

文章编号: 0258-7025(2010)10-2570-06

磁光光纤光栅法布里-珀罗腔的光谱可调性研究

卢 鑫 武保剑

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 利用传输矩阵法分析了磁光效应和光栅折射率初始相位对磁光光纤布拉格光栅(MFBG)-法布里-珀罗(FP)光谱特性的影响。通过调节外加磁场的大小及方向, 可实现 MFBG-FP 的可调滤波特性, 并能控制甚至抵消光栅折射率初始相位差引起的透射峰平移。对于高光栅反射率的 MFBG-FP, 透射峰位置和波长间隔可由其有效腔长以及等效磁光耦合系数来解析表达。MFBG-FP 的磁可调能力会随着 FP 腔与 MFBG 的磁光耦合系数比的增加而增强, 磁光耦合系数比大于 1 的 MFBG-FP 结构的磁可调特性优于相应的 MFBG 结构。

关键词 光通信; 可调滤波器; 磁光效应; 磁光光纤光栅

中图分类号 TN253; O436.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2570

Spectral Tunability of Magneto-Optic Fiber Grating-Based Fabry-Perot Structures

Lu Xin Wu Baojian

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks of the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract The transmission characteristics of magneto-optic fiber Bragg grating (MFBG)-based Fabry-Perot (FP) structures dependent on the magneto-optical effect and the initial phase of effective refractive index distribution of gratings are analyzed by the transfer matrix method. By adjusting the applied magnetic field, the function of tunable filtering for MFBG-FP structures is implemented and the magnetic control of transmission peaks is also useful for eliminating the influence of the initial index phase difference. For the case of high reflectivity of gratings, the position and wavelength spacing of transmission peaks can be analytically expressed by the effective cavity length and the effective magneto-optic coupling coefficient. The magnetic tunability of MFBG-FP is enhanced with the increase of the ratio of FP cavity to MFBG magneto-optic coupling coefficients. When the ratio is more than 1, the MFBG-FP has an advantage over the corresponding MFBG in magnetic tuning.

Key words optical communications; tunable filter; magneto-optical effect; magneto-optical fiber grating

1 引 言

1978 年 Hill 发现光纤中的光致光栅现象以来, 光纤布拉格光栅(FBG)得到了深入的研究和广泛的应用^[1]。由两个 FBG 组成的法布里-珀罗(FP)腔结构(FBG-FP)是 FBG 的重要应用之一, 该结构作为滤波器可实现光纤激光器选频, 从而使激光器具有输出光谱稳定性好的优点^[2]。例如, 光纤光栅 FP 腔可在 FBG 反射带宽内形成干涉条纹, 其梳状滤波特性可用

于实现波分复用(WDM)^[3]。另一方面, 可调滤波器能大大改善 WDM 网络的灵活性, 并用于 FBG 传感网络的解复用。目前人们重点研究 FBG-FP 结构的自由光谱区, 即透射峰的间隔^[4,5]。磁光光纤布拉格光栅^[6](MFBG)作为一种具有磁光效应的光栅型波导结构, 可通过在 FBG 中掺入稀土材料或在钇铁石榴石(YIG)光纤上刻入光栅结构而得到, 从而能被用于构建磁可调的滤波器。J. L. Arce-Diego 等^[7]提出

收稿日期: 2010-02-25; 收到修改稿日期: 2010-04-02

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z216)和新世纪优秀人才支持计划资助课题。

作者简介: 卢 鑫(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: luxin1026@gmail.com

导师简介: 武保剑(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

利用外加磁场调整 FBG 的反射谱, F. Jonsson 等^[8,9]分析了非线性效应下的磁光布拉格光栅。MFBG 在光信息处理领域具有比传统光栅更丰富的应用,例如高灵敏度的磁场传感和全光整形^[10]。因此,磁光光纤光栅法布里-珀罗(MFBG-FP)结构除具有传统 FBG-FP 腔输出波长精确的特点外,还可通过调节外加磁场来改变透射光谱和偏振态等,实现可协调滤波和磁场传感等。

本文主要考虑 MFBG-FP 结构在可调滤波方面的应用。在考虑 MFBG 折射率初始相位影响的基础上,利用传输矩阵法推导了 MFBG-FP 结构的透射率公式;分析了透射峰的间隔以及 FBG 折射率初始相位对该结构透射谱的影响。

2 MFBG-FP 理论模型

各向同性 MFBG 构成的 FP 结构中导波光的本征

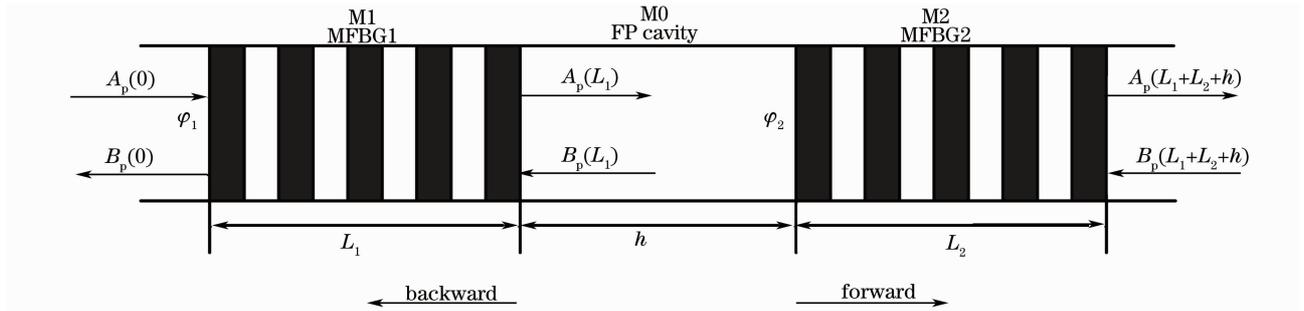


图 1 磁光光纤光栅 FP 结构

Fig. 1 Magneto-optic fiber Bragg grating-based FP structure

式中 $\sigma = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B)$ 为 MFBG 的直流耦合系数, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, Λ 为 FBG 的周期, n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率, 光栅耦合系数 $\kappa_g = \pi\Delta n/\lambda$, $\kappa_p = pVB$ 为磁

偏振态是圆偏振光, 因此本文考虑圆偏振光入射的情况以简化分析。对于非本征偏振态入射到光栅的情形, 可将其分解为左右旋圆偏振光, 再进行类似分析。

2.1 MFBG-FP 结构的透射率

MFBG-FP 结构由两个具有相同布拉格波长的光栅组成, 包括 M0, M1 和 M2 三部分, 如图 1 所示, 其中 φ_1 和 φ_2 分别表示相应 MFBG 的折射率初始相位。单段均匀 MFBG 中圆偏振光的传输方程已由文献[6]和[10]给出, 但没有考虑光栅折射率分布的初始相位影响。当 MFBG 的折射率初始相位为 φ_0 时, 正、反方向传播的导波光复振幅 A_p, B_p 满足耦合模方程

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} A_p(z) \\ B_p(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(\sigma + \kappa_p) & i\kappa_g \exp(i\varphi_0) \\ -i\kappa_g \exp(-i\varphi_0) & i(\sigma + \kappa_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p(0) \\ B_p(0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

光耦合系数^[11], V 为费尔德常数, B 为外加磁感应强度, $p = \pm 1$ 分别对应于右旋和左旋圆偏振光。

MFBG 的传输矩阵为

$$\mathbf{N}_{\text{MFBG}}^R = \begin{bmatrix} \cosh(sL) - i \frac{\sigma + \kappa_p}{s} \sinh(sL) & -i \frac{\kappa_g}{s} \sinh(sL) \exp(i\varphi_0) \\ i \frac{\kappa_g}{s} \sinh(sL) \exp(-i\varphi_0) & \cosh(sL) + i \frac{\sigma + \kappa_p}{s} \sinh(sL) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $s = \sqrt{\kappa_g^2 - (\sigma + \kappa_p)^2}$ 。由正向入射时的边界条件 $A_p(0) = 1$ 和 $B_p(L) = 0$, 以及反向入射时的边界条件 $A_p(0) = 0$ 和 $B_p(L) = 1$, 可以得到 MFBG 的正向反射系数 r_g , 反射系数相位因子 φ_r , 透射系数 t_g 以及反向反射系数 r'_g 为

$$r_g = -\frac{\kappa_g \sinh(sL) \exp(-i\varphi_0)}{i s \cosh(sL) + (\sigma + \kappa_p) \sinh(sL)}, \quad (3)$$

$$\varphi_r = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{(\sigma + \kappa_p) \sinh(sL)}{s \cosh(sL)}, \quad (4)$$

$$t_g = \frac{s}{s \cosh(sL) - i(\sigma + \kappa_p) \sinh(sL)}, \quad (5)$$

$$r'_g = \frac{\kappa_g \sinh(sL) \exp(i\varphi_0)}{i s \cosh(sL) - (\sigma + \kappa_p) \sinh(sL)}. \quad (6)$$

根据(3)式可得 MFBG 的反射率为

$$R_g = r_g r_g^* = \frac{\sinh^2(sL)}{\cosh^2(sL) - (\sigma + \kappa_p)^2 / \kappa_g^2}, \quad (7)$$

光栅折射率初始相位 φ_0 不改变反射率的大小, 但会影响反射率系数的相位角, 进而影响 MFBG-FP 干涉结构的特性。由(7)式可知, 当 $\sigma + \kappa_p = 0$ 时反射

率取最大值 $R_{\max} = \tanh^2(\kappa_g L)$, 对应于波长 $\lambda'_B = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{2\pi n_{\text{eff}} - \kappa_p \lambda_B} \lambda_B$; 显然磁光耦合作用会使光栅的布拉格波长发生改变。

$$N_{\text{FP}}^p = \begin{bmatrix} \exp[-ih(\sigma_{\text{FP}} + \kappa'_p)] & 0 \\ 0 & \exp[ih(\sigma_{\text{FP}} + \kappa'_p)] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $\sigma_{\text{FP}} = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$, h 为 FP 腔的腔长, κ'_p 为 FP 腔的磁光耦合系数, 其表达形式与 κ_p 类似。一般来讲, 磁光效应 FP 腔的作用不仅引起相位延迟, 还会改变导波光的偏振态 (但对于本文所考虑的圆偏振光没有影响)。

MFBG-FP 结构的总传输矩阵可由 (2) 式和 (8) 式求出, 进而得到其透射率^[11]。两个不同的光栅组成的 FP 结构仅在两光栅反射谱交叠处表现出梳状滤波特性, 并且光栅的长度、有效折射率以及折射率调制深度都会影响透射峰的位置和谱宽。为了突出折射率初始相位差和外加磁场的影响, 下面考虑由两个完全相同 (折射率初始相位除外) 的均匀 MFBG 形成的 FP 结构, 其总透射率为

$$T_{\text{MFBG-FP}}^p = \frac{1}{1 + F \sin^2[\varphi_r + \Delta\varphi_{12}/2 + h(\sigma_{\text{FP}} + \kappa'_p)]}, \quad (9)$$

式中 $F = 4R_g/(1 - R_g)^2$, $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ 为光栅初始相位差。可以看出, 当满足谐振条件

$$\varphi_r + \Delta\varphi_{12}/2 + h(\sigma_{\text{FP}} + \kappa'_p) = m\pi \quad (m \text{ is integer}) \quad (10)$$

时 MFBG-FP 的透射率最大, 对应于透射峰。可见, 光栅折射率初始相位差和外加磁场的改变都会引起 MFBG-FP 透射谱的移动。

当 FP 腔的磁光效应可以忽略时, 由 (10) 式可得这种 MFBG-FP 结构的透射峰间隔 $\Delta\lambda$ 所满足的条件

$$\varphi_r(\lambda + \Delta\lambda) - \varphi_r(\lambda) - 2\pi n_{\text{eff}} h \frac{\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)} = k\pi \quad (k \text{ is integer}), \quad (11)$$

(11) 式表明, 透射峰的间隔不依赖于 FBG 折射率初始相位 (它会引起 MFBG-FP 透射谱的移动), 但会通过反射系数相位角 φ_r 与外加磁场相联系。

当 FP 腔没有磁光效应且两光栅的初始相位一致 ($\varphi_1 - \varphi_2 = 0$) 时, (10) 式化简为 $\varphi_r + 2\pi n_{\text{eff}} h/\lambda = m\pi$, 它与普通的非磁性 FBG-FP 情形有类似的形式^[14]。

对于两光栅间的 FP 腔, 根据法拉第磁光效应的非互易性^[12] 以及磁光光纤中圆偏振光的光场分布特点^[13], 计及磁光效应时 FP 腔的传输矩阵为

2.2 MFBG-FP 结构的透射光谱

与通常的高反射率镜面组成的 FP 腔透射谱特性不同, 布拉格光栅反射率的波长依赖性使 FBG-FP 腔只是在 FBG 反射带宽内表现出梳状滤波特性。因此, 在设计 MFBG-FP 时, 应使 MFBG 反射带宽尽量大同时具有较高的反射率。由 (9) 式计算得到的典型 MFBG-FP 透射谱如图 2 所示, 其中所形成的腔结构中有磁光效应, 两光栅的初始相位差为零。具体计算参数为: 有效折射率 $N_{\text{eff}} = 1.5$, 折射率调制深度 $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$, MFBG 长度 $L = 3 \text{ mm}$, 布拉格波长 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$, 磁光耦合系数 κ_p 为 300 m^{-1} , FP 腔的腔长 h 为 3 mm 。在相同参数下, 图中还画出了非磁性 FBG 和 MFBG 的反射率曲线以及等长 FP 标准具的透射率曲线, 其中 FP 标准具两镜面的反射率等于 MFBG 的最大反射率。由图 2 可以看出: 1) 与 FP 标准具的反射谱相比, MFBG-FP 结构仅在 MFBG 的反射带宽内有透射峰; 2) MFBG-FP 的透射峰间隔小于等长 FP 标准具的谱线间隔, 因此 MFBG-FP 的有效腔长大于 h , 这可由 MFBG 反射系数的相位因子加以解释; 3) 磁光效应可使 MFBG 的反射谱发生移动, 从而影响 MFBG-FP 的透射特性。

光栅折射率初始相位和磁光效应对 MFBG-FP 结构透射谱的影响如图 3 所示, 其中 MFBG 与 FP 腔的磁光耦合系数相等。从图 3 可以看出, 外加磁场和 FBG 的折射率初始相位差都会引起 MFBG-FP

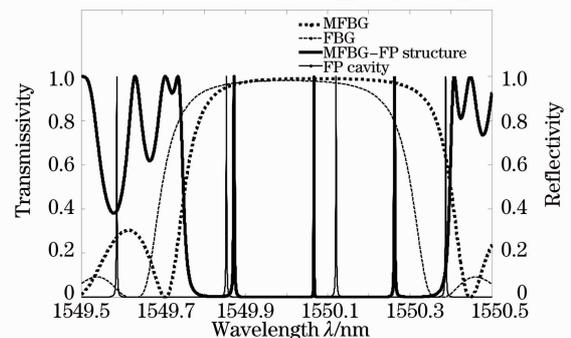


图 2 MFBG-FP 结构的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of the MFBG-FP structure

透射峰位置的平移。因此,通过调节外加磁场和输入光的偏振态改变磁光耦合系数,可以抵消由折射率相位差造成的透射谱偏移,参见(10)式。为了方便后面对其透射峰进行标号,位于中央的透射峰为零级峰,左右的峰为一级峰,依次类推。

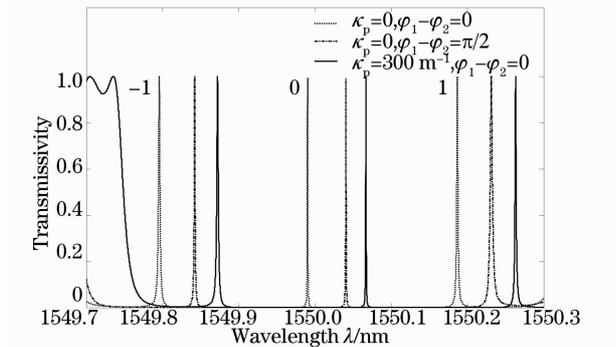


图3 折射率初始相位和磁光效应对 MFBG-FP 透射谱的影响

Fig. 3 Influence of the initial phase of refractive index and the magneto-optical effect on the transmission spectra for the MFBG-FP

3 高反射率条件下 MFBG-FP 的光谱特性

MFBG-FP 的光谱特性是梳状滤波器应用中关注的参数之一,包括谱线移动和谱线间隔变化。由于 MFBG 反射系数相位角表达式中包含复杂的反三角函数,难以直观地分析影响 MFBG-FP 光谱特性的因素。但在高反射率光栅组成的 FP 结构中,可以将 φ_r 近似为一个相对简单的函数,从而分析光栅折射率初始相位和外加磁场对 MFBG-FP 谱线的影响。光栅的反射带宽较窄,使得光栅系数 κ_g 随波长的变化极小,可近似认为 κ_g 为一常量。对于高反射率的 MFBG, $R_{\max} = \tanh^2(sL) \approx 1$, $(\sigma + \kappa_p)/s \approx (\sigma + \kappa_p)/\kappa_g$, 此时反射系数的相位因子

$$\varphi_r \approx \frac{\pi}{2} + \frac{\sigma + \kappa_p}{\kappa_g} \approx -\alpha + \frac{\pi}{2} + \frac{2n_{\text{eff}}}{\Delta n}, \quad (12)$$

式中 $\alpha = \frac{1}{\pi \cdot \Delta n} \left(\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_B} - \kappa_p \right)$ 。可见在 MFBG 较窄的反射带宽内, φ_r 近似呈一条直线。

3.1 MFBG-FP 的透射峰间隔

对于高反射率的普通 FBG-FP 结构,利用(11), (12)式可求出其透射峰的最小波长间隔为

$$\Delta\lambda_{\min} = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}(h + 1/\kappa_g)}, \quad (13)$$

(13)式表明,随 h 的减小, $\Delta\lambda_{\min}$ 逐渐增大,最后可使

MFBG 的反射带宽内只有一个透射峰, FBG-FP 结构由梳状滤波变为窄带滤波。根据 FP 标准具的透射光谱特性,当它与 FBG-FP 谱线重合时 FP 标准具的长度应为 $h_{\text{eff}} = h + 1/\kappa_g$, 称为 FBG-FP 的有效腔长,结果与文献[15]一致。

同样地,利用(11), (12)式,可求出高反射率 MFBG-FP 结构的最小透射峰之间的频率间隔为 $\Delta f_{\min} = \frac{-\pi c}{2\pi n_{\text{eff}} h + \alpha \lambda^2}$, c 为真空中光速。当 FP 标准具的透射光谱特性与 MFBG-FP 谱线重合时, FP 标准具的长度即 MFBG-FP 的有效腔长为

$$h_{\text{eff}} = h + \frac{1}{\kappa_g} \left(1 - \frac{\kappa_p \lambda}{2n_{\text{eff}}} \right), \quad (14)$$

(14)式表明,有效腔长不但与 FBG 折射率调制 Δn 引起的相位延时有关^[16],还与左右旋圆偏振光引起的不同磁光耦合 κ_p (磁圆双折射)有关。通常情形下, $|\kappa_p \lambda / (2n_{\text{eff}})| \ll 1$, 此时可忽略磁场对有效腔长的影响。

3.2 MFBG-FP 的透射峰位置

因为外加磁场和折射率初始相位差能引起 MFBG-FP 透射峰的移动,所以透射峰的位置也是一个需要考虑的问题。设 $\Delta\varphi_{12} \neq 0$ 时 MFBG-FP 结构的透射峰对应波长 $\lambda'_j = \lambda_j + \delta(\lambda_j)$, λ_j 为 $\Delta\varphi_{12} = 0$ 时普通 FBG-FP 结构透射峰的位置, $\delta(\lambda_j)$ 是透射峰的波长移动量, j 为整数。分别将 λ'_j 和 λ_j 按各自对应的条件代入(11)式,而后相减,可得

$$\delta(\lambda_j) = \frac{(2\kappa_{\text{eff}} + \kappa_g \Delta\varphi_{12}) \lambda_j}{4\pi n_{\text{eff}} (1 + h\kappa_g) - (2\kappa_{\text{eff}} + \kappa_g \Delta\varphi_{12}) \lambda_j} \lambda_j, \quad (15)$$

式中 $\kappa_{\text{eff}} = \kappa_p + \kappa_g h \kappa'_p = \kappa_p (1 + \kappa_g h \rho)$ 称为 MFBG-FP 的等效磁光耦合系数, $\rho = \kappa'_p / \kappa_p$ 为 FP 腔与 MFBG 的磁光耦合系数比。光栅的反射带宽较窄,使光栅系数 κ_g 随波长的变化极小。所以计算过程中,认为 κ_g 为一常量,此时反射系数的相位角可近似为 $\varphi_r \approx \pi/2 + (\sigma + \kappa_p)/\kappa_g$ 。如果已知任意 λ_j 的值(设计 FBG-FP 结构时常取 $\lambda_0 = \lambda_B$)^[9], MFBG-FP 结构的透射峰位置可表示为

$$\lambda'_{j+k} = \lambda_j + k \cdot \Delta\lambda_{\min} + \delta(\lambda_j + k \cdot \Delta\lambda_{\min}) \quad (k = j/|j|). \quad (16)$$

利用(15)式可以得到外加磁场和折射率初始相位差各自引起的透射峰波长移动量 $\delta_M(\lambda_j)$ 和 $\delta_a(\lambda_j)$ 。令(15)式中 $\Delta\varphi_{12} = 0$ 或 $\kappa_p = \kappa'_p = 0$ 可知

$$\delta_M(\lambda_j) = \frac{\kappa_{\text{eff}} \lambda_j}{2\pi n_{\text{eff}} (1 + h\kappa_g) - \kappa_{\text{eff}} \lambda_j} \lambda_j, \quad (17)$$

$$\delta_a(\lambda_j) = \frac{\Delta\varphi_{12}\kappa_g\lambda_j}{4\pi n_{\text{eff}}(1+h\kappa_g) - \Delta\varphi_{12}\kappa_g\lambda_j} \lambda_j. \quad (18)$$

由(17),(18)式可知,等效磁光耦合系数 $\kappa_{\text{eff}} > 0$ 或光栅初始相位差 $\Delta\varphi_{12} > 0$ 时,都会引起 MFBG-FP 透射峰的红移,即对应的波长增加。显然提高有效磁光耦合系数能够使 MFBG-FP 结构在更大的范围内实现磁可调滤波。对于 $\Delta\varphi_{12} = 0$ 的情形,MFBG-FP 的波长移动量随着 FP 腔与 MFBG 的磁光耦合系数比 ρ 的增加而增大,当 $\rho = \kappa'_p/\kappa_p > 1$ 时,MFBG-FP 的波长移动量大于相应的 MFBG ($h=0$) 结构;当 $\kappa_p = \kappa'_p$ 时,两者的磁可调特性相同。

3.3 高反射近似与严格数值计算的比较

在光栅的高反射率近似条件下,通过对反射系数相位角的分析,得到了 MFBG-FP 透射峰位置及其间隔的解析表达式,其具体的适用范围可通过与严格数值计算结果对比来确定。下面以单峰透射的 MFBG-FP 结构为例加以说明,取 $\Delta\varphi = \pi/3$, $\kappa_p = 300 \text{ m}^{-1}$, $\kappa'_p = 300 \text{ m}^{-1}$, $h = 1 \text{ mm}$,其他参数与前面相同。根据(15),(17)和(18)式计算的波长偏移(相对于 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$)如图 4 所示,为便于比较,还给出了相应情形下严格的数值计算结果。

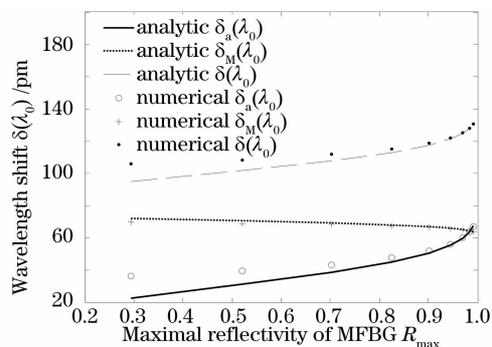


图 4 解析结果与严格数值计算的对比

Fig. 4 Comparison between analytic results and strictly numerical calculation

由图 4 可以看出,随着 MFBG 反射率的增大,反射系数相位因子的近似条件逐渐得到满足,波长移动量的解析结果与严格的数值计算逐渐吻合。总的来看,近似的解析式高估了相位差引起的波长移动量,而给出的磁场引起的波长偏移与严格数值结果较为接近。对于总的波长偏移,当光栅的最大反射率 $R_{\text{max}} \geq 0.75$ 时,近似结果与数值计算的相对误差小于 10%。在实际光栅制作过程中,上述范围很容易达到。因此该解析式对设计和制造磁性或普通 FBG-FP 滤波器具有参考价值。

4 结 论

分析了 MFBG-FP 结构的透射谱,着重研究了其可调滤波的特性,指出了外加磁场和光栅折射率初始相位差对透射峰位置及其间隔的影响。对于高反射率的 MFBG,通过对反射系数相位因子的近似,得到了 MFBG-FP 结构透射峰间隔以及外加磁场和光栅折射率初始相位差引起的透射峰移动量的表达式。当光栅的最大反射率高于 0.75 时,近似的解析解与严格的数值计算结果的误差小于 10%;如果仅考虑磁场引起的波长偏移,解析式的适用范围更大。理论上还揭示了可有效增强磁光可调性的 MFBG-FP 结构,为实现可调窄带滤波器和梳状滤波器提供了新的途径。

参 考 文 献

- 1 Wang Yanhua, Ren Wenhua, Liu Yan *et al.*. Phase-modified coupled mode theory for calculation of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity transmission spectrum [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6393~6399
王燕花,任文华,刘艳等.相位修正的耦合模理论用于计算光纤 Bragg 光栅法布里-珀罗腔透射谱[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6393~6399
- 2 Hu Shuangshuang, Li Yi, Jiang Qunjie *et al.*. Wavelength locker of pump laser based on dual fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 44~48
胡双双,李毅,蒋群杰等.基于双光纤布拉格光栅的抽运激光器波长锁定器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 44~48
- 3 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for larger number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chinese 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
- 4 A. Melloni, M. Floridi, F. Morichetti *et al.*. Equivalent circuit of Bragg gratings and its application to Fabry-Perot cavities [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(2): 273~281
- 5 S. Legoubin, M. Douay, P. Bernage *et al.*. Free spectral range variations of grating-based Fabry-Perot filters photowritten in optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(8): 1687~1694
- 6 Wu Baojian, Liu Xiao, Qiu Kun. Characteristics of magneto-optic fiber Bragg gratings for use in optical signal processing [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(2): 165~171
- 7 J. L. Arce-Diego, R. Lopez-Ruisanchez, J. M. Lopez-Higuera *et al.*. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 603~605
- 8 F. Jonsson, C. Flytzanis. Optical amplitude and phase evolution in nonlinear magneto-optical Bragg gratings [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. & Mater.*, 2004, **13**(1): 129~154
- 9 F. Jonsson, C. Flytzanis. Nonlinear magneto-optical Bragg gratings [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(6): 063902
- 10 Qiu Kun, Wu Baojian, Wen Feng. Nonlinear propagation of circularly polarized light in magneto-optic fiber Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1726~1730

- 邱 昆, 武保剑, 文 峰. 磁光光纤 Bragg 光栅中圆偏振光的非线性传输特性[J]. 物理学报, 2009, **58**(3): 1726~1730
- 11 Wu Baojian. Magnetic field sensitivity of sectional magneto-optic fiber gratings [J]. *J. University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, **38**(5): 634~638
武保剑. 组合磁光光纤光栅的磁场敏感性分析[J]. 电子科技大学学报, 2009, **38**(5): 634~638
- 12 Liang Zhongcheng, Zhao Rui, Bao Gang. Enhancement effect of magneto-optical rotation (MOR) and properties of MOR enhancement device [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5479~5483
梁忠诚, 赵 瑞, 包 刚. 磁旋光增强效应与旋光增强器特性分析[J]. 物理学报, 2009, **58**(8): 5479~5483
- 13 Liu Fen, Wu Baojian, Cheng Liwei *et al.*. Research on spectral properties of sectional magneto-optic fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 020501
刘 芬, 武保剑, 程立伟 等. 分段磁光光纤光栅的光谱特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 020501
- 14 Lü Changgui, Cui Yiping, Wang Zhuyuan *et al.*. A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Perot 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
- 15 Ren Wenhua, Wang Yanhua, Feng Suchun *et al.*. A study on the interval between longitudinal modes of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7758~7764
任文华, 王燕花, 冯素春 等. 对光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模间隔问题的研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(12): 7758~7764
- 16 Wenhua Ren, Peilin Tao, Zhongwei Tan *et al.*. Theoretical and experimental investigation of the mode-spacing of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 775~777