

横向压力对弱双折射光纤光栅偏振相关 损耗特性的影响

王启宇 励强华 郭炳霞 田春华

(哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要 根据耦合模理论, 深入研究了横向压力作用下光纤布拉格光栅(FBG)的反射偏振相关损耗(RPDL)特性, 对不同横向压力下的 RPDL 分别进行了数值模拟。模拟结果表明, RPDL 对横向压力的响应非常敏感, 压力变化时其峰值高度和主峰位置均发生较大的变化。对此进行大量的实验验证, 实验结果与理论分析相符; 并且实验结果显示 RPDL 峰高变化和峰位变化曲线在一定范围内均呈很好的线性关系。从而可以利用 RPDL 特性实现对外力场信息变化的灵敏监测。

关键词 光栅; 偏振相关损耗; 耦合模理论; 横向压力

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0305003

Effect of Lateral Force on Reflected Polarization Dependent Loss Property of Low-Birefringence Fiber Bragg Gratings

Wang Qiyu Li Qianghua Guo Bingxia Tian Chunhua

(*Institute of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China*)

Abstract According to coupled mode theory, the reflected polarization dependent loss (RPDL) property of fiber Bragg grating (FBG) under lateral force has been studied deeply. The numerical simulation of the RPDL under different lateral force is developed, and the simulation results show that the response of RPDL is very sensitive to lateral force. Peak height and peak position change greatly with force. Conducting a large number of experiments, experimental results accord with theoretical analysis; moreover, the results show the changing curves of RPDL peak height and peak position within a certain range are in good linear relationship. Therefore RPDL can achieve the sensitive monitoring to the changes of force field information, and a new method for FBG to demodulate exactly is provided.

Key words grating; polarization dependent loss; coupled-mode theory; lateral force

OCIS codes 060.3735; 060.2340; 260.5430

1 引 言

随着光通信的发展, 传输速率不断提高, 偏振特性对传输质量的影响也更加明显, 成为高速光纤通信系统发展的障碍^[1,2], 然而, 在高速光信号处理技术中, 偏振效应具有响应速度快、效率高等优势, 可以利用光纤的偏振敏感特性进行传感^[3], 以及利用

器件的超快偏振响应特点进行全光信号处理^[4,5]等, 这些使得偏振特性的研究更有意义。目前, 对光纤布拉格光栅(FBG)的偏振特性的研究已很深入, 近年来有很多相关报道。如 Ding 等^[6]提出了利用双折射的密勒矩阵洛伦兹变化特性来实现偏振相关损耗(PDL)的测量; Gao 等^[7]报道了均匀 FBG 的反

收稿日期: 2011-09-26; **收到修改稿日期**: 2011-12-09

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(A200910)资助课题。

作者简介: 王启宇(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅偏振特性方面的研究。E-mail: qiyu2007@yahoo.cn

导师简介: 励强华(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤非线性及光纤偏振等方面的研究。

E-mail: Lqh0118@126.com(通信联系人)

射偏振损耗特性,对 PDL 进行了修正,提出了有效偏振损耗的概念;Ge 等^[8]对光栅光致双折射引起偏振相关损耗的理论进行了分析;Wang 等^[9]近期报道了关于均匀 FBG 透射谱的 PDL 的相关性质,并将其应用于压力传感器。

本文主要研究横向压力对 FBG 反射偏振相关损耗(RPDL)特性的影响,在大多数情况下,FBG 是在耦合器和环形器的辅助下作为反射器件来使用的,因此对反射偏振特性的研究就显得尤为重要,而且横向压力作用下,详细的 RPDL 特性规律尚未有相关实验研究。因此分析模拟了横向压力下 RPDL 的变化规律,同时进行大量的实验,验证了理论的正

确性。

2 理论分析及数值模拟

光学系统的 PDL 是描述光学系统对传输光的偏振态的敏感程度的物理量。光纤光栅的 RPDL 可以表示为^[8]

$$L_{\text{RPD}}(\lambda) = \left| 10 \lg \frac{r_x(\lambda)}{r_y(\lambda)} \right|, \quad (1)$$

式中 $r = |\rho|^2$ 。

由于双折射的出现,FBG 的耦合分为了相互垂直的两个偏振模(x 模和 y 模)各自的耦合^[10],可表示为

$$\rho_{x(y)} = \frac{-\kappa_{x(y)} \sinh(\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L)}{\hat{\sigma}_{x(y)} \sinh(\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L) + i \sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} \cosh(\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L)}, \quad (2)$$

式中

$$\kappa_{x(y)} = \frac{\pi v \overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}}{\lambda},$$

$$\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{B},x(y)}} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}},$$

$\overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}$ 是 FBG 沿 $x(y)$ 轴的有效折射率变化的均值, λ 是波长, L 是光栅长度, λ_{B} 是布拉格波长, v 是干涉条纹的可见度。

当光纤光栅受横向压力, x 和 y 方向有效折射率和光栅周期 Λ 均发生变化,导致反射系数也发生了变化,从而影响了 PDL 的谱形和位置,下面分别就这两方面来分析:

1) 有效折射率变化

横向作用力作用到 FBG 时,两个正交模式的有效折射率会有所不同,折射率较小的方向(y 轴)为快轴,而折射率较大的方向(x 轴)为慢轴,相应的有效折射率变化可以表示为^[11]

$$\Delta n_{\text{eff},x} = \frac{-(n_{\text{eff},0})^3}{2} [p_{11}\epsilon_x + p_{12}(\epsilon_y + \epsilon_z)], \quad (3)$$

$$\Delta n_{\text{eff},y} = \frac{-(n_{\text{eff},0})^3}{2} [p_{11}\epsilon_y + p_{12}(\epsilon_x + \epsilon_z)], \quad (4)$$

式中 $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$ 是弹光系数, ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 分别是 x 、 y 、 z 方向应变变量,

由于光纤受压部分的两端不固定,实验中采用的两支撑面是抛光的钢板,因此可看成平面应力 $\sigma_z = 0$,再依据胡克定理,可以得出应变的大小和应力的关系为

$$\epsilon_x = (\sigma_x - u\sigma_y)/E, \quad \epsilon_y = (\sigma_y - u\sigma_x)/E,$$

$$\epsilon_z = -u(\sigma_x + \sigma_y)/E, \quad (5)$$

式中 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的应力分量。 $E = 74 \text{ GPa}$ 是杨氏模量, $u = 0.17$ 是泊松比。

当横向力作用在圆柱形对称的光纤光栅上时,由于光栅的长度远大于它的直径,所以可以将其视为一典型的二维横向应变情况(即平面应力和平面应变)^[12],通过平面应变弹性解可以得到应力态:

$$\sigma_x = F/(\pi lb), \quad \sigma_y = -3F/(\pi lb), \quad (6)$$

式中 l 为受力光栅长度, b 为光纤半径, F 为横向压力。

通过上面分析可知,光纤光栅受横向压力作用时会导致高双折射,从而改变了反射光的偏振相关性,引起 RPDL 谱形的变化。

2) 光栅周期 Λ 变化

根据布拉格关系知

$$\Delta \lambda_{\text{B},x(y)} = 2\Delta n_{\text{eff},x(y)}\Lambda + 2n_{\text{eff},x(y)}\Delta\Lambda, \quad (7)$$

需要特别指出的是光纤光栅在外场作用下,导致光纤纵向(z 轴)拉伸,周期 Λ 会发生改变。此时光栅周期为

$$\Lambda + \Delta\Lambda = \Lambda(1 + \epsilon_z). \quad (8)$$

光栅周期的变化对两个正交偏振模式的作用是相同的,因此只会影响到 RPDL 的峰位,并不会影响到谱形变化,由于 ϵ_z 大于零,光栅周期变大,RPDL 峰值位置整体红移。

考虑到以上两方面的影响,易得在横向压力作用时, x 方向偏振光和 y 方向偏振光中心波长的漂移量分别为

$$\Delta\lambda_{\text{Br}} = -\frac{(n_{\text{eff},0})^3 \Lambda}{E} \times \{ (p_{11} - 2up_{12})\sigma_x + [(1-u)p_{12} - up_{11}] \times (\sigma_y + \sigma_z) \} + 2\frac{n_{\text{eff},0}\Lambda}{E} \times [\sigma_z - u(\sigma_x + \sigma_y)], \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_{\text{By}} = -\frac{(n_{\text{eff},0})^3 \Lambda}{E} \times \{ (p_{11} - 2up_{12})\sigma_y + [(1-u)p_{12} - up_{11}] \times (\sigma_x + \sigma_z) \} + 2\frac{n_{\text{eff},0}\Lambda}{E} \times [\sigma_z - u(\sigma_x + \sigma_y)], \quad (10)$$

通过理论分析可知,当对光纤光栅施加不同压力时,对于反射谱而言,一方面,由于 x 、 y 方向有效折射率发生变化,会使反射谱两偏振谐振峰开始沿相反方向漂移(x 方向红移, y 方向蓝移),此外折射率变化量不同,导致波长漂移量不同, x 偏振方向漂移量更大一些;而另一方面由于光栅周期的变化使反射谱整体发生红移,以上两方面综合作用使得反射谱两谐振峰均红移,此外,随压力增加,两反射谐振峰偏移量差值也不断增加,导致了RPDL谱形的变化和峰位的漂移。

根据以上推理过程,代入具体参数,其中, $n_{\text{eff}} = 1.4682$ 、 $L = 8 \text{ mm}$ 、 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 1.281 \times 10^{-4}$ 、 $\Lambda = 528.45 \text{ nm}$ 、 $v = 1$ 、 $b = 64 \text{ }\mu\text{m}$,分别在 $0, 30, 70 \text{ N}$ 的压力作用下对反射谱和反射偏振相关损耗进行数值模拟。

对上面两方面特征参量进行数值模拟,为方便起见,对光纤布拉格光栅反射谱归一化处理。

图1(a)给出了光纤光栅在不受外界压力作用下的反射谱和RPDL谱,可以看出不受压力时,光纤光栅 x 、 y 方向偏振光的反射谱基本重合,中心反射波长在 1551.9 nm ,RPDL峰值比较小。图1(b)和(c)分别给出了 30 N 和 70 N 横向压力作用时反射谱和RPDL谱,由于FBG反射功率谱谐振峰两侧旁瓣的影响,会使RPDL出现多峰,这里只观察RPDL中间两峰(主峰)峰值和位置的变化,从图1(b)可以看出RPDL主峰峰值比无压力时有了明显增高,而且两主峰间距明显变窄。对光纤光栅的作用力继续增加,当增大到 70 N 时,RPDL主峰高度有一定的下降趋势,而相应的RPDL主峰间距仍然继续变窄。

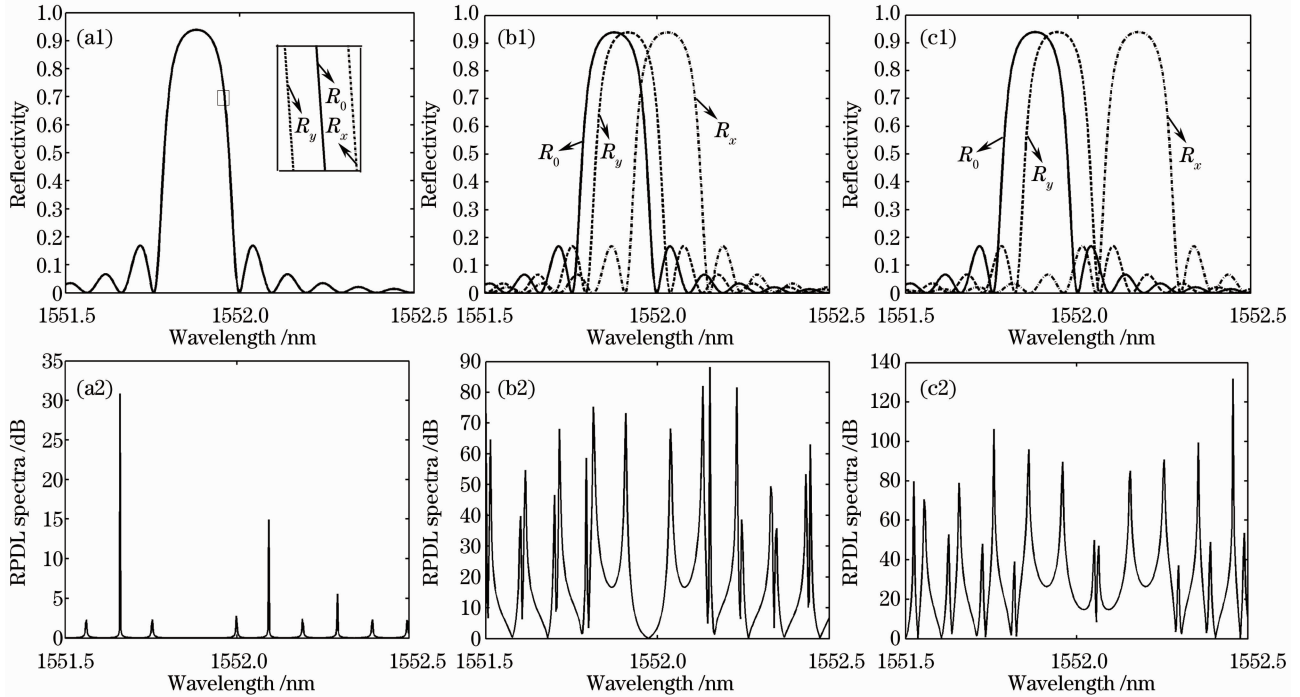


图1 (a1), (a2) 0 N 反射谱和RPDL谱;(b1), (b2) 30 N 反射谱和RPDL谱;(c1), (c2) 70 N 反射谱和RPDL谱
Fig. 1 (a1), (a2) Reflected spectra and RPDL spectra at 0 N ; (b1), (b2) reflected spectra and RPDL spectra at 30 N ; (c1), (c2) reflected spectra and RPDL spectra at 70 N

3 实验分析

实验装置如图2所示,可调谐激光光源(Agilent81980A)发出的光进入光纤偏振分析仪

(Agilent A2000)的控制端,其控制端产生的偏振光经过环形器再通过单模光纤光栅,最后反射信号进入光纤偏振分析仪的测试端对光纤光栅的RPDL

进行测量,其分辨率设置为 1 pm。若传感光栅受横向压力作用,则将入射光波被调制,此时带有外场信息的调制光被传感光栅反射,并经耦合器进入偏振分析仪解调并输出。实验中选用 FBG 中心波长 1551.9 nm,长度为 8 mm。机械压力装置包括两块 10 mm 宽的抛光钢板,一根待测光栅和一根平衡栅。

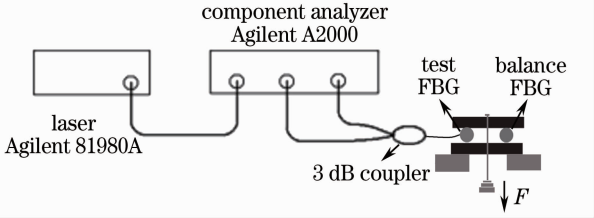


图 2 横向压力测试实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of transversal force measurement

由于光纤光栅受横向压力作用时,轻微的错位

就会使光纤光栅发生断裂,因此需将整个装置固定牢。然后对装置施加压力,实验结果如图 3 所示。图 3(a)是没有施加横向压力的反射谱和 RPDL 谱,可以看出反射谱中 x 、 y 偏振方向反射谱谐振峰基本重合。RPDL 主峰高度较低,两主峰间距较宽。图 3(b)是对施加 50 N 压力时的反射谱和 RPDL 谱,发现 x 、 y 偏振方向反射谱谐振峰发生漂移。 x 、 y 方向谐振峰都向波长增大的方向移动, y 方向谐振峰偏移量相对较小,而 x 方向谐振峰偏移量相对较大。RPDL 主峰较无压力时明显增高并且主峰间距变窄。随之,对装置增大压力到 100 N[如图 3(c)所示],与 50 N 压力相比, x 、 y 方向谐振峰漂移量增大,两谐振峰漂移量差值也变大,而且 RPDL 主峰高度出现了下降趋势,两峰间距明显变窄。实验结果和理论相一致。通过分析可知,随压力的增加,RPDL 的主峰高度先增高后降低,而主峰间距始终变窄。

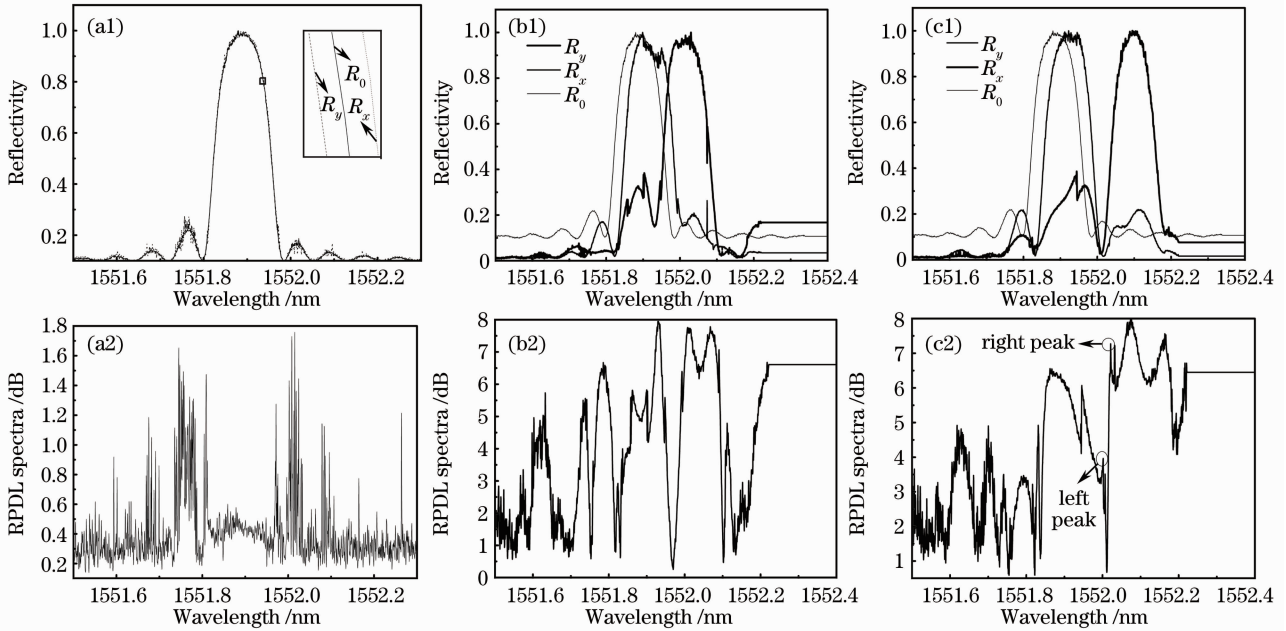


图 3 (a1), (a2) 0 N 反射谱和 RPDL 谱线; (b1), (b2) 50 N 反射谱和 RPDL 谱线;

(c1), (c2) 100 N 反射谱和 RPDL 谱线

Fig. 3 (a1), (a2) Reflected spectra and RPDL spectra at 0 N; (b1), (b2) reflected spectra and RPDL spectra at 50 N;

(c1), (c2) reflected spectra and RPDL spectra at 100 N

下面对 RPDL 的主峰高度和峰间距随压力的变化做了详细的实验研究,通过重物对光栅施加压力,间隔 10 N 记录一次,最大压力为 110 N。得到了关于 RPDL 的主峰高度和位置随压力的变化曲线,如图 4、5 所示。

图 4 中 RPDL 主峰高度随压力的增大先有明显上升趋势,当压力达到 60 N 时,主峰高度达到最

大值,当压力继续增加时,峰值高度逐渐减小,当所加压力达到 100 N 时, x 、 y 偏振方向各自的反射谱谐振峰位置完全分开,所对应的 RPDL 两主峰间距已经很小,接近重合,当压力达到 110 N 时仪器所观察到的 RPDL 主峰是与两偏振方向反射谱谐振峰无关的参量,而是反射谱谐振峰两端旁瓣的函数,可以预测,随着压力的继续增大,RPDL 会有较小的波

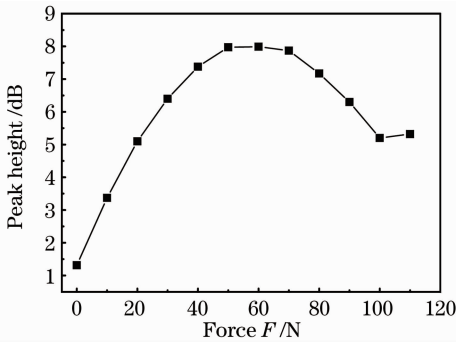


图4 RPD L 主峰高度随压力变化曲线

Fig. 4 Variation of height of RPD L dependent with transversal force

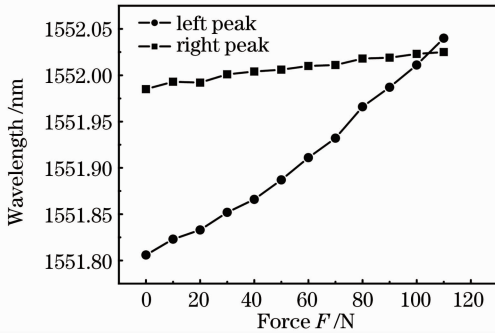


图5 RPD L 双峰位置变化曲线

Fig. 5 Variation of two main peaks position of RPD L dependent with transversal force

浪式的起伏,对于传感并无用处,可以视作噪声。图5为 RPD L 双峰位置随压力变化曲线,可以看出随压力的增大两主峰整体发生红移,其中左峰移动的较为迅速,从而使双峰间距变窄,最终两主峰位置重合。可见,不同模横向作用力对 FBG 的 RPD L 特性影响与理论相吻合。实验误差主要来源于以下三个方面:1) 来源于测试仪器接口及连接装置的固有 PDL,如光纤接口和 3 dB 耦合器固有 PDL 分别为 0.02 dB 和 0.1~0.2 dB;2) 光纤偏振分析仪对于测量 PDL 大小时的重复性并不十分理想。3) 所加重物不可避免的微小抖动,使光纤光栅受力不均匀,产生啁啾现象。

4 结 论

本文利用光纤光栅耦合模理论,分析了横向压力对 FBG 偏振特性的影响,数值模拟了反射偏振相关损耗随横向压力的变化,通过实验详细地测量了不同压力下的 RPD L 变化曲线;总结出了横向压力对 RPD L 的影响规律性。理论和实验结果一致表明:RPD L 峰值高度随压力的增大有起伏的趋势,而且这种起伏随压力的增大趋于平稳;主峰间距随

横向压力增大有明显变窄的趋势。此外,两峰位置随压力的变化呈较好的线性关系,而且 RPD L 左峰位置对压力变化非常灵敏,为实现精确的横向压力解调提供了可能。

参 考 文 献

- 1 A. O. Dal Forno, A. Paradisi, R. Passy *et al.*. Experimental and theoretical modeling of polarization-mode dispersion in single-mode fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3): 296~298
- 2 C. Vassallo. PMD pulse deformation[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18): 1597~1598
- 3 Su Yang, Feng Yunhai, Feng Kui. Effect of transmission spectrum of grating in sensors based on polarization properties of fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 112801
- 4 苏洋,冯云海,冯奎.基于偏振效应的传感测量中光栅透射谱性能影响分析[J].*激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 112801
- 5 J. Turkiewicz, G. Khoe. All-optical 1310 to 1550 nm wavelength conversion by utilising nonlinear polarisation rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(1): 29~30
- 6 H. Sotoand, A. Gutierrez. All-optical 2 to 4 level encoder based on cross polarization modulation in a semiconductor optical amplifier utilized to develop an all-optical 2 input digital multiplexer[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9000~9005
- 7 Ding Panfeng, Wang Jiaxian, Zhang Qiren *et al.*. Measurement of polarization dependent loss by two SOPs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2281~2283
- 8 丁攀峰,王加贤,庄其仁等.两偏振态测量偏振相关损耗[J].*光子学报*, 2007, **36**(12): 2281~2283
- 9 Gao Shecheng, Li Qianghua. Characterization of polarization dependent loss in reflection in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0306004
- 10 高社成,励强华.均匀光纤布拉格光栅的反射偏振相关损耗特性[J].*光学学报*, 2011, **31**(3): 0306004
- 11 Ge Tingwu, Lu Dan, Xu Kun *et al.*. Theoretical analysis of polarization dependent loss induced by fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1024~1028
- 12 葛廷武,陆丹,徐坤等.光栅致双折射引起偏振相关损耗的理论分析[J].*中国激光*, 2008, **35**(7): 1024~1028
- 13 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405004
- 14 汪弋平,王鸣,黄晓琴.基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J].*中国激光*, 2011, **38**(4): 0405004
- 15 A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(9): 919~933
- 16 Wu Fei, Kuang Minmin, Zhao Jing *et al.*. Application of ant colony algorithm in analyzing of tranverse uniform strain reflective spectrum of fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 477~483
- 17 吴飞,邝敏敏,赵静等.蚁群算法在光纤布拉格光栅横向均匀受压反射谱分析中的应用[J].*中国激光*, 2010, **37**(2): 477~483
- 18 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1508~1512
- 19 涂勤昌,张伟刚,孙磊等.光纤光栅横向应变特性的研究[J].*中国激光*, 2004, **31**(12): 1508~1512