

应变、温度对 $\lambda/4$ 相移光栅反射光谱特性的影响*

姜德生 廖胜辉 周次明 余海湖

(武汉理工大学光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

摘要 利用矩阵法和编程计算, 对 $\lambda/4$ 相移光栅在外界应变或温度的影响下, 其反射光谱特性进行研究, 得出一些规律性的结论. 这些理论结果将对相移光栅在传感中的应用及其制作有参考作用.

关键词 矩阵法; 光谱特性; 相移光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

相移光栅在滤波、波分复用、单频光纤激光器以及铒光纤增益平坦等领域得到了广泛的应用^[1]. 英国的 Granfield 大学光电子光学中心, 将相移光栅用于光纤激光器中, 根据其能量变化来探测声波, 但没有解释其原理^[2]. 相移光栅的反射光谱是相移光栅的一个很重要的特性. 国内对相移光栅在无外界影响下的反射光谱研究较多, 但在外界应变或温度影响下其反射光谱的特性进行理论上的研究还比较少. 本文利用基本的矩阵方法和编程计算, 对 $\lambda/4$ 相移光栅在外界应变或温度的影响下, 其反射光谱特性进行研究, 可知相移光栅的反射光谱透射窗口峰值的反射率和波长分别对应应变或温度的改变有很好的线性关系以及高的灵敏度, 表明相移光栅可用于检测应变或温度的改变; 同时这些理论结果对相移光栅的制作有指导性作用. 反射光谱透射窗口峰值的反射率的特性初步的解释 Granfield 大学用相移光栅检测声波的实验.

1 理论分析

利用传输矩阵法来推导相移光栅反射光谱的一些特性. 考虑相移大小为 φ 的相移区将长度为 L 的光栅分为两个子区, 光通过一子区的传输遵循以下矩阵

$$\begin{pmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{pmatrix} \quad (1)$$

A, B 分别表示前向与后向传输模式的振幅, S 矩阵的矩阵元可由耦合模理论得出^[3], 即

$$S_{11} = [\exp(iqh) - r^2 \exp(-iqh)] / (1 - r^2) \quad (2)$$

$$S_{12} = -r[\exp(iqh) - \exp(-iqh)] / (1 - r^2) \quad (3)$$

$$S_{21} = r[\exp(iqh) - \exp(-iqh)] / (1 - r^2) \quad (4)$$

$$S_{22} = [\exp(-iqh) - r^2 \exp(iqh)] / (1 - r^2) \quad (5)$$

式中 h 为子区的长度, $q = \pm i[\kappa^2 - (\delta\beta)^2]^{1/2}$, $r = (q - \delta\beta) / \kappa$, $\kappa_1 = \pi\delta n / \lambda_B$ 为光栅的耦合系数, $\delta\beta = 2\pi(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$ 为布拉格波长的失调量, δn 折射率调制深度. 由式(1)可得反射率 R .

$$R = \left| \frac{B_{in}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (6)$$

光通过相移区的传输特征可通过式(1)乘以相移矩阵 $\begin{pmatrix} \exp(i\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi) \end{pmatrix}$ 来表示. 所以光依次通过长度为 $h_1 = cL$ 的子区 1, 长度为 L_φ 相移区和长度为 $h_2 = L - h_1 - L_\varphi \approx (1 - c)L$ 子区 2 的传输为^[1]

$$\begin{pmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}^{(2)} & S_{12}^{(2)} \\ S_{21}^{(2)} & S_{22}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(i\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{11}^{(1)} & S_{12}^{(1)} \\ S_{21}^{(1)} & S_{22}^{(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 $S^{(1)}, S^{(2)}$ 分别表示子区 1 和子区 2 的矩阵元. 将式(2)、(3)、(4)、(5)代入(7)计算, 再将计算结果代入式(6)整理得到反射率 R .

$$R = \left| \frac{\exp(-i\varphi) \times (-\exp(-i(1-c)Lq) + \exp(i(1-c)Lq)(\exp(-icLq) - \exp(icLq)r^2)) + \exp(i\varphi)r(-\exp(-icLq) + \exp(icLq))(\exp(i(1-c)Lq) - r^2 \exp(-i(1-c)Lq))}{-r^2 \exp(i\varphi)(-\exp(-icLq) + \exp(icLq))(\exp(-i(1-c)Lq) + \exp(i(1-c)Lq)) + \exp(-i\varphi)(\exp(-icLq) - r^2 \exp(icLq))(\exp(-i(1-c)Lq) - r^2 \exp(i(1-c)Lq))} \right|^2$$

式中 c 为相移位置, 即相移点到光栅左端的长度与整个光栅的长度的比例. 相移光栅基本结构如图 1.

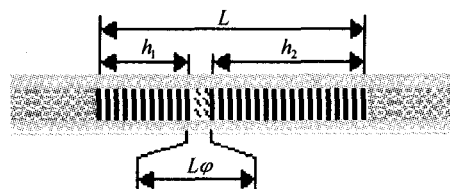


图 1 相移光栅结构
Fig. 1 The sketch of phase-shifted grating

*国家自然科学基金(50179029)和 863 项目(2002AA313140)资助
Tel: 027-87651850-8104 Email: liaoshenghui1011@tom.com
收稿日期: 2004-07-26

2 数值计算

考虑相移 φ 为 $\lambda/4$ 通过二次曝光法制作的相移光栅,其参数为:光纤纤芯的有效折射率 $n=1.46$;光栅的初始长度 $L_0=2\text{ cm}$;光栅的初始周期 Λ_0 ,中心波长选为 1550 nm ,根据式 $\lambda_B=2n\Lambda$ ^[4],可得 $\Lambda_0=531\text{ nm}$;相移光栅纤芯第一次曝光折射率改变量为 $\delta n_1=2\times 10^{-4}$;第二次曝光折射率改变量即折射率调制深度为 δn_2 ,根据式 $\kappa=\pi\delta n_2/\lambda_B$,而一般 $\kappa L=4$,可得 $\delta n_2=10^{-4}$;相移区初始长度为 $L\varphi_0$,根据 $\varphi=2\pi\delta n_2 L\varphi/\Lambda(n+\delta n_1)$ ^[5],可得 $L\varphi_0=1.9631\times 10^6\text{ nm}$.

2.1 应变对相移光栅的反射光谱特性的影响

对于应变 ϵ ,由光弹效应引起的折射率改变为

$\Delta n=-P_e n$,对于掺锗石英光纤 $P_e=0.22$ ^[6];假设光纤均匀伸长,则光栅长度为 $L=L_0(1+\epsilon)$;光栅周期为 $\Lambda=\Lambda_0(1+\epsilon)$;相移区长度为 $L\varphi=L\varphi_0(1+\epsilon)$;布拉格反射波长为 $\lambda_B=2(n+\Delta n)\Lambda$;相移量为 $\varphi=2\pi\delta n_2 L\varphi/\Lambda(n+\Delta n+\delta n_1)$.将初始值 $n, L_0, \Lambda_0, \delta n_1, \delta n_2, L\varphi_0$ 以及受到应变后各参量 $\Delta n, L, \Lambda, L\varphi, \lambda_B, \varphi$ 代入式(7)进行编程计算.相移位置不同,即 c 值不同时,对式(7)编程做图,如图 2.其中图(a)、(b)、(c)、(d)对应的 c 值分别为 $0.3, 0.4, 0.5, 0.6$,每副图中的四条曲线从左到右对应的应变 ϵ 分别为 $0, 10\ \mu\epsilon, 30\ \mu\epsilon$ 和 $50\ \mu\epsilon$.从图中可看出:对于同一 c 值,反射谱的透射窗口峰值的波长和反射率随应变的改变而改变.对于不同的 c 值,在同一应变下,反射率

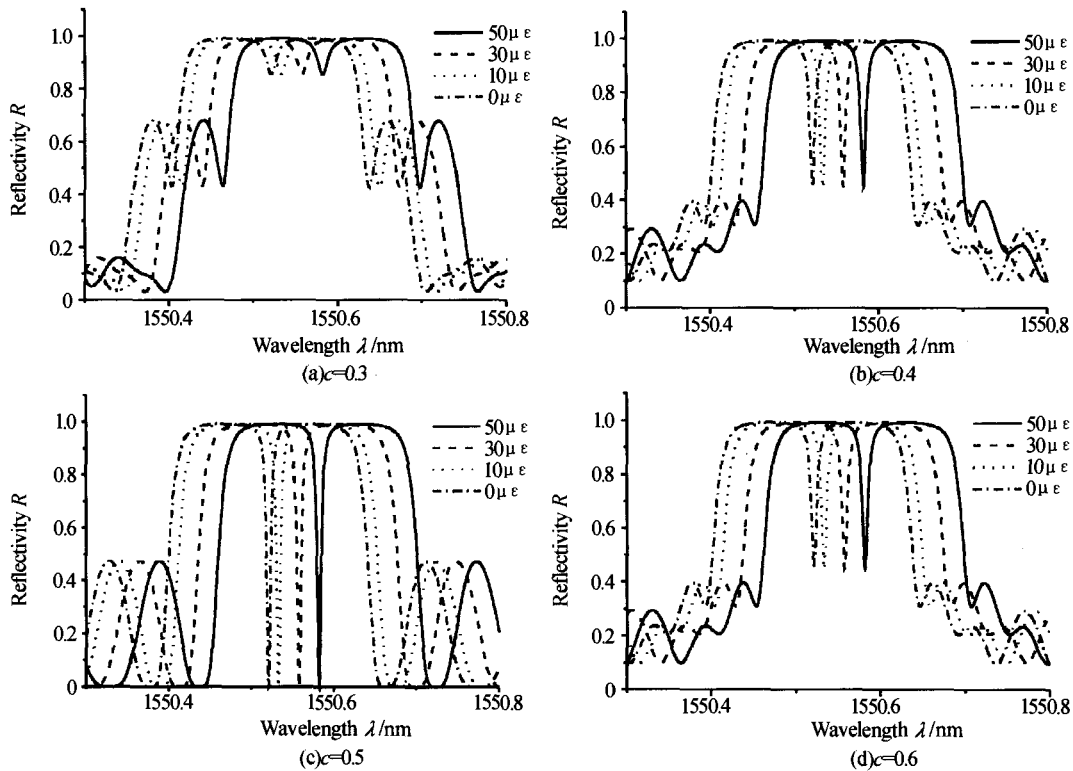


图 2 相移位置不同应变改变时相移光栅的反射光谱
Fig. 2 Reflective spectra of phase-shifted grating with different strain at different phase-shifted position

是不同的.

通过编程计算,求出 c 为某一值时,不同应变的反射光谱透射窗口峰值的波长和反射率,可得到波长和应变,反射率和应变的关系.其中 $c=0.4$ 时,其关系如图 3.从图中可以看出:波长和应变,反射率和应变都有很好的线性关系.这表明相移光栅可用于传感,根据波长或反射率的变化来检测外界应变.尤其是根据反射率的变化来传感.

c 值不同时,反射率对应变的灵敏度 $(\Delta R/\Delta \epsilon)$ 不同, $\Delta R/\Delta \epsilon$ 关于 $c=0.5$ 对称, $c=0.38$ 时最大, $c=0.5$ 时最小,如图 4 中虚线所示;波长对应变的灵敏度 $(\Delta \lambda/\Delta \epsilon)$ 基本不变,为 $1.21\text{ pm}/\mu\epsilon$,如图 4 中实线所示.灵敏度是传感的一个很重要的参数,灵敏

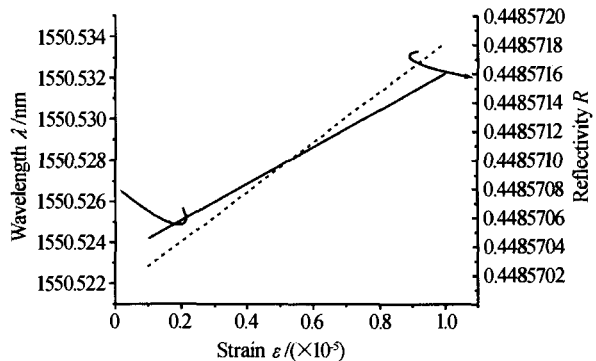


图 3 波长/反射率与应变的关系
Fig. 3 Relation between wavelength/reflectivity and strain
度越高传感性能越好.在制作相移光栅时,要选好相移位置,若要反射率对应变很敏感,则相移位置选在

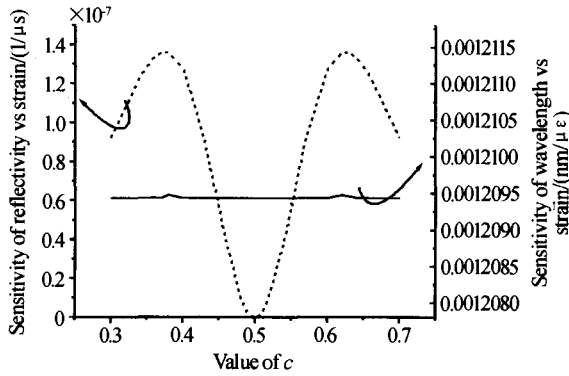


图 4 不同 c 值时反射率/波长对应变的灵敏度
 Fig. 4 Sensitivity of reflectivity/wavelength vs strain at different value of c

光栅 $c=0.38$ 左右;若要反射率对应变不敏感,则相移位置选在光栅正中间.

2.2 温度对相移光栅的反射光谱特性的影响

对于温度改变 ΔT ,由温度引起的折射率改变为 $\Delta n = \xi \times \Delta T \times n$;假设光纤均匀伸长,则光栅长度为 $L = L_0(1 + \alpha \times \Delta T)$;光栅周期为 $\Lambda = \Lambda_0(1 + \alpha \times \Delta T)$;相移区长度为 $L\varphi = L\varphi_0(1 + \alpha \times \Delta T)$;其中 ΔT 变化不是很大时,热光系数 $\xi = 6.7 \times 10^{-7}$,热膨胀系数 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}$ [7];布喇格反射波长 $\lambda_B = 2(n + \Delta n)\Lambda$;相移量为 $\varphi = 2\pi\delta n_2 L\varphi / \Lambda(n + \Delta n + \delta n_1)$.将初始值 $n, L_0, \Lambda_0, \delta n_1, \delta n_2, L\varphi_0$ 以及温度改变后的各参量 $\Delta n, L, \Lambda, L\varphi, \lambda_B, \varphi$ 代入式(7)进行编程计算.

对于不同的 c 值, ΔT 不同时,同样对式(7)编程做图,如图 5. 其中图(a)、(b)、(c)、(d)对应 c 值分别为 0.3、0.4、0.5、0.6,每副图中三条曲线从左到右对应的 ΔT 分别为 -5°C 、 0°C 和 5°C . 从图中可看

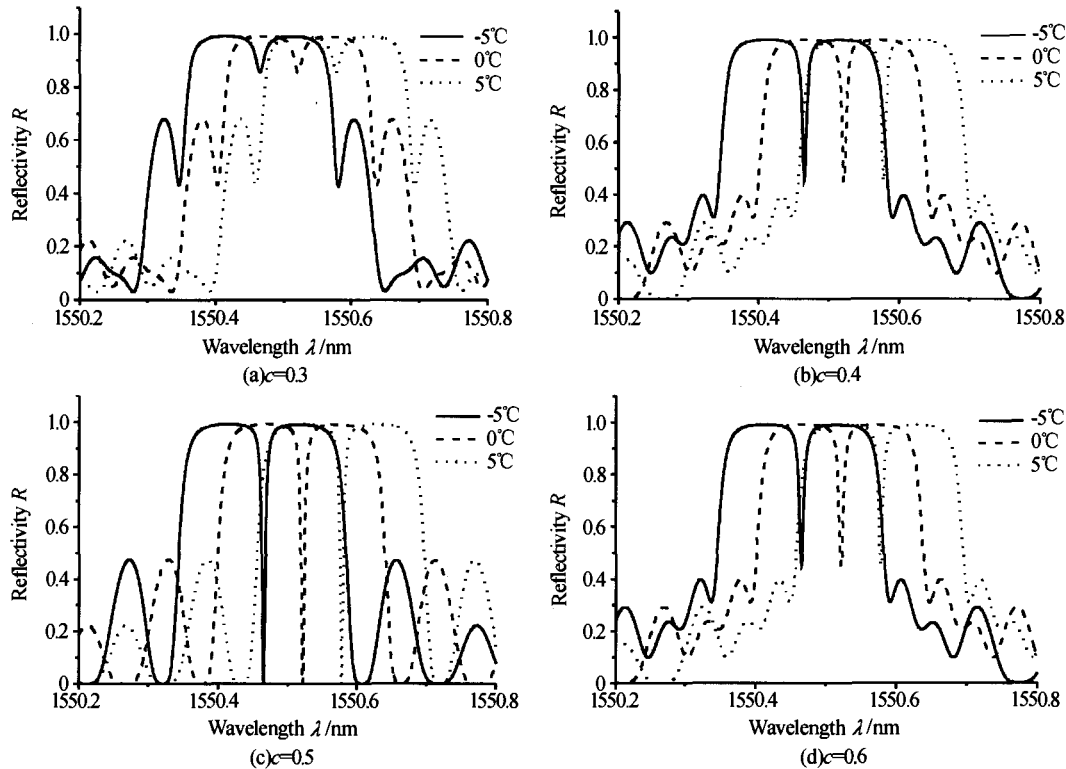


图 5 不同 c 值温度改变时相移光栅的反射光谱
 Fig. 5 Reflective spectra of phase-shifted grating with different temperature at different value of c

出:对于同一 c 值,反射谱透射窗口峰值的波长和反射率随 ΔT 而改变;对于不同的 c 值,在相同 ΔT 下,反射率 R 是不同的.

同样可得波长与温度改变和反射率与温度改变的关系.其中 $c=0.4$ 时,其关系如图 6. 从图中可看出:波长和温度改变,反射率和温度改变都有很好的线性关系.这表明相移光栅反射谱透射窗口峰值的波长和反射率也可以监测外界的温度变化.

从图 3 和图 6 看出: $\lambda/4$ 相移光栅受到外界的干扰,其反射光谱的透射窗口峰值的反射率会发生改变,这可初步解释 Granfield 大学通过检测分布反

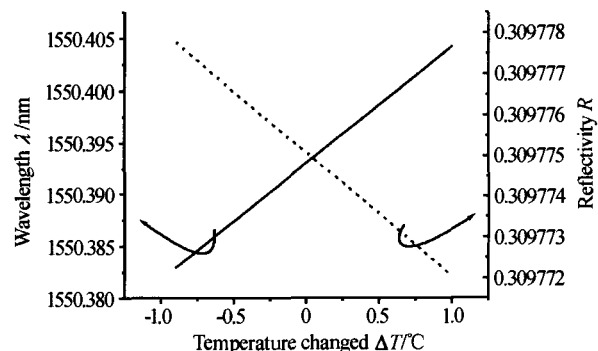


图 6 波长/反射率与温度改变的关系
 Fig. 6 Relation between wavelength/reflectivity and temperature changed

馈(DFB)光纤激光器的能量来检测声波的实验^[2]. 不同频率的声波作用在相移光栅上,使得相移光栅的反射率发生改变. 由光纤光栅理论和DFB激光理论可知^[8],光纤光栅反射率越高则DFB激光器阈值增益越低,反射率的提高意味着光栅的耦合常数增加,耦合常数过高会影响输出功率. 光纤光栅反射率不同,介质对泵浦光的吸收不同,总的平均损耗发生改变,于是由相移光栅构成的DFB光纤激光器输出的能量就会改变. 这样就可通过激光器输出能量的变化监测声波的频率.

通过计算可知, c 值不同时,反射率对温度的灵敏度($\Delta R/\Delta T$)不同, $\Delta R/\Delta T$ 关于 $c=0.5$ 对称, $c=0.5$ 时最小,如图7中虚线所示;波长对应变的灵敏度($\Delta\lambda/\Delta T$)基本不变,为 $11.24 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,如图7中实线所示.

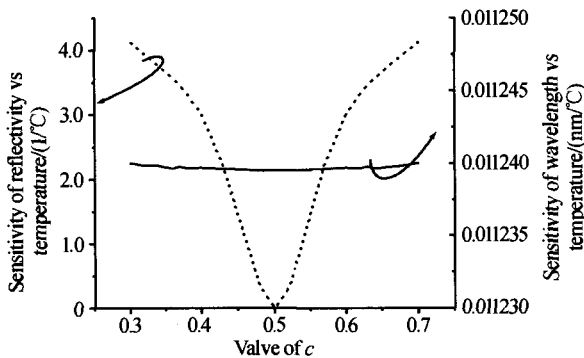


图7 不同 c 值时反射率/波长对温度的灵敏度
Fig. 7 Sensitivity of reflectivity/wavelength vs temperature at different value of c

在制作光栅时,若要反射率对温度敏感,相移位置要尽量远离光栅中心;若要反射率对温度不敏感,则相移位置选在光栅中心处.

对于 $\lambda/4$ 的相移光栅,改变光栅的初始长度:1)光栅的初始长度 $L_0=5 \text{ cm}$;2)光栅的初始长度 $L_0=1 \text{ mm}$. 通过编程计算可得2.1和2.2中同样的结论. 这说明温度和应变对相移光栅的影响与相移光栅的初始长度 L_0 无关.

3 结论

通过理论计算,发现 $\lambda/4$ 相移光栅的反射光谱透射窗口峰值的波长、反射率分别与应变或温度都有很好的线性关系. 对于不同的相移位置,波长对应变的灵敏度和波长对温度的灵敏度基本不变,分别为 $1.21 \text{ pm}/\mu\text{e}$ 和 $11.24 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. 对于不同的相移位置,反射率对应变灵敏度关于 $c=0.5$ 对称,且在 $c=0.38$ 处最大, $c=0.5$ 处最小,若要反射率对应变很敏感,则相移位置要选在 $c=0.38$ 处;若要反射率对应变不敏感,则相移位置选在光栅正中间. 反射率

对温度灵敏度关于 $c=0.5$ 对称,且在 $c=0.5$ 处最小,若要反射率对温度很敏感,则相移位置要尽量远离光栅中心;若要反射率对温度不敏感,则相移位置选在光栅中心处. 温度和应变对 $\lambda/4$ 相移光栅的影响与相移光栅的初始长度 L_0 无关.

相移光栅的反射光谱透射窗口峰值的波长和反射率分别对应变或温度的改变有很好的线性关系以及高的灵敏度使其可应用于传感. 不同相移位置,相移光栅对应变或温度改变的灵敏度不同;不同的光栅初始长度,应变或温度对相移光栅的影响不变. 这些结论对相移光栅的制作有指导性作用. 环境变化影响相移光栅反射光谱透射窗口峰值的反射率初步解释了利用DFB光纤激光器的能量变化来检测声波的实验,进一步的研究工作正在进行中.

参考文献

- 1 赵东晖,杨秀峰,刘志国,等. 相移光纤光栅的特性分析及其应用. 光电子·激光,1998,9(3):177~180
Zhao D H, Yang X F, Liu Z G, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1998, 9(3):177~180
- 2 Ye Chenchun, Tatam R P. Acoustic-emission detection using Yb^{3+}/Er -codoped fiber grating lasers. 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara Japan. 2003. 218~221
- 3 Othonos A, Kalli K. *Fiber Bragg Grating*. London: Artech House, 1999. 198~200
- 4 郭团,乔学光,贾振安,等. 基于光纤 Bragg 光栅反射波带宽展宽的压力传感研究. 光子学报,2004,33(3):288~290
Guo T, Qiao X G, Jia Z A, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3):288~290
- 5 陈嘉琳,陈柏,乔启全,等. 掺 Yb 相移光栅的形成过程的分析. 中国激光,2003,30(6):541~543
Chen J L, Chen B, Qiao Q Q, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2003, 30(6):541~543
- 6 Agrawal G P, Bobeck A H. Modeling of distributed feedback semiconductor lasers with axially-varying parameters. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 24(5):2407~2414
- 7 贾宏志,李育林,忽满利,等. 光纤 Bragg 光栅温度和应变的灵敏度分析及应用探讨. 激光杂志,1999,20(5):12~14
Jia H Z, Li Y L, Hu M L, et al. *Laser Journal*, 1999, 20(5):12~14
- 8 梁丽萍. F-P腔及DFB结构掺 Yb^{3+} 光纤激光器研究. 南宁:广西大学硕士论文,2001. 60~62
Liang L P. F-P Cavity and DFB Yb^{3+} -doped Fiber Laser Research. Nanning: Guangxi University Thesis of Master, 2001. 60~62

Effect of Strain or Temperature on Reflective Spectra Character of $\lambda/4$ Phase-shifted Grating

Jiang Desheng, Liao Shenghui, Zhou Ciming, Yu Haihu

Fiber Optic Sensing Technology Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

Received date: 2004-07-26

Abstract Using the matrix approach and Mathematica calculation, the main reflective spectra character of $\lambda/4$ phase-shifted fiber grating was analysed with the conditions such as strain and temperatures changed and draw some disciplinary conclusions. These theoretical results have important instruction for the fabrication of phase-shifted grating and its application in sensors.

Keywords Matrix approach; Spectral character; Phase-shifted grating



Jiang Desheng was born in Hubei Province in 1949. He is a chief professor of Wuhan University of Technology, and a Ph. D. tutor awarded with State Council subsidy. Now he is engaged in the fiber optic sensing technique research and its application in engineer.