

文章编号: 0258-7025(2010)06-1485-05

光纤微腔级联性质及布拉格光栅特性研究

王春宝 张伟刚 刘卓琳 颜爱东 尚佳彬

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 对光纤布拉格光栅(FBG)阶梯型折射率分布进行傅里叶级数展开,分析了光纤中阶梯型折射率分布与正弦型折射率分布的关系,从而证明了用阶梯型折射率分布近似正弦型折射率分布方法的合理性。利用 Rouard 方法,数值分析了腔长为亚微米量级的光纤法布里-珀罗(F-P)腔级联的光谱特性。在光纤 F-P 腔双光束近似基础上,推导出光腔级联反射光强的近似表达式;定量分析了级联光腔个数不同时反射谱的特性。从光腔级联的角度,提出了一种简捷实用的光纤布拉格光栅的分析方法,阐述了光纤布拉格光栅机理及其成栅过程。

关键词 光栅;光纤法布里-珀罗腔;光纤布拉格光栅;光腔级联;Rouard 方法

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1485

Research on Character of the Cascade of Fiber Cavity and Connection with Fiber Bragg Grating

Wang Chunbao Zhang Weigang Liu Zhuolin Yan Aidong Shang Jiabin

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Refractive distribution in fiber Bragg grating(FBG) is expanded by Fourier series. The relation between step index profile and sinusoidal distribution is analyzed, and it is reasonable for using step index profile distribution to do the calculation. Rouard numeric method is used to analyze transmission spectrum of the cascaded Fabry-Pérot (F-P) cavities with length about sub-micron level. Based on two-beam optical interference approach, the characteristics of the cascaded fiber cavity and the connection between F-P cavity and FBG are given. An advisable method is proposed in which FBG can result from the cascade of fiber cavities, and basic principle of the FBG is established by utilizing the cascaded F-P cavity approach.

Key words gratings; fiber Fabry-Pérot cavity; fiber Bragg grating; fiber cavity cascade; Rouard method

1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪是一种干涉型的光纤器件,与光纤 F-P 干涉仪相关的光纤器件在光纤通信和光纤传感领域有很多应用。光纤 F-P 干涉仪有本征型和非本征型,非本征型光纤 F-P 干涉仪通常都有一段折射率均匀变化的区域,又可称为光纤 F-P 腔。当光在光纤 F-P 腔内传播时,遇到

折射率变化区域会在区域的边界产生反射,由于边界的反射率很小,故可用双光束干涉近似^[1]方法进行分析。光纤 F-P 腔可用于高精度、温度不敏感的折射率传感器^[2]。光纤 F-P 腔可由飞秒激光加工,加工出的光纤 F-P 腔可用于应变或折射率传感器^[3~5],或是将光纤 F-P 腔接入到光纤环振荡腔中用于微量流体吸收谱的测量^[6]。如果光纤 F-P 腔折

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 10974100, 60577018)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(10JCZDJC24300)和光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题资助课题。

作者简介: 王春宝(1981—),男,博士研究生,主要从事光子技术及光通信等方面的研究。

E-mail: wangchunbao@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 张伟刚(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

射率变化很小($10^{-5} \sim 10^{-3}$ 量级,这种折射率调制可由激光曝光得到),腔长很短(亚微米量级),那么这样的光纤 F-P 腔可以看成光纤布拉格光栅(FBG)单个周期里的一部分。光纤布拉格光栅是一种短周期反射式光栅,光栅的周期为亚微米量级,折射率调制深度为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 量级,可用耦合模理论描述^[7]。耦合模理论是一种微扰理论,优点是物理机制清晰,方法直观灵活。然而,当光栅周期数很少时,耦合模理论的假设不再成立^[8]。光纤布拉格光栅折射率分布具有周期性,Miguel A. Muriel 等^[9]在多层膜理论的基础上发展了传输矩阵法,由于传输矩阵法方便快捷,因此经常被用于分析光纤布拉格光栅的光谱性质^[10]。同样基于多层膜理论,L. A. Weller-Brophy 等^[11]发展了 Rouard 方法用来分析波导光栅的光谱特性,这种方法是一种数值算法,适用于各种类型光栅,尤其是折射率调制深度较大的光栅^[12]。

在理想情况下,折射率调制为矩形的光纤布拉格光栅,从结构上可以看作光纤 F-P 腔的级联,光纤中传播的光在每个光纤 F-P 腔的界面处产生反射和折射,这样经多个界面反射的光产生多光束干涉,其作用效果(光谱)与通常的 F-P 干涉仪产生细锐条纹相类似^[13],即光纤布拉格光栅具有窄带特性。本文在光纤 F-P 腔双光束近似基础上,利用 Rouard 方法对光纤 F-P 腔级联的光谱特性进行了研究,推导并分析了光纤 F-P 腔与光纤布拉格光栅之间的渐变过程。同时,提出了一种分析光纤 F-P 腔级联光谱特性的近似方法,并从光腔级联的角度阐述了光纤布拉格光栅机理及成栅过程。

2 光纤 F-P 腔理论分析

2.1 光纤 F-P 腔的光谱性质

根据光纤 F-P 腔在纤芯部分折射率分布的特点,可将纤芯视为由 3 层介质组成,如图 1 所示。反射系数可以由艾里方程描述^[11]

$$\rho_2 = \frac{r_1 + r_2 \exp(-j2\delta)}{1 + r_1 r_2 \exp(-j2\delta)}, \quad (1)$$

式中 ρ_2 为复数的电场反射系数, r_1 和 r_2 分别为第 1 个和第 2 个交界面处的菲涅耳反射系数, $\delta = 2kn_2d$ 相当于光通过介质 2 时的相位延迟, k 为波矢, n_2 为介质 2 的折射率, d 为介质 2 的长度。考虑到 r_1 和 r_2 通常很小,单个光纤 F-P 腔反射光谱可作为双光束近似^[1]结果处理,即相当于忽略(1)式右边分母的第 2 项。

当多个光纤 F-P 腔级联时,重复利用(1)式,可

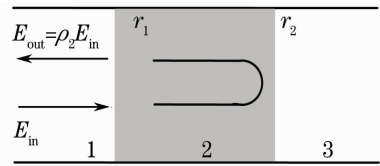


图 1 光经过 3 层介质反射示意图

Fig. 1 Reflection from three planes

以得到级联光纤 F-P 腔的反射光谱,进而分析其光谱性质。如果光纤 F-P 腔未破坏光纤结构,产生的损耗很小,那么对于等间距级联多个相同光纤 F-P 腔,其结构则具有周期性折射率分布及光栅的特征。对于腔长以及腔之间的距离在亚微米量级的光纤 F-P 腔,级联之后可视为一种阶梯形折射率分布的光纤布拉格光栅,其级联光纤 F-P 腔的光谱性质可采用 Rouard 方法分析得到^[11]。

2.2 分析光纤布拉格光栅的 Rouard 方法

光纤布拉格光栅由强度随空间变化的强紫外光照射光纤纤芯来制备,通常在光纤的纤芯区域形成周期性的折射率调制。对于折射率为阶跃型分布的单模光纤,设光纤中只传输 LP_{01} 模,光纤纵向产生的折射率变化为 $\delta n_{co}(z)$,则光纤中导模有效折射率的改变 $\delta n_{eff} \cong \Gamma \delta n_{co}$,其中 Γ 为 LP_{01} 模的纤芯集光功率因子^[7]。若纤芯折射率调制为具有 N 个周期的理想阶梯型结构,则光栅可以看作多层介质膜的叠加,采用传输矩阵法^[9]或 Rouard 方法可对其进行数值求解分析^[14]。

如图 2 所示,光纤布拉格光栅的折射率调制为正弦型,振幅为 Δn 。这样,光纤布拉格光栅的每个周期可以看成是两层均匀介质膜,即前半个周期的等效折射率为 $\Delta n\pi/4$,后半半个周期的等效折射率为 $-\Delta n\pi/4$ 。于是,对振幅为 $\Delta n\pi/4$ 阶梯型的折射率分布形式进行傅里叶级数展开,其中一阶分量是振幅为 Δn 正弦型的折射率调制,光栅的反射系数由一阶分量决定。由于高阶分量与一阶布拉格频率不匹配,因此对光栅光谱产生的影响可以忽略。经上述分析,正弦型折射率调制的光栅可以等效为阶梯型的折射率调制,界面 i 的反射系数满足公式

$$\rho_i = \frac{r_i + r_{i+1} \exp(-2j\delta_i)}{1 + r_i r_{i+1} \exp(-2j\delta_i)}, \quad (2)$$

$$\delta_i = \beta_i l_i, \quad (3)$$

式中 ρ_i 为第 i 界面处的复反射系数, r_i, r_{i+1} 分别为界面 i 和 $i+1$ 的菲涅耳反射系数, δ_i 为界面 i 和 $i+1$ 之间电场的相位延迟。 β_i 为传播常数, $l_i = \Lambda/2$ 为半周期长。

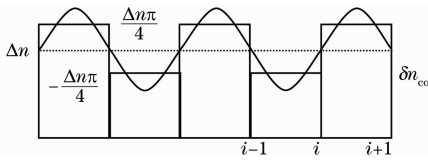


图2 光纤布拉格光栅折射率分布与等效阶梯型折射率调制示意图

Fig.2 Index modulation and schematic diagram for equivalent step index profile

重复利用(2)式,就可以得到整个光栅的反射系数。考虑到光栅的折射率变化很小,可以假设光栅中的光场传播常数不变。于是,根据相位匹配条件 $\beta = \pi/\Lambda$,利用 Rouard 方法可得到与耦合模理论相同的峰值反射系数^[11]

$$\rho = -\tanh(\kappa L), \quad (4)$$

式中 κ 为耦合系数, L 为光栅长度。为使计算过程简化,将光栅周期做双层膜结构处理。欲获得更精确的结果,可将光栅周期视为更多层膜的叠加。

2.3 利用 Rouard 方法分析光纤 F-P 腔级联性质

当光纤 F-P 腔级联时,利用 Rouard 方法可以分析级联光纤 F-P 腔的光谱性质。特别当折射率调制很小,光纤 F-P 腔界面处的反射系数很小,利

用(1)式计算光纤 F-P 腔级联光谱性质时,可以将分母中的第 2 项忽略,这样当级联光腔个数较少时不用将复数的反射系数进行迭代,而直接将分子作为干涉项进行叠加,这样可以将计算过程简化。相同的光纤 F-P 腔进行级联时,折射率分布具有周期性,如图 3 所示。

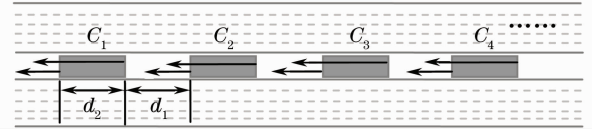


图3 光纤 F-P 腔级联示意图

Fig.3 Schematic structure of optical fiber F-P cavity cascade

在图 3 中,光纤 F-P 腔腔长为 d_2 ,两个腔之间的距离为 d_1 ,级联 N 个光腔时存在 $2N$ 界面。用 r_i 和 t_i 表示第 i 界面的菲涅耳反射系数和透射系数,则有

$$\begin{cases} r_i = -r_{i+1} = r \\ t_i = t_{i+2} \\ r_i^2 + t_i t_{i+1} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

根据(5)式和(1)式,可以得到较少光纤 F-P 腔级联反射光谱的性质。设入射电场为 E_0 , β 为传播常数,则反射电场可表示为

$$E = \{r_1 + r_2 \exp(-j2\beta d_2) + r_1 t_1^2 t_2^2 \exp[-j2\beta(d_1 + d_2)] + r_2 t_1^2 t_2^2 \exp[-j2\beta(d_1 + d_2)] \exp(-j2\beta d_2) + r_1 t_1^4 t_2^4 \exp[-j4\beta(d_1 + d_2)] + r_2 t_1^4 t_2^4 \exp[-j4\beta(d_1 + d_2)] \exp(-j2\beta d_2) + \dots + r_1 t_1^{2(N-1)} t_2^{2(N-1)} \exp[-j2(N-1)\beta(d_1 + d_2)] + r_2 t_1^{2(N-1)} t_2^{2(N-1)} \exp[-j2(N-1)\beta(d_1 + d_2)] \exp(-j2\beta d_2)\} E_0. \quad (6)$$

整理(6)式可化简为

$$E = r[1 - \exp(-j2\beta d_2)] \times \frac{1 - t_1^{2N} t_2^{2N} \exp\{-j[2N\beta(d_1 + d_2)]\}}{1 - t_1^2 t_2^2 \exp\{-j[2\beta(d_1 + d_2)]\}} E_0. \quad (7)$$

由(7)式得到反射率为

$$R = 2r^2(1 - \cos 2\beta d_2) \times \frac{1 + t_1^{4N} t_2^{4N} - 2t_1^{4N} t_2^{4N} \cos 2N\beta(d_1 + d_2)}{1 + t_1^4 t_2^4 - 2t_1^2 t_2^2 \cos 2\beta(d_1 + d_2)}. \quad (8)$$

由(8)式可知,当 $2\beta d_2 = \pi$ 即光腔的光学长度为 $\lambda/4$ 时,由光纤 F-P 腔级联成栅的效果最为显著,即成栅效率达到最佳值。这表明,对于相同光栅周期数和折射率调制深度,此种情况光栅具有更高的反射率。同样,根据光纤布拉格光栅相位匹配条件^[5]

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (9)$$

式中 λ 为谐振峰的中心波长, n_{eff} 为纤芯基模的有效折射率, $\Lambda = d_1 + d_2$ 为光栅周期,可由谐振峰位置定出光腔腔长和腔的间距。

3 光纤 F-P 腔级联光谱性质

Rouard 方法适用于一般情况下的光纤 F-P 腔级联反射谱模拟分析。当级联光腔个数在 800 以内时,(8)式作为级联少数光腔反射谱表达式,其计算得到的结果与采用 Rouard 方法得到的结果一致;而当光腔级联个数大于 800 时,其反射谱的模拟分析则需采用 Rouard 方法进行。

假设光纤中基模的有效折射率 n_{eff} 和纤芯的折射率近似相等,即可通过 Sellmeier 公式^[15] 计算基模传播常数,并通过关系式 $\beta = n_{\text{eff}}k$ 进行光栅的光谱分析。将 β 代入到(8)式中,计算得到了如图 4~6 所示的光谱图,其中考虑了光纤基质材料色散的影响。当级联光腔个数超过 100 时,光谱有意义的范围很快缩小到 100 nm 以下,对这种情况下的光栅光谱分析,忽略了光纤基质材料的色散影响。

3.1 单光腔双光束干涉模拟反射谱

单个光纤 F-P 腔的反射光谱为双光束干涉,模拟

光谱如图 4 所示。模拟参数如下:纤芯看作纯二氧化硅基质,通过 Sellmeier 公式计算在 1550 nm 纤芯的折射率 $n_{co}=1.4440$,调制后有效折射率 $n_{eff}=1.4445$;光腔腔长及相邻腔间距均为 269 nm。由图 4 分析可知,因光纤 F-P 腔的腔长很小,故其自由光谱范围很宽。在双光束干涉过程中,两个界面反射产生的光程差与波长并不是线性的关系,故模拟得到的光谱并不具有周期性,此时的光腔反射率很低,约为 10^{-7} 量级。

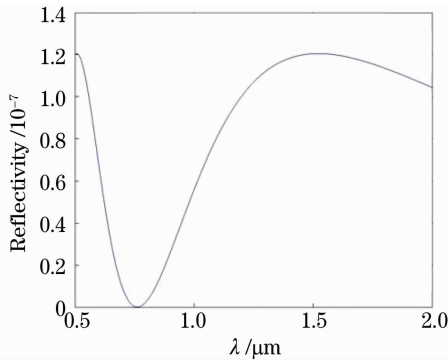


图 4 单光纤 F-P 光腔双光束干涉反射谱

Fig. 4 Reflection of two-beam optical interference of the single fiber F-P cavity

3.2 多光腔级联多光束干涉模拟反射谱

采用和 3.1 节相同的参数模拟了多个光腔级联的光谱。分析表明,光腔的反射光谱会随着光腔级联个数 N 的增加而逐渐变化。5 个光腔级联的反射光谱模拟图如图 5 所示。从图 5 中可见,尽管 N 很小,但级联的光纤 F-P 腔已经显现出某种光栅效应,即在 1550 nm 附近出现最大值,而其他位置则出现一些反射率差别很大的极大值。进一步分析可知,这些次极大值随着级联光腔个数的增加将会被削弱。

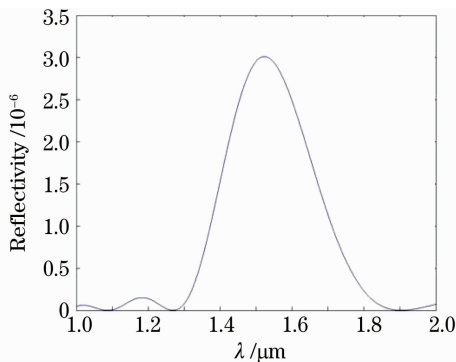


图 5 $N=5$ 时光腔的级联反射谱

Fig. 5 Reflection of the cascade of cavity when $N=5$

图 6 为 50 个光腔级联的反射光谱模拟图。深入分析可知,光栅效应是光腔级联集体效应的体现,不同波长的光在多个光腔里传播时,经界面反射相位延迟是不同的。由于有相位匹配条件的存在,有

些波段的光总能因干涉得到加强,有些则不能。在远离相位匹配条件的波段,反射光的强度基本消失,即在图 5 中出现过的一些次极大已被削弱趋近于零。此时对比可以看出谐振峰带宽变窄,这一特征与光纤布拉格光栅的性质相符。因此,可以认为此时已经产生了光纤布拉格光栅,其谐振峰的位置由有效折射率 n_{eff} 和光栅的周期 Λ 决定。需要指出的是,此时光栅的谐振峰带宽很宽,反射率亦很低,这是由于级联光纤 F-P 腔个数很少造成的。

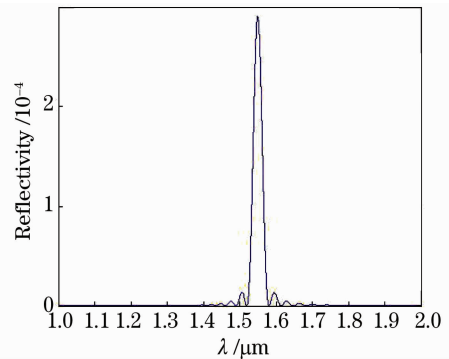


图 6 $N=50$ 时光腔的级联模拟反射谱

Fig. 6 Reflection of the cascade of cavity when $N=50$

图 7 为光腔个数 $N=200$ 时光腔级联的反射谱,这时 1550 nm 附近的峰值为 4.8×10^{-3} ,谐振峰带宽已达到 10 nm 左右。

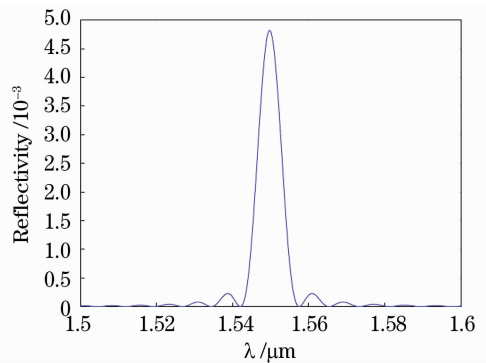
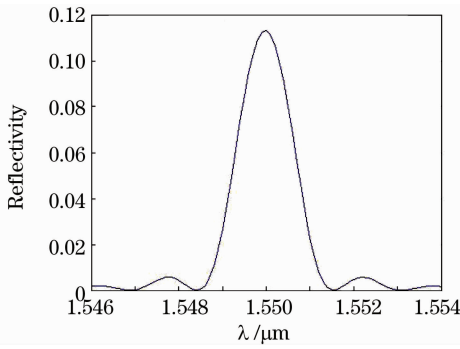
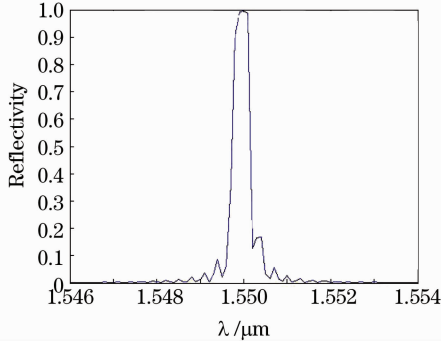


图 7 $N=200$ 时光腔的级联模拟反射谱

Fig. 7 Reflection of the cascaded cavity when $N=200$

随着级联光腔个数的继续增加,光栅峰值的反射率持续增大,谐振峰带宽则逐渐变窄。对于光腔级联个数较多的情况,(1)式中分母最后一项不能忽略,(8)式不再成立。对此,改用 Rouard 方法对光腔级联反射谱进行模拟分析。图 8 为 $N=1000$ 时的反射模拟谱,其反射率约为 0.115,谐振峰带宽降到 1.5 nm 左右。当级联光腔个数为 10000 时,其谐振峰的峰值已经接近 1,谐振峰带宽下降到 1 nm 以下,此时级联的光腔已经完全变成光纤布拉格光栅,如图 9 所示。

图 8 $N=1000$ 时光腔的级联模拟反射谱Fig. 8 Reflection of the cascaded cavity when $N=1000$ 图 9 $N=10000$ 时光腔的级联模拟反射谱Fig. 9 Reflection of the cascaded cavity when $N=10000$

4 结 论

由分析可知, 光纤布拉格光栅从结构上可看作光纤 F-P 腔级联。本文采用 Rouard 方法, 对腔长很短的光纤 F-P 腔级联光谱特性进行了模拟分析。从 F-P 腔的角度分析了布拉格光栅特性, 这种分析方法的特点是使布拉格光栅特性的物理图像更明显。在光纤 F-P 腔双光束近似理论的基础上, 推导出光腔级联反射光强的表达式; 定量分析了级联光腔个数不同时反射谱的特性。从光腔级联的角度, 阐述了光纤布拉格光栅机理及其成栅过程。利用光腔级联模型, 可解释光纤布拉格光栅窄带性质的成因。通过对光腔级联反射谱的模拟研究, 得到如下结论:

1) 对于相同光纤微 F-P 光腔的级联, 满足一定的相位匹配条件可产生光栅效应; 光纤光栅可视为光纤 F-P 腔的级联;

2) 光栅效应的出现是一个渐变过程, 即随着光纤微 F-P 光腔级联个数的增加, 当反射谱在较大波段位置出现反射光强极小时, 则会出现光栅效应。此时, 其谐振峰的峰值反射率将随着级联光腔个数的增加而增加, 谐振峰的带宽亦随着级联光腔个数的增加而变窄;

3) 由于光纤 F-P 腔每个端面反射率非常低, 其反射光很弱, 导致大部分能量透过光腔。而透过的光在相邻光腔的每个端面反射, 这使得相邻两个端面反射光的电场振幅差异变得很小, 该差异主要来自相位之间的差别。并且, 这样的反射光进行多光束干涉, 会产生非常细锐的条纹。

参 考 文 献

- 1 Tao Wei, Yukun Han, Hailong Tsai *et al.*. Miniaturized fiber inline Fabry-Pérot interferometer fabricated with a femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6): 536~538
- 2 Z. L. Ran, Y. J. Rao, W. J. Liu *et al.*. Laser-micromachined Fabry-Pérot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2252~2263
- 3 Wang Wei, Rao Yunjiang, Tang Qingtao *et al.*. Micromachining of an in-fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor by using a femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1660~1664
王 维, 饶云江, 唐庆涛等. 飞秒激光加工的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1660~1664
- 4 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 5 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258
邓洪有, 饶云江, 冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258
- 6 Zhang Qi, Zhang Weigang, Zhang Jian *et al.*. Micro-cavity fabricated by femtosecond lasers and its application in fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 713~717
张 琦, 张伟刚, 张 健等. 飞秒激光蚀刻微腔及其在光纤环荡腔中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 713~717
- 7 Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 8 Makoto Yamada, Kyohei Sakuda. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(16): 3474~3478
- 9 Miguel A. Muriel, Alejandro Carballar, Jose Azana. Field distributions inside fiber gratings[J]. *Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 548~558
- 10 Gary A. Miller, Charles G. Askins, E. Joseph Friebele. Modified F-matrix calculation of Bragg grating spectra and its use with a novel nonlinear index growth law[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(6): 2416~2417
- 11 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
- 12 Christopher W. Smelser, Stephen J. Mihailov, Dan Grobnic. Rouard's method modeling of type I-IR fiber Bragg gratings made using an ultrafast IR laser and a phase mask[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(10): 2011~2017
- 13 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. New York: Pergamon, 1980. 51~70, 323~367
- 14 Zihua Wang, Gangding Peng, Pak L. Chu. Improved Rouard's method for fiber and waveguide gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**: 245~250
- 15 James W. Fleming. Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(24): 4486~4493