

doi:10.3788/gzxb20144309.0906007

双波长相移光纤光栅的光谱特性及传感应用

朱翔¹, 杨远洪^{1,2}

(1 北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

(2 北京航空航天大学 惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要:建立了双波长相移光纤光栅的理论模型,对双波长相移光纤光栅的透射谱特性进行了数值仿真,结果表明透射波长间隔会分别随相移量、折射率调制深度和光栅长度的变化而有规律地增减.借助光纤布拉格光栅的法布里-珀罗腔谐振相位条件计算了透射峰间隔的表达式,该表达式得到的透射峰间距曲线与数值仿真得到的曲线相符合,验证了数值仿真结果的正确性.最后,在光栅透射谱波长间隔变化规律的基础上提出一种传感方案,并对光栅的温度传感特性进行分析,理论推导得到灵敏度约为 60 pm/°C.

关键词:光纤布拉格光栅;相移;透射峰间距;光纤传感器件;法布里-珀罗;激光器

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0906007-5

Spectrum of Dual-wavelength Phase Shift FBG and Its Application in Fiber Sensing

ZHU Xiang¹, YANG Yuan-hong^{1,2}

(1 Key Laboratory on Precision Opto-mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191)

(2 National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: The theoretical model of a dual wavelength phase-shifted fiber Bragg grating was established and its spectral characteristics were obtained by numerical simulations, which pointed that the transmission peaks spacing was affected by the amount of phase shift, refractive index modulation and grating length. The expression of transmission peaks spacing was acquired by resonance phase conditions of fiber bragg grating Fabry-Perot cavity, and the curves obtained by numerical simulation method accord well with the curves obtained by analytic formula, proves the correctness of the numerical simulation results. Finally, a sensing method based on transmission peaks spacing of a dual wavelength phase-shifted fiber Bragg grating was proposed, the temperature sensing characteristics were analyzed, and the theoretical sensitivity was about 60 pm/°C.

Key words: Fiber Bragg gratings; Phase shift; Transmission peaks interval; Fiber optics sensors; Fabry-Perot; Lasers

OCIS Codes: 060.3735; 050.5080; 060.2370; 050.2230; 140.3500

0 引言

光纤激光器在波分复用^[1]、水听器^[2-4]、磁力计^[5]、雷达系统^[6]和太赫兹波产生^[7]等领域有广泛应用,近年来受到越来越多的关注.

为了实现双波长乃至多波长的激励,需要解决增益介质(如掺铒光纤)中谱线均匀加宽的问题.1996年, Jong Chow等^[1]将光纤冷却到77 K,抑制了增益谱线的均匀展宽并实现了多波长激光输出,效果较好,但仅限于实验室环境使用.2000年左右研究的主要思路

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ04081504)和创新团队发展计划(No. IRT1203)资助

第一作者:朱翔(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email: zhuxiangforever@126.com

导师(通讯作者):杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为光纤传感技术及激光技术. Email: yhyang@buaa.edu.cn

收稿日期:2013-12-26;录用日期:2014-04-10

<http://www.photon.ac.cn>

是使用多段增益介质形成独立的谐振腔,然后将这些谐振腔并联^[8]或者串联^[9]起来就可以实现多波长输出,这类方案可以在常温下实施,但是器件组合复杂,成本较高,耦合损耗较大,限制了其实际应用.2006年以来,随着相移光纤光栅制作技术的日趋成熟,使用单段增益介质实现多波长激光输出成为研究热点,其在减小耦合损耗、简化结构和提高谐振腔效率方面的优点也逐渐显现.Dai^[10]等采用等效相移法在光纤光栅上对称地引入两个相移,得到了双波长相移光纤光栅(Dual Wavelength Phase-shifted Fiber Bragg Grating, DW-PSFBG),并实现了双波长激光输出.文献[11]和[12]分别使用外加悬臂梁法和PZT调制法实现了对DW-PSFBG透射峰间隔的调谐.这些研究仅对实验结果进行了报道,并未对DW-PSFBG透射峰间隔调谐特性进行理论分析,也未对DW-PSFBG在传感方面的应用进行探索.

本文利用传输矩阵法和耦合模理论建立了DW-PSFBG的理论模型,并对其透射波长间隔的调谐特性进行了仿真研究,由此提出一种基于DW-PSFBG的传感方案,利用其透射波长间隔和被测物理量的关系来实现传感.

1 DW-PSFBG 的理论模型

如图1,在栅区长度为 L 的均匀光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)上的A、B处分别引入相移 φ_1 和 φ_2 ,形成DW-PSFBG.它可以等效为由3段长度分别为 L_1, L_2 和 L_3 的均匀FBG和两段长度分别为 L_{s1} 和 L_{s2} 的相移区组成.利用传输矩阵法和耦合模理论^[13]对

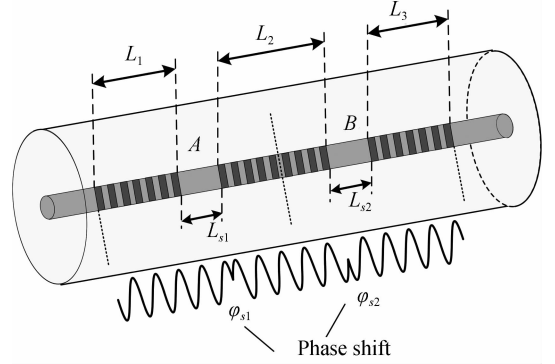


图1 DW-PSFBG 的结构

Fig. 1 Schematic diagram of DW-PSFBG

DW-PSFBG建模,将长度为 L_1 的均匀FBG等分为 N 段,每段长度为 Δz ,则第 i 段的传输矩阵为

$$T_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\Delta z) - i\frac{\hat{\sigma}}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) & -i\frac{\kappa}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) \\ i\frac{\kappa}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) & \cosh(\gamma\Delta z) + i\frac{\hat{\sigma}}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\hat{\sigma} = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B)$ 为耦合系数的直流分量, λ_B 为布拉格波长; $\kappa = \pi/\lambda\Delta n$ 为耦合系数的交流分量; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Δn 是折射率调制深度, $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}$.长度为 L_1 的均匀光栅的传输矩阵为

$$T_{L_1} = T_N \cdot T_{N-1} \cdot \dots \cdot T_i \cdot \dots \cdot T_1 \quad (2)$$

同理可得其余两段均匀光栅的传输矩阵,分别为记为 T_{L_2} 和 T_{L_3} .

相移区的传输矩阵可表示为

$$\bar{T}_{s1,2} = \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi_{s1,2}) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_{s1,2}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,脚注1,2分别对应两段相移区.

因此DW-PSFBG的传输矩阵为

$$T = T_{L_1} \cdot \bar{T}_{s1} \cdot T_{L_2} \cdot \bar{T}_{s2} \cdot T_{L_3} \quad (4)$$

2 DW-PSFBG 透射特性仿真研究

由式(1)~(4)可知,DW-PSFBG的透射特性主要受到 $\varphi, \Delta n, L$ 以及相移点位置的影响.设纤芯折射率为1.46,未引入相移时FBG的布拉格波长为1550 nm,在MATLAB软件环境中对上述各个因素对DW-PSFBG透射特性的影响进行仿真研究.

2.1 相移量对 DW-PSFBG 透射特性的影响

设 Δn 为 1.5×10^{-4} , L 为3 cm,相移点位置分别在 $L/3$ 和 $2L/3$ 处,初始相移为 $\varphi_{s1} = \varphi_{s2} = \varphi = \pi$.将相移变化量 $\Delta\varphi$ 以 0.1π 的步长从0增加到 0.5π ,仿真获得相移量不同时,DW-PSFBG的透射谱如图2.

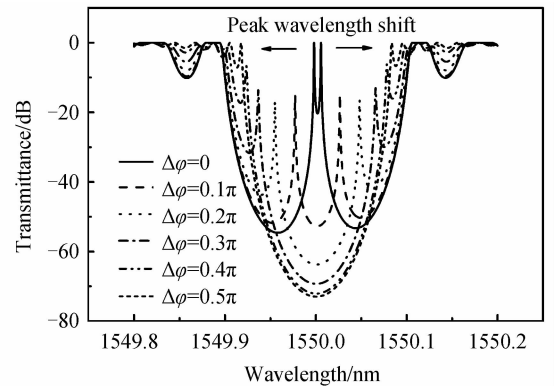


图2 相移量变化时 DW-PSFBG 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of DW-PSFBG with different phase shifts

提取 $\Delta\varphi$ 不同时透射波长间隔的变化规律,结果如图3.透射波长间隔随 $\Delta\varphi$ 的增加而增加,因此调节相移量可以实现DW-PSFBG透射波长间隔的调谐.

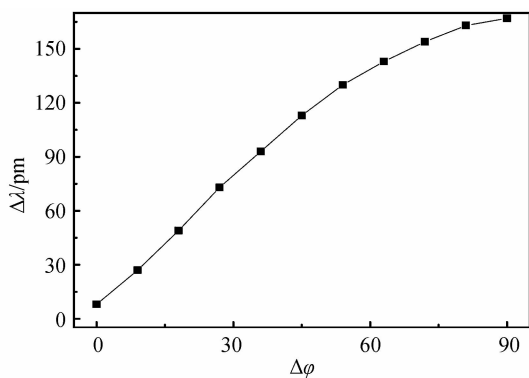


图3 $\Delta\lambda$ 随 $\Delta\varphi$ 的变化
Fig. 3 Variation of $\Delta\lambda$ with $\Delta\varphi$

2.2 Δn 对 DW-PSFBG 透射特性的影响

保持 φ, L 和相移点位置不变,将 Δn 以 2×10^{-5} 的步长从 1×10^{-4} 变化到 2×10^{-4} , 获得 Δn 不同时 DW-PSFBG 的透射谱如图 4.

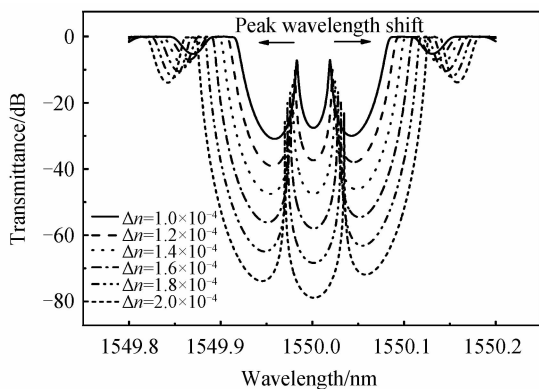


图4 Δn 变化时的 DW-PSFBG 的透射谱
Fig. 4 Transmission spectra of DW-PSFBG with different Δn

提取不同 Δn 时的透射波长间隔,结果如图 5.透射波长间隔随着 Δn 的增加而增加,因此调节 Δn 也可以实现 DW-PSFBG 透射波长间隔的调谐.

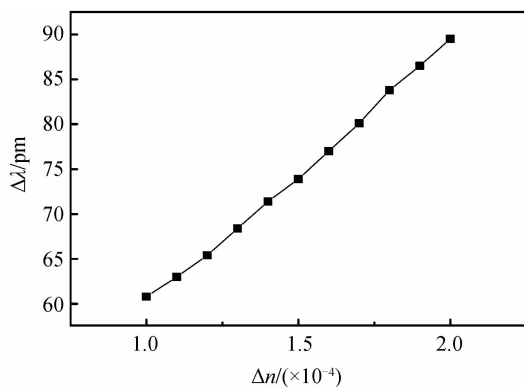


图5 $\Delta\lambda$ 随 Δn 的变化
Fig. 5 Variation of $\Delta\lambda$ with Δn

2.3 DW-PSFBG 透射特性的影响

保持 $\varphi, \Delta n$ 和相移点位置不变,逐渐增加 L , 仿真获得的 Δn 不同时 DW-PSFBG 透射谱如图 6. 提取不

同 L 时的透射波长间隔,结果如图 7. 随着 L 的增加,透射峰间隔逐渐减小并趋于稳定.

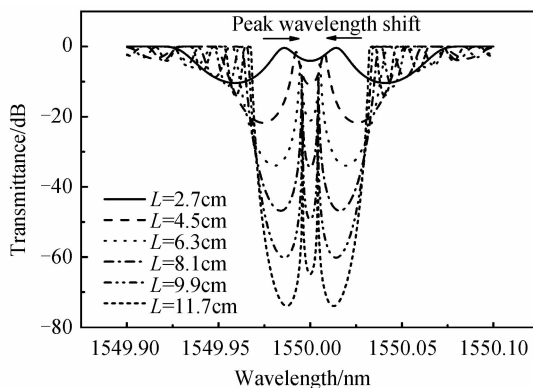


图6 L 变化时的 DW-PSFBG 透射谱
Fig. 6 Transmission spectra of DW-PSFBG with different L

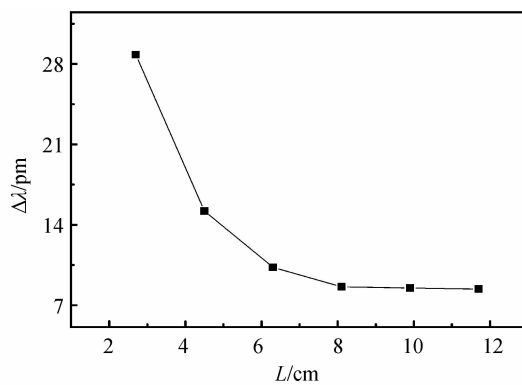


图7 $\Delta\lambda$ 随 L 的变化
Fig. 7 Variation of $\Delta\lambda$ with L

2.4 相移点位置对 DW-PSFBG 透射特性的影响

保持其它参量不变,将两个相移点位置分别从 $L/3$ 和 $2L/3$ 变化到 $L/6$ 和 $L/6$, 仿真获得相移点位置不同时 DW-PSFBG 的透射谱如图 8. DW-PSFBG 的透射峰间距不变,但透射深度明显减小.

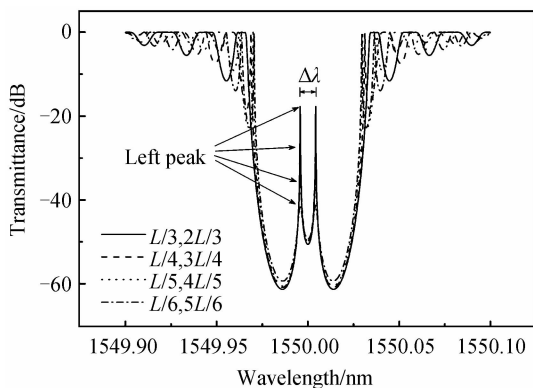


图8 不同相移位置的相移光栅透射谱的变化
Fig. 8 Transmission spectra of DW-PSFBG with different phase shift locations

2.5 DW-PSFBG 的简化模型求解析表达式

如图 9, DW-PSFBG 可以近似成两段单相移光栅构成的谐振腔的串联,其相位满足^[14]

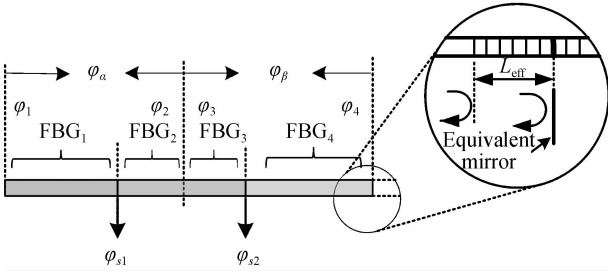


图9 DW-PSFBG的简化模型

Fig. 9 Simplified schematic diagram of DW-PSFBG

$$\varphi_\alpha + \varphi_\beta = 2m\pi, (m = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

且 $\varphi_\alpha = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_{s1}$, $\varphi_\beta = \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_{s2}$, $\varphi_1 \sim \varphi_4$ 分别为 $\text{FBG}_1 \sim \text{FBG}_4$ 的反射系数相位因子, 相移量可表示为^[15]

$$\varphi = 2\beta L_s = \frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L_s \quad (6)$$

式中传输常量 $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$, L_s 为相移区长度, 在计算时可估 L_s 为 $L/10$. DW-PSFBG 的透射峰间距可表示为^[15]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4n_{\text{eff}}(L_s/2 + L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}})} \quad (7)$$

式中 L_{eff1} 和 L_{eff2} 分别是图9中等效 F-P 腔左、右反射面的有效长度, 可表示为^[16]

$$L_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{2\pi\Delta n} \tanh\left(\frac{\pi\Delta n L}{\lambda}\right) \quad (8)$$

得到变量 Δn 和变量 L 与 $\Delta\lambda$ 之间的关系分别如图10和图11中曲线所示. 可见用解析方案求得的

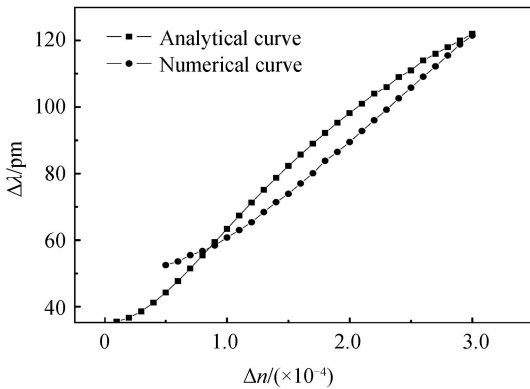


图10 $\Delta\lambda$ 随着折射率调制深度的变化

Fig. 10 $\Delta\lambda$ of DW-PSFBG with different Δn

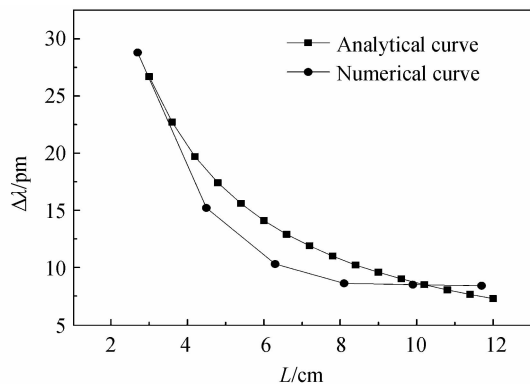


图11 $\Delta\lambda$ 随着 DW-PSFBG 长度的变化

Fig. 11 $\Delta\lambda$ of DW-PSFBG with different L

DW-PSFBG 透射峰间距的表达式和数值法求得的结果基本相符, 验证了数值仿真结果的正确性.

3 基于 DW-PSFBG 的传感方案

3.1 基于 DW-PSFBG 的传感方案

提出一种基于 DW-PSFBG 的传感方案, 其结构如图12. 可调谐激光器 (Tunable Laser, TL) 输出的波长扫描激光, 经过 DW-PSFBG 后被光电探测器 (Photo Detector, PD) 接收, 通过在一定范围内调节扫描激光器的波长, 就可以重构出 DW-PSFBG 的透射谱. 当外界环境变化时, DW-PSFBG 透射谱双波间隔发生变化, 通过提取波长间隔就可以获得被测量的信息.

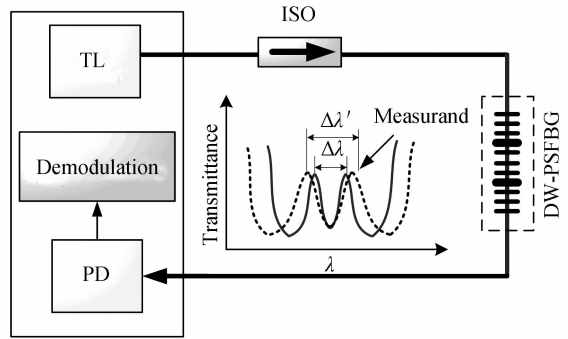


图12 基于 DW-PSFBG 的传感方案结构

Fig. 12 Schematic diagram of DW-PSFBG based sensor

3.2 DW-PSFBG 的温度传感特性

由式(6)可知, L_s 确定时, φ 主要受 n_{eff} 的影响. 当温度变化时, n_{eff} 会发生变化, 进而引起 φ 的变化. 对式(6)求导可得到 φ 的温度灵敏度为

$$C_{\varphi, T} = \frac{d\varphi}{dT} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \xi_s L_s \quad (9)$$

式中 $\xi_s = dn_{\text{eff}}/dT$ 为光纤的热光系数. 根据图3可以得到如图13所示的 $\Delta\lambda$ 随着 ΔT 变化曲线, 灵敏度约为 $60 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

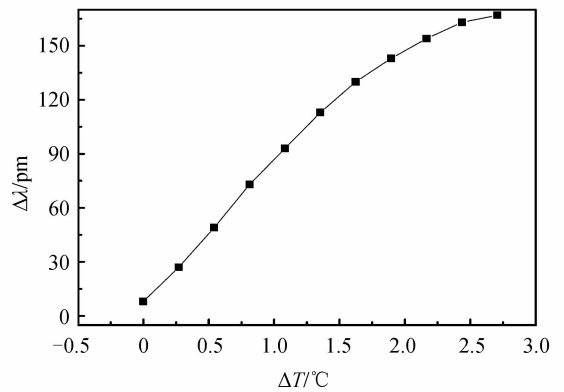


图13 $\Delta\lambda$ 随着 ΔT 的变化

Fig. 13 $\Delta\lambda$ of different ΔT

4 结论

本文建立了 DW-PSFBG 的理论模型, 通过数值仿

真研究了 DW-PSFBG 的透射波长间隔随相移量、折射率调制深度和光栅长度的变化规律,并通过解析方法验证了规律的正确性.依据 DW-PSFBG 的调谐特性,提出了一种基于 DW-PSFBG 的传感方案,并对双波长相移光栅的温度传感特性进行了初步分析,得到其灵敏度为 60 pm/°C.

参考文献

- [1] JONG C, GRAHAM T, BEN E, *et al.* Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, **8**(1): 60-62.
- [2] CHEN Yi, ZHANG Jun, JIN Xiao-fei, *et al.* A calibration technique of sensitivity of fiber grating hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1059-1064.
陈毅,张军,金晓枫,等.一种光纤光栅水听器灵敏度校准技术研究[J].光子学报,2012, **41**(9): 1059-1064.
- [3] CHEN Yi, ZHANG Jun, JIN Xiao-fei, *et al.* Calibration of phase-shifted sensitivity of fiber grating hydrophone in the frequency range 20 Hz to 10 kHz[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1686-1691.
陈毅,张军,张敏,等.20 Hz~10 kHz 光纤水听器相移灵敏度校准[J].光子学报,2011, **40**(11): 1686-1691.
- [4] JIANG Qi, SUI Qing-mei, XU Yu-chao, *et al.* Experiment and design of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2795-2799.
蒋奇,隋青美,徐于超,等.分布反馈光纤激光器水听器设计与实验[J].光子学报,2009, **38**(11): 2795-2799.
- [5] CRANCH G A, FLOCKHART G M H, KIRKENDALL C K. Optically powered dfb fiber laser magnetometer [C]. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2008, 7004: 415-415.
- [6] LOIC M, NGOC D L, DANIEL D, *et al.* Building blocks for a two-frequency laser lidar - radar; a preliminary study[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5702-5712.
- [7] MIN Y J, NAMJE K, JAEHEON S, *et al.* Widely tunable dual-wavelength Er³⁺-doped fiber laser for tunable continuous-wave terahertz radiation[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12291-12297.
- [8] MORTEN I, SHAI-UL A, Michalis N Z, *et al.* 8- and 16-channel all-fiber DFB laser WDM transmitters with integrated pump redundancy[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(9): 1114-1116.
- [9] MAO Qing-he, JOHN W Y L. Multi-wavelength erbium-doped fiber lasers with active overlapping linear cavities[J]. *Journal Of Lightwave Technology*, 2002, **41**(2): 160-169.
- [10] DAI Yi-tang, CHEN Xiang-fei, SUN Jie, *et al.* Dual-wavelength DFB fiber laser based on a chirped structure and the equivalent phase shift method [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(18): 1964-1966.
- [11] MENG Jiang, BO Lin, PERRY P S, *et al.* Tunable microwave generation based on a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser using a phase-shifted grating on a triangular cantilever[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(13): 1900-1904.
- [12] GUILLERMO E V. Dual-wavelength DFB erbium-doped fiber laser with tunable wavelength spacing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(4): 254-256.
- [13] YAMADA M, SAKUDA K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(16): 3474-3478.
- [14] REN Wen-hua, WANG Yan-hua, FENG Su-chun, *et al.* Study on the interval between longitudinal modes of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **12**(57): 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, **12**(57): 7758-7764.
- [15] 饶云江. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [16] YURI O B. Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(14): 6394-6399.