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算 F-P 腔反射率在  $L$  取不同值时对应的最大误差.由图 6 可以看出, $V-I$  传输矩阵法在不同  $L$  取值下的最大误差均小于  $8 \times 10^{-3}$ ,在分析精度上满足要求.

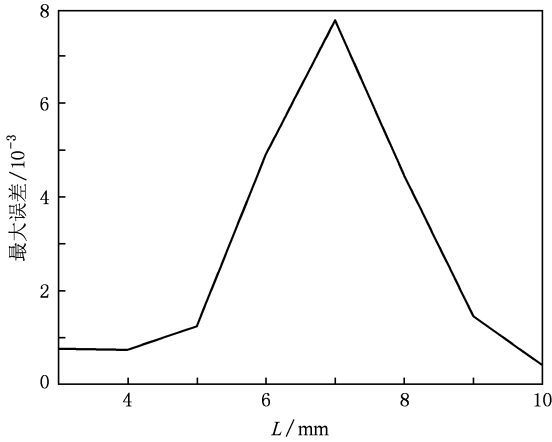


图 6  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射率在  $L$  取不同值时对应的最大误差

当光栅长度  $L$  分别取 3, 5 和 8 mm 时,多层膜法的求解时间分别为 4.719, 7.422 和 11.672 s,  $V-I$  传输矩阵法的求解时间分别为 2.906, 4.55 和 7.047 s.由此可知,随着光栅长度  $L$  的增加,  $V-I$  传输矩阵法比多层膜法在运算效率上更占优势.

### 3.1.3. 不同折射率调制量的 $V-I$ 传输矩阵法分析

光栅折射率调制量参数分别取  $\Delta n = 1.26 \times 10^{-4}$ ,  $1.66 \times 10^{-4}$ ,  $2.46 \times 10^{-4}$ , 其他参数不变.图 7 所示为  $V-I$  传输矩阵法计算 F-P 腔反射率随  $\Delta n$  的变化.

均匀光纤光栅 F-P 腔作为激光器的谐振腔使用时,只有在光栅的中心耦合波长处才能实现谐振腔的单模运转.由图 7 可以看出, F-P 腔的透射峰值波长随着光栅折射率调制量  $\Delta n$  的增加而向长波长方向移动. F-P 腔的透射峰值波长  $\lambda_{\max}$  与光栅折射率调制量  $\Delta n$  成正比关系,关系式为<sup>[11]</sup>

$$\lambda_{\max} = 2 \left( 1 + \frac{\Delta n}{n} \right) n \Lambda. \quad (11)$$

选取适当的折射率调制深度是确保光纤激光器实现单模稳频输出的必要条件.另一方面,光栅长度  $L$  的变化可以使 F-P 腔的峰值反射率发生改变,但

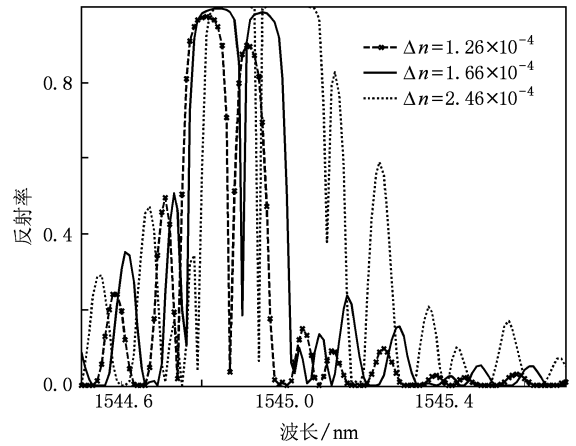


图 7  $V-I$  传输矩阵法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射率随  $\Delta n$  的变化

不会改变光栅的中心耦合波长.因此,通过适当选择不同长度但折射率调制完全相同的两个均匀光纤光栅,可以构成一端全反而另一端存在透射的谐振腔,实现在光栅中心耦合波长处的单模运转<sup>[13,14]</sup>.

图 8 所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算 F-P 腔反射率在  $\Delta n$  取不同值时对应的最大误差.由图 8 可以看出,  $V-I$  传输矩阵法在不同  $\Delta n$  取值下的最大误差均小于  $6 \times 10^{-3}$ ,在分析精度上满足要求.

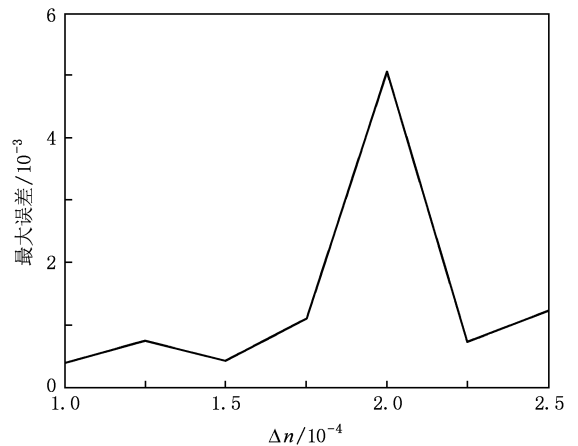


图 8  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射率在  $\Delta n$  取不同值时对应的最大误差

### 3.1.4. 不同腔长 $h$ 的 $V-I$ 传输矩阵法分析

光栅 F-P 腔腔长参数分别取  $h = 2.5, 5, 10$  mm, 其他参数不变.图 9 所示为  $V-I$  传输矩阵法计算 F-P 腔反射率随  $h$  的变化.

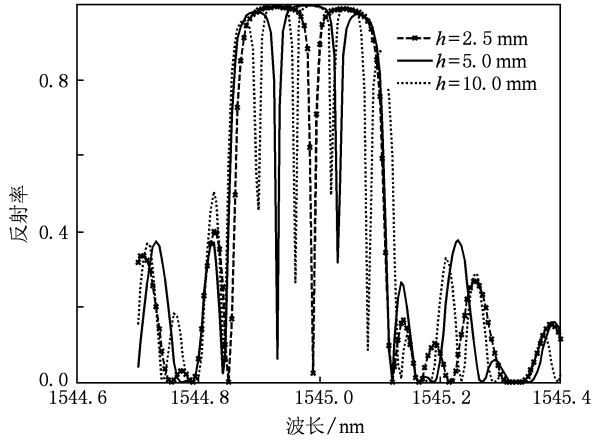


图9  $V-I$  传输矩阵法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射率随  $h$  的变化

均匀光纤光栅 F-P 腔在光栅中心耦合波长处产生谐振的条件是

$$h = \left( M - \frac{1}{2} \right) \Lambda, \quad (12)$$

其中  $M$  为正整数. 由图 9 可以看出, 当腔长  $h$  增大时, F-P 腔谐振纵模数增多, 纵模间隔减小, 反射谱宽度基本无变化. 此现象可以依据下式进行解释<sup>[13]</sup>:

$$4\pi n h \frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} + 2 \left| \varphi_r(\lambda_B) - \varphi_r(\lambda_B + \Delta\lambda) \right| = 2\pi, \quad (13)$$

其中  $\lambda_B$  为中心波长,  $\Delta\lambda$  为谱线间隔,  $\varphi_r$  为单个光栅反射光谱的相位. 随着腔长  $h$  的增加, 谱线间隔减小, 由于带宽不变, 所以谱线数目增多. 因此, 要实现 F-P 腔的单模运转, 需尽量减小腔长. 采用本例中的参数进行仿真发现: 当腔长  $h < 2.67$  mm 时, 均匀光纤光栅 F-P 腔能够实现单模运转.

图 10 所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算 F-P 腔反射率在  $h$  取不同值时对应的最大误差. 由图 10 可以看出,  $V-I$  传输矩阵法在不同  $h$  取值下的最大误差均小于  $3 \times 10^{-3}$ , 在分析精度上满足要求. 由于改变折射率调制量  $\Delta n$  和均匀光纤光栅 F-P 腔腔长  $h$  都不会对光栅的分层数带来影响, 因此当  $\Delta n$  和  $h$  变化时,  $V-I$  传输矩阵法和多层膜法的求解时间都基本不变.

### 3.2. 啁啾光纤光栅 F-P 腔结构

#### 3.2.1. $V-I$ 传输矩阵法分析的准确性和快速性

两啁啾光纤光栅参数选取如下: 光栅长度  $L =$

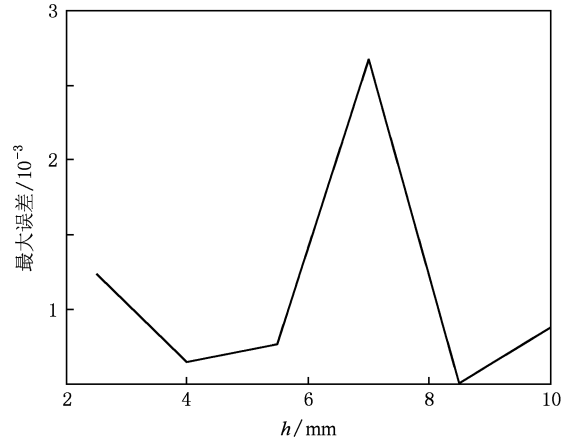


图 10  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算均匀光纤光栅 F-P 腔反射率在  $h$  取不同值时对应的最大误差

$L_1 = L_2 = 2.7$  mm, 有效折射率  $n = 1.4513$ , 折射率调制量  $\Delta n = 4 \times 10^{-4}$ , 条纹可见度  $v = 1$ , 啁啾系数  $C = 0.1$  nm/cm. 将整个光栅分为 10 段, 每段分层数  $N = 1012$ , F-P 腔腔长  $h = 5$  mm. 图 11 所示为  $V-I$  传输矩阵法计算的啁啾光纤光栅反射谱和 F-P 腔反射谱.

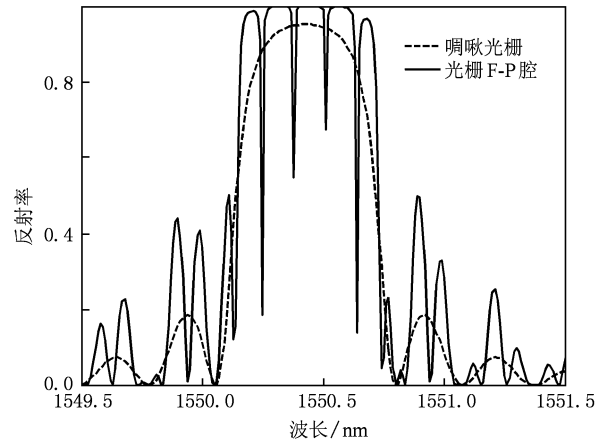


图 11  $V-I$  传输矩阵法计算的啁啾光纤光栅反射谱和 F-P 腔反射谱

由图 11 可知, F-P 腔基本只对啁啾光纤光栅反射带宽以内的光波提供反馈, 在反射带外由一些旁瓣引起的小幅谐振可以通过光栅两端折射率切趾加以消除. 通过改变光栅参数, 可以得到不同的透射线宽, 因此可以根据需要制作不同的窄带滤波器<sup>[15]</sup>.

选取相同的啁啾光纤光栅 F-P 腔结构参数, 图 12 所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算 F-P 腔

反射谱的结果差异. 由图 12 可以看出, 两种方法求解误差很小. 值得注意的是, 在啾啾光纤光栅的反射带宽内两种方法具有相同的运算结果, 这归因于两种方法用于啾啾光纤光栅反射率的计算时, 在反射带宽内各个波长处的反射系数都具有相同的相位, 而在反射带以外波长处的相位无严格变化规律, 此现象产生的原因有待进一步深入研究.

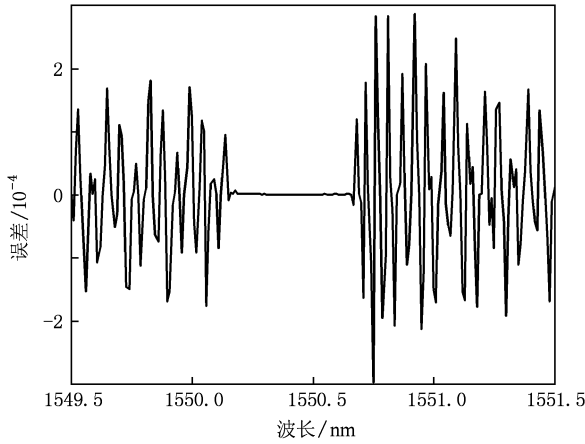


图 12  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算啾啾光纤光栅 F-P 腔反射谱的误差

多层膜法求解啾啾光纤光栅 F-P 腔反射谱的运算时间是 5.767 s, 而在相同参数和相同的求解目的下,  $V-I$  传输矩阵法的运算时间仅为 3.562 s.

### 3.2.2. 不同光栅长度的 $V-I$ 传输矩阵法分析

光栅长度参数分别取  $L = 2.5, 4.5, 6.5$  mm, 其他参数不变. 图 13 所示为  $V-I$  传输矩阵法计算 F-P 腔反射率随  $L$  的变化. 由图 13 可以看出, 随着光栅长度  $L$  的增大, 啾啾光纤光栅 F-P 腔透射峰的个数减少, 透射峰线宽变窄, 透射深度变小. 当光栅长度  $L > 6.4$  mm 时, 透射峰的个数减小为零.

图 14 所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算啾啾光纤光栅 F-P 腔反射率随  $L$  取不同值时对应的最大误差. 由图 14 可以看出,  $V-I$  传输矩阵法在不同  $L$  取值下的最大误差均小于  $3.2 \times 10^{-4}$ , 在分析精度上满足要求.

表 1 所列当啾啾光纤光栅长度在 2.5—9.5 mm 范围变化时, 多层膜法和  $V-I$  传输矩阵法求解啾啾光纤光栅 F-P 腔谱特性的运算时间比较, 以及在不同光栅长度下用  $V-I$  传输矩阵法求解啾啾光纤光栅 F-P 腔的透射峰个数的变化.

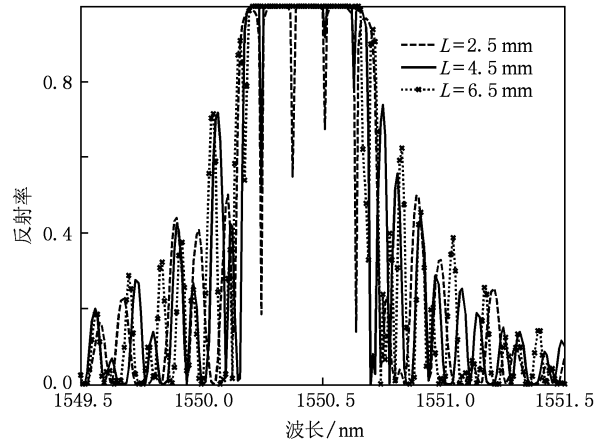


图 13  $V-I$  传输矩阵法计算啾啾光纤光栅 F-P 腔反射率随  $L$  的变化

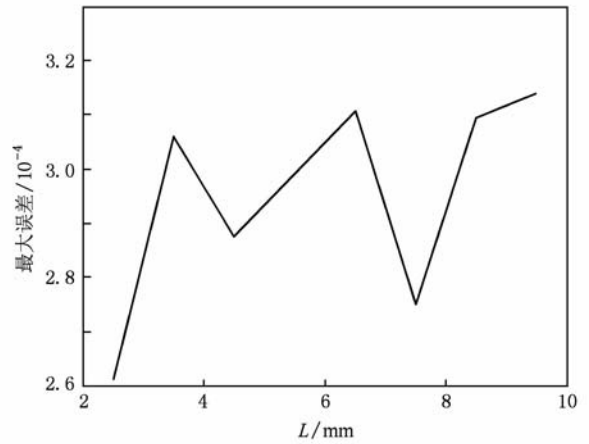


图 14  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算啾啾光纤光栅 F-P 腔反射率随  $L$  取不同值时对应的最大误差

表 1 不同光栅长度下两种方法运算时间比较及 F-P 腔透射峰个数统计

光栅长度/mm	多层膜法运算时间/s	$V-I$ 传输矩阵法运算时间/s	透射峰个数
2.5	5.578	3.231	4
3.5	7.110	4.328	4
4.5	8.938	5.453	3
5.5	10.796	6.547	2
6.5	12.641	7.641	0
7.5	14.672	8.750	0
8.5	16.407	9.828	0
9.5	18.344	10.937	0

由表 1 可知: 啾啾光栅越长,  $V-I$  传输矩阵法比

多层膜法在运算效率上的优势越明显；啾啾光纤光栅 F-P 腔透射峰的个数随着光栅长度的增加而减少。仿真结果表明，当光栅长度为 5.9 mm 时，透射峰个数减小为零。

### 3.2.3. 不同啾啾系数的 $V-I$ 传输矩阵法分析

光栅啾啾系数分别取  $C = 0.1, 1 \text{ nm/cm}$ ，其他参数不变。图 15 所示为  $V-I$  传输矩阵法计算 F-P 腔反射率随啾啾系数  $C$  的变化。由图 15 可以看出，随着  $C$  的增大，啾啾光纤光栅 F-P 腔透射峰的透射深度变小。这是因为  $C$  越大，单个光栅的反射率就越小，因此由光栅构成的 F-P 腔反射谱的谱线深度也就相应减小。

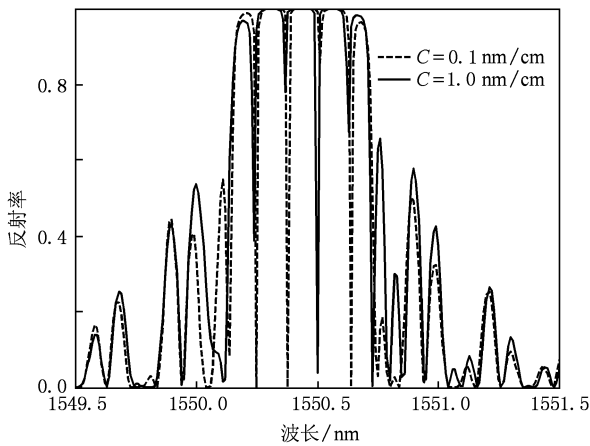


图 15  $V-I$  传输矩阵法计算 F-P 腔反射率随啾啾系数  $C$  的变化

图 16 所示为  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算 F-P 腔反射率在啾啾系数  $C$  取不同值时对应的最大误差。由图 16 可以看出， $V-I$  传输矩阵法在  $C$  取不同值时最大误差均小于  $3.1 \times 10^{-4}$ ，在分析精度上满足要求。

### 3.3. 非匹配光栅 F-P 腔结构

非匹配光栅 F-P 腔结构包括两光栅类型相同但参数不同和两光栅类型不同两种情况。图 17 所示为长度不同的两均匀光栅构成的 F-P 腔反射谱，光栅 1 长度为 7 mm，光栅 2 长度为 8 mm。仿真结果表明，两光栅长度不宜相差过大，因为光栅长度相差越大，光栅 F-P 腔透射谱线的深度就越浅。这意味着如果将这种 F-P 腔作为谐振腔使用，谐振腔的模式选择能力就会下降。

图 18 所示为均匀光栅和啾啾光栅构成的 F-P 腔反射谱。可以通过调谐均匀光栅中心反射波长的位置来改变 F-P 腔的谐振波长。

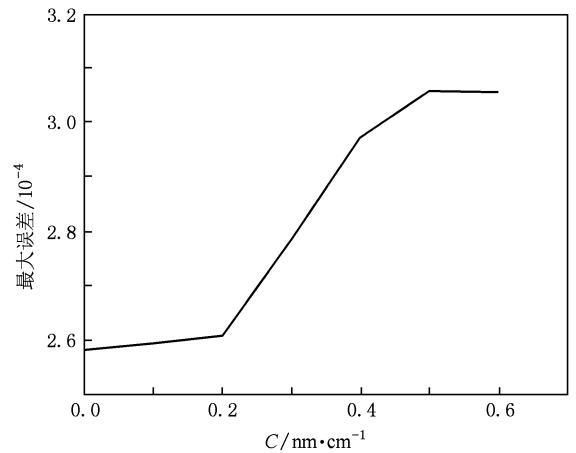


图 16  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法计算 F-P 腔反射率在啾啾系数  $C$  取不同值时对应的最大误差

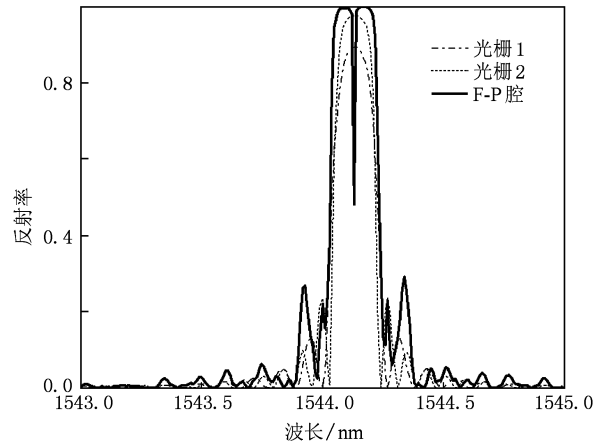


图 17 长度不同的两均匀光栅构成的 F-P 腔反射谱

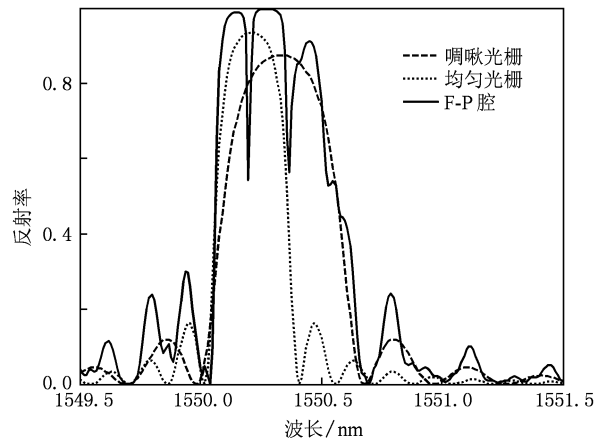


图 18 均匀光栅和啾啾光栅构成的 F-P 腔反射谱

非匹配光栅 F-P 腔结构情况较为复杂，利用  $V-I$  传输矩阵法对其进行分析研究有待进一步深入。

### 3.4. 仿真结果分析

利用  $V-I$  传输矩阵法分别在不同的光纤光栅长度  $L$ 、光栅折射率调制量  $\Delta n$  以及 F-P 腔腔长  $h$  下求解均匀光纤光栅 F-P 腔反射谱特性时,与利用多层膜法求解得到的结果十分相近,但  $V-I$  传输矩阵法可以有效地节省运算时间. 这种运算效率的优势与均匀光纤光栅的长度成正比,与光栅折射率调制量变化以及 F-P 腔腔长的改变无直接关系.

$V-I$  传输矩阵法与多层膜法求解啁啾光纤光栅 F-P 腔反射谱的结果也十分相近,特别是在啁啾光纤光栅反射带宽内,两种方法具有一致的分析结果. 但是,  $V-I$  传输矩阵法在运算效率上比多层膜法具有优势,特别是在构成 F-P 腔的光栅长度增加、分层数增多的情况下,  $V-I$  传输矩阵法可以节省更多的时间. 啁啾光纤光栅 F-P 腔透射峰的个数随着光栅长度的增加而减少,透射深度随着光栅啁啾系数  $C$  的增大而减小.

非匹配光栅 F-P 腔结构情况较为复杂,利用  $V-I$  传输矩阵法对其进行分析研究还有待进一步深入.

## 4. 实 验

本实验采用波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器紫外光对氢载 Corning 光纤曝光,采用相位掩模法制作均匀光纤光栅 F-P 腔. 通过程序精确控制扫描平台移动距离,精度可达 0.1  $\mu\text{m}$ . 实验中,制作均匀光纤光栅 F-P 腔的参数与上述仿真分析的参数相同. 调整移动平台,使曝光从掩模板 5 mm 处开始,曝光时间为 52 s,将移动平台移动到 12.5 mm 处再制作另一根同样参数的均匀光纤光栅,曝光时间也为 52 s. 使用日本 ANDO 公司生产的 AQ6317C 型光谱分析仪(最小分辨率为 0.01 nm)进行观测. 图 19 所示为通过光谱仪观测到的均匀光纤光栅 F-P 腔透射谱. 对实验结果(图 19)和理论分析结果(图 3)进行比较,且考虑到各种随机误差,可以认为实验结果和理论计算结果基本一致,谐振峰波长分别为 1544.83 和 1544.93 nm.

图 20 所示为相同参数下分别采用耦合模法和  $V-I$  传输矩阵法求解均匀光纤光栅 F-P 腔反射谱的结果. 将图 20 与图 19 进行对比后可知:与耦合模理论相比,实验中谐振峰的位置、谱形与  $V-I$  传输矩阵

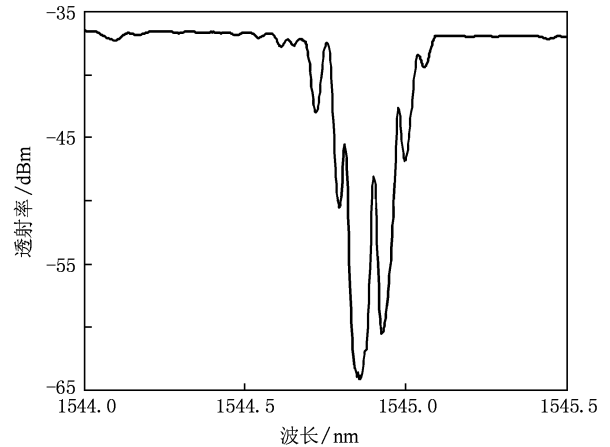


图 19 均匀光纤光栅 F-P 腔透射谱实验结果

法求解结果更接近.  $V-I$  传输矩阵法较之耦合模理论可以更准确地计算均匀光纤光栅 F-P 腔的谱特性.

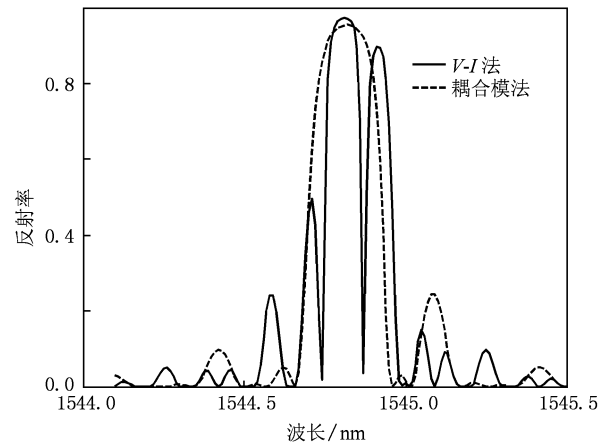


图 20 耦合模法和  $V-I$  传输矩阵法求解均匀光纤光栅 F-P 腔反射谱比较

## 5. 结 论

本文首先利用多层膜理论,建立了用于分析光纤光栅 F-P 腔的  $V-I$  传输矩阵模型. 从该模型出发,通过 Matlab 数值模拟了两种光纤光栅 F-P 腔结构的反射特性,讨论了不同参量变化对光纤光栅 F-P 腔反射特性的影响. 将  $V-I$  传输矩阵法与多层膜法的仿真结果作比较后发现:利用  $V-I$  传输矩阵法求解结果的误差很小,且具有很高的运算效率. 特别是在用于分析光栅长度较长的光纤光栅 F-P 腔反射谱特性时,这种优势会体现得更为明

显. 实验结果表明,  $V-I$  传输矩阵法比耦合模法可以相对更准确地计算光纤光栅 F-P 腔的谱特性. 不难预见,  $V-I$  传输矩阵法将会推动对级联光纤光

栅、多 F-P 腔级联的理论研究, 并将进一步在分布式光纤光栅 F-P 腔传感网络的理论分析中发挥重要作用.

- 
- [1] Othonos A, Lee X, Tsai D P 1996 *Opt. Eng.* **35** 1088
- [2] Liu Y Q, Chiang K S, Chu P L 2005 *Opt. Eng.* **44** 11
- [3] Daleiden J, Chitica N, Strassner M 1999 *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials* (Davos: IEEE) p285
- [4] Rao Y J, Cooper M R, Jackson D A 2000 *Electron. Lett.* **36** 708
- [5] Qiu K, Wen F, Wu B J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1726 (in Chinese) [邱 昆、文 峰、武保剑 2009 物理学报 **58** 1726]
- [6] Wei H, Wang M G, Jian S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 609 (in Chinese) [魏 淮、王目光、简水生 2003 物理学报 **52** 609]
- [7] Liu S J, Shen J, Shen Z C, Kong W J, Wei C Y, Jin Y X, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4588 (in Chinese) [刘世杰、沈 健、沈自才、孔伟金、魏朝阳、晋云霞、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 4588]
- [8] Capmany J, Muriel M A, Sales S, Rubio J J, Pastor D 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3125
- [9] Guan B O, Yu Y L, Ge C F, Dong X Y 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 34 (in Chinese) [关柏鸥、余有龙、葛春风、董孝义 2000 光学学报 **20** 34]
- [10] Zhang Z M, Shen Y H, Chen H F 2000 *Optics* (Beijing: Higher Education Press) p129 (in Chinese) [章志鸣、沈元华、陈惠芬 2000 光学 (北京: 高等教育出版社) 第 129 页]
- [11] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1277
- [12] Wang Y H, Ren W H, Liu Y, Tan Z W, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6393 (in Chinese) [王燕花、任文华、刘 艳、谭中伟、简水生 2008 物理学报 **57** 6393]
- [13] Lü C G, Cui Y P, Wang Z Y, Yun B F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 145 (in Chinese) [吕昌贵、崔一平、王著元、恽斌峰 2004 物理学报 **53** 145]
- [14] Xu O, Lu S H, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6404 (in Chinese) [许 鸥、鲁韶华、简水生 2008 物理学报 **57** 6404]
- [15] Ye C J, Yang Z Q 2007 *Laser J.* **28** 64 (in Chinese) [叶昌金、杨梓强 2007 激光杂志 **28** 64]

# Fiber grating Fabry-Perot cavity studied by $V$ - $I$ transmission matrix method\*

Li Zhuo-Xuan Pei Li<sup>†</sup> Qi Chun-Hui Peng Wan-Jing Ning Ti-Gang Zhao Rui-Feng Gao Song

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education,

Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 6 December 2009; revised manuscript received 8 July 2010)

## Abstract

Fast and efficient access to spectral characteristics of multi-cascaded fiber grating Fabry-Perot (F-P) cavity, is an important foundation and premise to ensure optimizing the design of cascade multi-wavelength lasers, amplifiers and other optical devices, and complex distributed sensing network based on the F-P structure.  $V$ - $I$  transmission matrix method is presented first in this paper to analyze the reflection spectral characteristics of fiber grating F-P cavity and then the  $V$ - $I$  transmission matrix model is established. Spectral characteristics of three different structures of fiber grating F-P cavity at different parameters are analyzed based on the  $V$ - $I$  transmission matrix model. Compared with multi-layer method,  $V$ - $I$  transmission matrix method can save the computation time apparently under the premise of ensuring analysis accuracy. The experimental results show that for analyzing the spectral characteristics of fiber grating F-P cavity, the  $V$ - $I$  transmission matrix method is more accurate than the coupled-mode method.

**Keywords:**  $V$ - $I$  transmission matrix method, fiber grating Fabry-Perot cavity characteristics, analysis accuracy, computation time

**PACC:** 4280F, 4281W

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60771008, 60837002), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4082024), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Ministry of Education, China (Grant No. 2008890) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education, China (Grant No. 200800040002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lipei@bjtu.edu.cn