

文章编号: 0258-7025(2008)07-1024-05

# 光栅致双折射引起偏振相关损耗的理论分析

葛廷武 陆丹 徐坤 伍剑 林金桐

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 应用耦合模理论, 给出均匀布拉格光纤光栅在考虑光栅致双折射时的透射与反射系数的解析式, 按照测量偏振相关损耗(PDL)的确定性与非确定性两种方法, 推导出了均匀布拉格光纤光栅中偏振相关损耗的解析公式。理论分析表明, 该公式能够准确分析弱双折射光纤或者各向同性光纤上写入的均匀布拉格光纤光栅的偏振相关损耗特性, 同时数值模拟高双折射光纤上写入的均匀布拉格光纤光栅偏振相关损耗特性, 得到的结果也与已有实验曲线相近。

**关键词** 光栅; 光纤光栅; 偏振相关损耗; 耦合模理论; 琼斯矩阵; 解析公式

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.1024

## Theoretical Analysis of Polarization Dependent Loss Induced by Fiber Gratings

Ge Tingwu Lu Dan Xu Kun Wu Jian Lin Jintong

(Key Laboratory of Optical Communications and Lightwave Technologies, Ministry of Education,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Employing coupling mode theory, the reflection and transmission coefficients of uniform fiber Bragg gratings with the grating induced birefringence were given. Based on the coefficients, analytical expressions of polarization dependent loss in fiber gratings were then deduced according to its deterministic and nondeterministic measurement principles. The given expression can precisely determine the polarization dependent loss (PDL) of the uniform fiber Bragg grating written in the isotropic or low birefringence fiber, and can also numerically simulate the approximate PDL result of Bragg uniform fiber grating written in the high birefringence fiber. The derived result agrees well with the existed experimental curve.

**Key words** gratings; fiber grating; polarization dependent loss; coupled mode theory; Jones matrix; theoretical expression

## 1 引言

偏振相关损耗(PDL)现已成为描述光无源器件特性的一项重要指标, 是衡量器件对传输光的偏振态敏感程度的一个参量。PDL 是指光器件在所有偏振状态下的最大传输差值, 是在所有偏振态下器件最大传输和最小传输的比例。PDL 的测量方法已经十分成熟, 主要分为两大类: 确定性方法和非确

定性方法。确定性方法从待测器件(DUT)的琼斯(Jones)或马勒(Muller)测量矩阵中推导出其 PDL, 而测量矩阵则需通过测量 DUT 在一系列特定偏振态下的传输特性而得到。非确定方法是通过测量 DUT 在确定型全偏振态或伪随机型全偏振态下的传输特性, 找到 DUT 的最大传输与最小传输, 从而得到器件的 PDL<sup>[1~3]</sup>。

收稿日期: 2007-11-12; 收到修改稿日期: 2007-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(60577033), 新世纪人才项目(NCET-06-0093)和高等学校学科创新引智计划(B07005)资助课题。

作者简介: 葛廷武(1979—), 男, 内蒙人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器与非线性光纤光学方面的研究。

E-mail: ge\_tingwu@163.com

导师简介: 林金桐(1946—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与光纤激光器方面的研究。

E-mail: ljt@bupt.edu.cn

尽管测量器件 PDL 的实验方法已经十分成熟，器件双折射对系统的影响<sup>[4,5]</sup>以及获得低 PDL 的器件也已有研究<sup>[6,7]</sup>，但就作者目前所知，解析分析光纤光栅 PDL 特性的还未见报道。本文从理论上对光栅致双折射对光纤光栅 PDL 的影响做了研究。首先从光栅致双折射均匀布拉格光纤光栅的透射与反射系数解析解出发，按照非确定性方法，解析求得光纤光栅的最大传输(反射)系数与最小传输(反射)系数，得到光纤光栅 PDL 的解析公式。为验证解析公式的正确性，又按照器件 PDL 的确定性方法，求得光纤光栅的 Jones 矩阵，得到了相同形式的光纤光栅 PDL 解析公式。理论分析与数值模拟显示，给出的解析公式可以准确描述在弱双折射或各向同性光纤上写入的均匀布拉格光纤光栅 PDL 特性，同时也能够很好地描述在各向异性光纤上写入光纤光栅的 PDL 特性。

## 2 理论模型

光纤光栅的双折射主要分为两部分，一部分是在光纤控制过程中引入的双折射——光纤双折射，另一部分则是在光栅写入过程中引入的新的双折射——光栅致双折射。在光栅写入过程中，由于光敏材料对写入激光具有偏振响应，采用 S 态偏振激光写入与采用 P 态偏振激光写入获得的相对双折

射的大小不同<sup>[8]</sup>；而且在写入过程中，光致折射率调制的横向分布往往也是不均匀的，也会引入新的双折射，当采用双侧曝光后，获得很低的相对双折射<sup>[7,9]</sup>。假设光纤是各向同性或弱双折射的，忽略光纤双折射，这样光纤光栅双折射仅由或主要由光栅致双折射引入，进一步假设光纤光栅为均匀布拉格光纤光栅，且光纤光栅折射率分布为

$$\begin{bmatrix} n_x(z) \\ n_y(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{x0} \\ n_{y0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\delta} n_x \\ \bar{\delta} n_y \end{bmatrix} \left\{ 1 + v(z) \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $n_{x0}, n_{y0}$  为光纤的主轴( $x, y$ ) 折射率(光纤同性, 主轴折射率相等),  $\bar{\delta} n_x, \bar{\delta} n_y$  为光纤光栅沿主轴的光致折射率调制幅度,  $v(z), \Lambda$  和  $\phi(z)$  分别为光纤光栅条纹可见度、光纤光栅周期和相位。

### 2.1 透射型均匀布拉格光纤光栅 PDL 解析公式——确定性测量方法原理

设双折射布拉格光纤光栅的入射光场振幅沿光栅偏振主轴方向分解为

$$A^F(0) = a_{x0}^F e_x + a_{y0}^F e_y, \quad (2)$$

光纤光栅折射率分布取(1)式, 忽略光栅的非线性效应, 应用经典的耦理论<sup>[10]</sup>, 并结合边界条件, 经过相似而繁琐的理论推导, 可以得出经过光纤光栅作用后的出射光场振幅

$$A^F(L) = \begin{cases} a_{x0}^F \frac{i\bar{\delta} n_x \sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} \sinh(\sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} L) + (\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2) \cosh(\sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} L)}{\kappa_x^2 \cosh^2(\sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} L) - \bar{\delta} n_x^2} e_x + \\ a_{y0}^F \frac{i\bar{\delta} n_y \sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} \sinh(\sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} L) + (\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2) \cosh(\sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} L)}{\kappa_y^2 \cosh^2(\sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} L) - \bar{\delta} n_y^2} e_y \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\kappa_i = \eta v \bar{\delta} n_i \frac{\pi}{\lambda}$ ,  $\bar{\delta} n_i = \frac{2\pi}{\lambda} [n_{i0} + \bar{\delta} n_i (1 + \eta)] - \frac{\pi}{\Lambda} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$ ,  $i = x, y, \lambda$  为真空波长,  $\eta$  为纤芯能量与整个光纤能量的比值。令

$$\begin{cases} T_x = \frac{i\bar{\delta} n_x \sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} \sinh(\sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} L) + (\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2) \cosh(\sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} L)}{\kappa_x^2 \cosh^2(\sqrt{\kappa_x^2 - \bar{\delta} n_x^2} L) - \bar{\delta} n_x^2} \\ T_y = \frac{i\bar{\delta} n_y \sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} \sinh(\sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} L) + (\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2) \cosh(\sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} L)}{\kappa_y^2 \cosh^2(\sqrt{\kappa_y^2 - \bar{\delta} n_y^2} L) - \bar{\delta} n_y^2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $T_x, T_y$  为光纤光栅沿主轴方向的复透射系数。出射光场可简记为

$$A^F(L) = T_x a_{x0}^F e_x + T_y a_{y0}^F e_y. \quad (5)$$

下面就来求取此种光纤光栅的偏振相关损耗。

假设不同偏振态的入射光总的光强相同

$$I_{in} = |a_{x0}^F|^2 + |a_{y0}^F|^2 = \text{const}, \quad (6)$$

相应的出射光强为

$$I_{out} = |T_x a_{x0}^F|^2 + |T_y a_{y0}^F|^2, \quad (7)$$

把(6)式代入(7)式得到

$$I_{out} = (|T_x|^2 - |T_y|^2) |a_{x0}^F|^2 + |T_y|^2 I_{in}, \quad (8)$$

由(6)式可知

$$0 \leq |a_{x0}^F|^2 \leq I_{in}, \quad (9)$$

当电场偏振方向与光栅双折射主轴  $x$  方向重合时, (9) 式取右等号, 与双折射主轴  $y$  方向重合时, (9) 式取左等号。把(9)式代入(8)式, 得

$$|T_y|^2 I_{\text{in}} \leq (|T_x|^2 - |T_y|^2) |a_{x0}^F|^2 + |T_y|^2 I_{\text{in}} \leq |T_x|^2 I_{\text{in}}, \quad (10)$$

其中假设不等式  $|T_y|^2 - |T_x|^2 \leq 0$  成立。(10) 式表示入射光在光强相同而偏振态不同情况下, 只有当入射光为线偏振光, 且偏振方向沿光纤光栅偏振主轴时, 出射光强才为极大值或极小值。

根据偏振相关损耗的定义, 结合上面的推导结果, 很容易得出均匀布拉格光纤光栅的偏振相关损耗

$$\text{PDL} = 10 \lg \left( \frac{|T_x|^2}{|T_y|^2} \right). \quad (11)$$

## 2.2 透射型均匀布拉格光纤光栅 PDL 解析公式——非确定性测量方法原理

设表示布拉格均匀光纤光栅的 Jones 矩阵为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

经光纤光栅作用后的出射光场为

$$\begin{bmatrix} a_x^F(L) \\ a_y^F(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{x0}^F \\ a_{y0}^F \end{bmatrix}, \quad (13)$$

与光栅出射光场振幅公式(3)比较可知

$$\begin{aligned} J_{11} &= \frac{i\hat{\sigma}_x \sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} \sinh(\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} L) + (\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2) \cosh(\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} L)}{\kappa_x^2 \cosh^2(\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} L) - \hat{\sigma}_x^2}, \\ J_{22} &= \frac{i\hat{\sigma}_y \sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} \sinh(\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} L) + (\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2) \cosh(\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} L)}{\kappa_y^2 \cosh^2(\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} L) - \hat{\sigma}_y^2}, \\ J_{12} &= J_{21} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

采用与(5)式记号相同, 此时光纤光栅的 Jones 矩阵可记为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} T_x & 0 \\ 0 & T_y \end{bmatrix}, \quad (15)$$

在 Jones 矩阵表示中, 偏振相关损耗为 Jones 矩阵奇异本征值的比值<sup>[3]</sup>, 同样也可以得到与(11)式相同的双折射光纤光栅偏振相关损耗的表达。

## 2.3 反射型均匀布拉格光纤光栅 PDL 解析公式

当光纤光栅作为反射型元件使用时, 其 PDL 也可以很容易求出。

与上面求解过程相同, 首先应用耦合理论求解出光纤光栅反射光场振幅

$$A^B(0) = \begin{cases} a_{x0}^F \frac{i\kappa_x \sinh(\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} L)}{\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} \cosh(\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} L) - i\hat{\sigma}_x \sinh(\sqrt{\kappa_x^2 - \hat{\sigma}_x^2} L)} e_x + \\ a_{y0}^F \frac{i\kappa_y \sinh(\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} L)}{\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} \cosh(\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} L) - i\hat{\sigma}_y \sinh(\sqrt{\kappa_y^2 - \hat{\sigma}_y^2} L)} e_y \end{cases}, \quad (16)$$

简记为

$$A^B(0) = R_x a_{x0}^F e_x + R_y a_{y0}^F e_y, \quad (17)$$

重复上面求得透射型均匀布拉格光纤光栅 PDL 的推导过程, 可以很容易得到反射型布拉格光纤光栅的 PDL 解析公式

$$\text{PDL} = 10 \lg \left( \frac{|R_x|^2}{|R_y|^2} \right), \quad (18)$$

其中假设不等式  $|R_y|^2 - |R_x|^2 \leq 0$  成立。

## 3 数值模拟

在低双折射光纤光栅中, 光栅致双折射在  $10^{-6}$  量级左右, 而对于高双折射光纤光栅, 光栅致双折射最大可以达到  $3 \times 10^{-4}$ <sup>[11]</sup>, 在下面的模拟中取光栅

致双折射为  $0.5 \times 10^{-4}$ , 具体的光栅参数选择如下: 光纤沿主轴折射率  $n_{x0} = n_{y0} = 1.46$ , 光栅折射率调制幅度分别为  $\bar{\delta} n_x = 4.5 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\delta} n_y = 4.0 \times 10^{-4}$ , 光栅周期为  $\Lambda = 0.532 \mu\text{m}$ , 光栅长度  $L = 3 \text{ mm}$ , 其他模拟参数为  $v(z) = 1$ ,  $\eta = 1$  和  $\phi(z) = 0$ 。

图 1~4 给出了光纤各向同性时, 由 PDL 解析公式得到的透射型与反射型均匀布拉格光纤光栅的 PDL 曲线, 为对比同时给出了以分贝为单位的相应光纤光栅透射频谱与反射频谱。由 PDL 曲线可知, 传输型光纤光栅 PDL 曲线在光栅禁带内为双峰结构, 这与光栅的双折射特性有关, 当光纤光栅用作反射型元件时得到的 PDL 与传输型完全不同, 在禁带内部没有双峰结构而是比较平坦, 主要是因为光栅

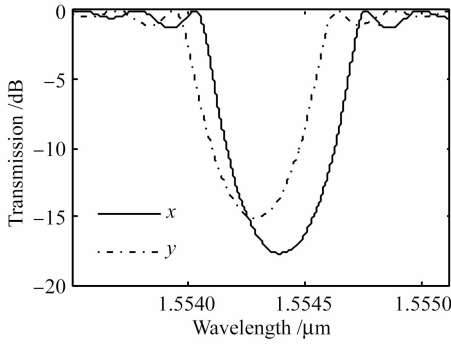


图 1 光栅致双折射均匀布拉格光纤光栅沿偏振  
主轴  $x, y$  轴方向的透射谱

Fig.1 Transmission spectra of uniform fiber Bragg grating with the grating induced birefringence along  $x$  and  $y$  axes

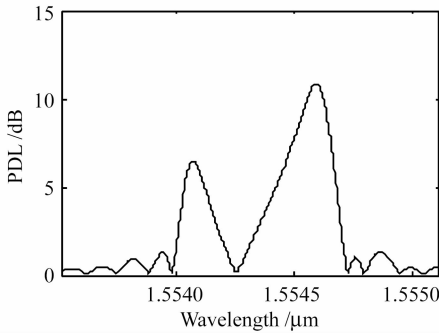


图 2 光栅致双折射均匀布拉格光纤光栅偏振  
相关损耗曲线

Fig.2 Distribution of PDL of uniform fiber Bragg grating with the grating induced birefringence

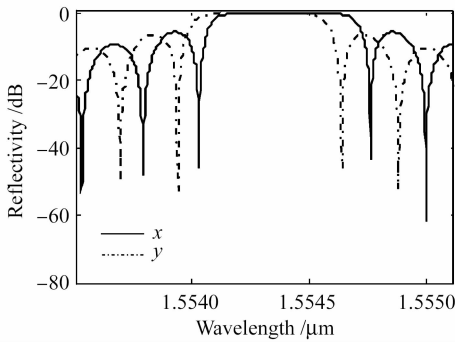


图 3 光栅致双折射均匀布拉格光纤光栅沿偏振  
主轴  $x, y$  轴方向的反射谱

Fig.3 Reflectance spectra of uniform fiber Bragg grating with the grating induced birefringence along  $x$  and  $y$  axes  
沿两偏振方向的反射在禁带内几乎完全反射。

上面的数值模拟只是考虑了光栅致双折射效应,当把公式(11)用于同时考虑光纤双折射与光栅致双折射的数值模拟时,得到的透射型均匀布拉格光纤光栅透射曲线与 PDL 关系曲线如图 5,图 6 所

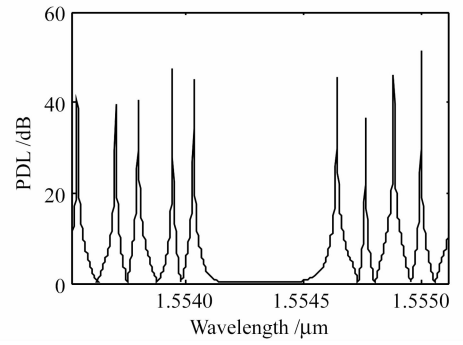


图 4 反射型光栅致双折射均匀布拉格光纤光栅偏振  
相关损耗曲线

Fig.4 Distribution of PDL of the reflection uniform fiber Bragg grating with the grating induced birefringence

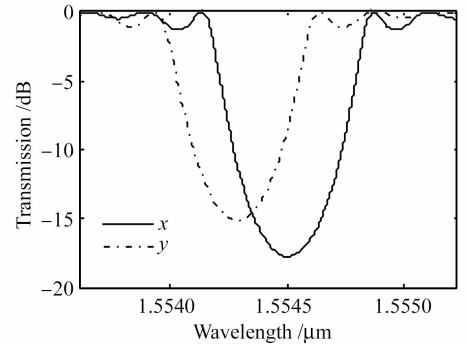


图 5 一般双折射均匀布拉格光纤光栅沿偏振  
主轴  $x, y$  轴方向的透射谱

Fig.5 Transmission spectra of the general birefringent uniform fiber Bragg grating along  $x$  and  $y$  axes

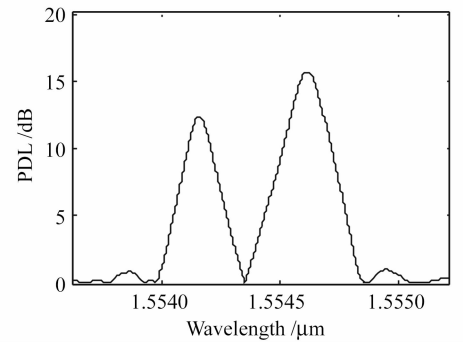


图 6 一般双折射均匀布拉格光纤光栅偏振  
相关损耗曲线

Fig.6 Distribution of PDL of the general birefringent uniform fiber Bragg grating

示,模拟中光纤沿主轴折射率取  $n_{x0} = 1.4600, n_{y0} = 1.4601$ ,其他参数与上面的参数相同。在与实验给出的均匀布拉格光纤光栅的 PDL 曲线<sup>[12,13]</sup>相比可知,数值模拟能够给出实际双折射光纤光栅 PDL 曲线的典型结构,同时对曲线的分布态势也能够有一个很好的预测。因此 PDL 解析式不仅可以准确

求解光栅致双折射均匀布拉格光纤光栅的 PDL 曲线,同时也可以近似求解光纤双折射与光栅致双折射同时作用时的均匀布拉格光纤光栅 PDL 曲线。

## 4 结 论

从耦合模理论出发,按照 PDL 的定义,推导出了描述光栅致双折射效应引起的光纤光栅 PDL 特性的解析公式。同时应用 Jones 矩阵方法求解光纤光栅 PDL,得到相同的解析公式,进一步证明其正确性。在公式推导过程中假设光纤是各向同性或弱双折射,只考虑了光栅致双折射效应,因此该解析式适用于在弱双折射光纤或各向同性光纤上写入的均匀布拉格光纤光栅的 PDL 的准确求解,当把该解析公式用于分析一般均匀布拉格光纤光栅时,也得到了较好的分析结果,可以说该解析公式为分析均匀布拉格光纤光栅的 PDL 特性提供了一种直接而有效的解析方法。

## 参 考 文 献

- 1 D. L. Favin, B. M. Nyman, G. Wolter. System and method for measuring polarization dependent loss [P]. U. S. Patent, 1994. 5371597
- 2 R. M. Craig, S. L. Gilbert, P. D. Hale. High resolution, nonmechanical approach to polarization dependent transmission measurements [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**:1285~1294
- 3 Y. H. Zhu, S. Eli, B. Pierre *et al.*. A comparison of wavelength dependent polarization dependent loss measurements in fiber gratings [J]. *IEEE Tran. Instrum. Meas.*, 2000, **49**:1231~1239
- 4 Zhou Yingwu, Guo Lingwei, Huang Rui *et al.*. Impacts of polarization dependent loss and polarization mode dispersion on the autocorrelation function of the output polarization states of

- optical transmission link [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1500~1502
- 周赢武,郭凌伟,黄 锐等. 偏振模色散及偏振相关损耗对光传输链路相关特性的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1500~1502
- 5 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiqian. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):472~476
- 吴 飞,李立新,李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):472~476
- 6 Cheng Lihua, Song Jun, Wang Jian. Design of wavelength division demultiplexers based on holographic gratings with a low polarization dependent loss [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1667~1671
- 成丽华,宋 军,王 建. 低偏振相关损耗全息光栅波分复用器的设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11):1667~1671
- 7 Wang Ruokun, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Polarization-dependent loss of long-period fiber grating fabricated by dual-side exposure method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1409~1413
- 王若崑,饶云江,朱 涛等. 双面曝光长周期光纤光栅偏振相关损耗[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1409~1413
- 8 T. Erdogan, V. Mizrahi. Characterization of UV-induced birefringence in photosensitive Ge-doped silica optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**:2100~2105
- 9 Ashish M. Vengsarkar, Qian Zhong, *et al.*. Birefringence reduction in side-written photoinduced fiber devices by a dual-exposure method [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(16):1260~1262
- 10 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 11 W. H. Loh, J. P. de Sandro, G. J. Cowle *et al.*. 40GHz optical-millimetre wave generation with a dual polarisation distributed feedback fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**:394~395
- 12 L. B. Brent, K. G. Thomas. Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**:6816~6823
- 13 S. T. Oh, W. T. Han, U. C. Paek *et al.*. Reduction of birefringence and polarization-dependent loss of long-period fiber gratings fabricated with a KrF excimer laser [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(23):3087~3092