

# 均匀光纤布拉格光栅的反射偏振相关损耗特性

高社成 励强华

(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** 研究了单模光纤布拉格光栅的偏振相关损耗(PDL)特性。运用耦合模理论和琼斯(Jones)矩阵提出了反射光的有效偏振相关损耗( $PDL_{\text{eff}}$ ),并模拟了其随光栅参数和双折射量的变化性质。光栅反射光的偏振相关损耗在反射谱的带边处明显地表现出来,特别是带边比较陡峭时。结果表明,光栅的有效偏振相关损耗明显地依赖于光栅的结构参数和双折射量。光栅的有效偏振相关损耗随光栅长度和调制深度的增加急剧增大。对于给定光栅长度和调制深度的光栅,光栅双折射量小于 $2 \times 10^{-5}$ 时,光栅的有效偏振相关损耗随双折射的增大迅速增大;光栅双折射量大于 $2.5 \times 10^{-4}$ 时,光栅的有效偏振相关损耗的两个主峰的宽度变大并在其上有子峰,随双折射的继续增大,两主峰间距增大而子峰变小。实验结果与理论模拟基本吻合。

**关键词** 光栅;偏振相关损耗;耦合模理论;琼斯矩阵;双折射

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0306004

## Characterization of Polarization Dependent Loss in Reflection in Uniform Fiber Bragg Gratings

Gao Shecheng Li Qianghua

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

**Abstract** Wavelength dependency of polarization dependent loss (PDL) in reflection in uniform fiber Bragg gratings (FBG) written in single-mode fibers (SMF) is studied theoretically. Effective PDL ( $PDL_{\text{eff}}$ ) and simulations are carried out using the coupled-mode theory and the Jones matrix. The evolution with wavelength of  $PDL_{\text{eff}}$  as a function of the grating parameters and the birefringence value is analyzed. The  $PDL_{\text{eff}}$  appears clearly on the band edges of the reflection spectrum, especially with the steep sides. Numerical results demonstrate that the  $PDL_{\text{eff}}$  evolutions with wavelength can be strongly enhanced by a modification of the grating parameters. With increase of grating length and modulation depth, the  $PDL_{\text{eff}}$  rapidly increases. For a given grating length and modulation depth of the grating, when grating birefringence is less than  $2 \times 10^{-5}$ , the  $PDL_{\text{eff}}$  increases rapidly with the increase of birefringence. As birefringence is greater than  $2.5 \times 10^{-4}$ , the two main peaks with sub-peaks on it of the  $PDL_{\text{eff}}$  become greater. With birefringence continuing increasing, the distance between the two main peaks increases, and the sub-peaks on the main peaks become smaller. They are presented a complete characterization of  $PDL_{\text{eff}}$  in FBG and a good agreement between theory and experiment is got.

**Key words** grating; polarization-dependent loss; coupled-mode theory; Jones matrix; birefringence

**OCIS codes** 060.3735; 060.2340; 260.5430

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是光纤通信和光纤传感系统中的关键元器件之一,作为通信中的滤波器、波

分复用器,光纤激光器的谐振腔和各种传感器等的核心元件已得到广泛的研究<sup>[1~5]</sup>。在光纤通信系统中,随着传输量的不断增加,系统对各种偏振效应的

**收稿日期**: 2010-08-11; **收到修改稿日期**: 2010-10-18

**基金项目**: 黑龙江省自然科学基金(A200910)资助课题。

**作者简介**: 高社成(1978—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅的偏振及非线性等方面的研究。

E-mail: bfool413@163.com

**导师简介**: 励强华(1963—),男,博士,教授,主要从事光纤无源器件的特性及应用等方面的研究。

E-mail: lqh0118@126.com(通信联系人)

敏感度不断增加<sup>[6]</sup>,FBG 的偏振特性变得更加重要。另外,由于基于 FBG 偏振特性的新型传感器<sup>[7]</sup>的提出也使得其偏振特性的研究显得更加有意义。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,因此其反射偏振特性就显得尤为重要。

FBG 的偏振特性已有很多的研究报道。例如 C. Caucheteur 等<sup>[9~11]</sup>从理论和实验上研究了写于高双折射光纤的 FBG 的偏振相关损耗(PDL)、偏振模色散(PMD)以及均匀 FBG 的差分群时延(DGD);另外,他们还对比了写于高双折射光纤的 FBG 的斯托克斯(Stokes)参量和偏振度(DOP)进行了研究<sup>[12~14]</sup>,并实验证明了琼斯(Jones)矩阵和耦合模理论对偏振特性分析的正确性<sup>[15]</sup>;P. Lu 等研究了对写于单模光纤(SMF-28)的 FBG 的偏振相关特性<sup>[16]</sup>等。但是,他们的研究主要集中在透射光的偏振特性上。尽管 FBG 主要用作反射元件,但目前还没有写于 SMF-28 的均匀 FBG 的反射 PDL 的研究报道。

本文研究写于 SMF-28 的均匀 FBG 的反射 PDL 特性。首先利用耦合模理论和 Jones 矩阵分析 FBG 的反射 PDL 随波长的变化特性,并在其基础上定义了有效偏振相关损耗(PDL<sub>eff</sub>)。接着分析了 PDL<sub>eff</sub>与光栅的结构参数和双折射量值的关系,得出 PDL<sub>eff</sub>随波长的变化明显受光栅参数影响。最后通过实验验证了理论分析。

## 2 理论模型

光纤中的双折射指特定的相互垂直的一对偏振模(本征模或  $x, y$  模)的折射率的差值  $\Delta n$ 。在常规的 FBG 的写制过程中,单边入射的紫外光使得光纤

折射率的变化在横截面上并不均一,这种折射率分布的不均一即形成了光致双折射<sup>[16]</sup>。光致双折射和光纤固有的双折射组成了 FBG 的双折射  $\Delta n$ 。一般的光栅双折射的大小量级在  $10^{-6}$  和  $10^{-5}$  之间<sup>[7,9]</sup>。具有双折射的 FBG 的两个本征模( $x$  和  $y$ )的有效折射率可以写为

$$n_{\text{eff},x} = n_{\text{eff}} + \Delta n/2, \quad (1)$$

$$n_{\text{eff},y} = n_{\text{eff}} - \Delta n/2, \quad (2)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  是纤芯平均有效折射率,  $\Delta n$  是光栅写好后光栅双折射。  $n_{\text{eff}}$  和  $\Delta n$  都具有波长依赖性,但研究的波长范围在光栅带宽(比较窄)附近,所以这种依赖性可以不考虑。

### 2.1 双折射 FBG 的反射谱

由于双折射的出现,通过 FBG 的本征模有不同的耦合系数,从而 FBG 的反射系数分成相应的两个,分别对应于  $x$  模和  $y$  模。建立与 FBG 两本征模一致的直角坐标系,则与光栅对应的 Jones 矩阵是对角阵,反射光的 Jones 矢量可以表示为<sup>[12]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_{r,x} \\ E_{r,y} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\text{FBG}} \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_x E_{i,x} \\ \rho_y E_{i,y} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\rho_x$  和  $\rho_y$  表示 FBG 与  $x$  和  $y$  模对应的反射系数,  $[E_{i,x}, E_{i,y}]^T$  是入射光的 Jones 矢量<sup>[12]</sup>:

$$\begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \exp(j\phi_x) \\ M_y \exp(j\phi_y) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $M_{x(y)}$  和  $\phi_{x(y)}$  分别代表入射光的  $x(y)$  分量的振幅和相位角。FBG 的反射特性完全由对角 Jones 矩阵  $\mathbf{J}_{\text{FBG}}$  来表征,表示为

$$\mathbf{J}_{\text{FBG}} = \begin{bmatrix} \rho_x & 0 \\ 0 & \rho_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由耦合模理论<sup>[15]</sup>可得到  $\rho_{x(y)}$

$$\rho_{x(y)} = \frac{-\kappa_{x(y)} \sinh[\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L]}{\hat{\sigma}_{x(y)} \sinh[\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L] + j \sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} \cosh[\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L]}, \quad (6)$$

式中

$$\kappa_{x(y)} = \frac{\pi \nu \overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}}{\lambda}, \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}, \quad (8)$$

式中  $\overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}$  是 FBG 沿  $x(y)$  轴的有效折射率变化的均值,  $\lambda$  是波长,  $L$  是光栅长度,  $\nu$  是干涉图样的对比度,  $\lambda_B$  是布拉格波长, 定义为

$$\lambda_{B,x(y)} = 2n_{\text{eff},x(y)} \Lambda, \quad (9)$$

式中  $\Lambda$  是光栅周期,能量反射系数可表示为

$$r_{x(y)} = |\rho_{x(y)}|^2 = \frac{\sinh^2[\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L]}{\cosh^2[\sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L] - \frac{\hat{\sigma}_{x(y)}^2}{\kappa_{x(y)}^2}}. \quad (10)$$

与反射系数  $\rho_{x(y)}$  相应的谐振波长由(11)式给出:

$$\lambda_{\text{max},x(y)} = 2[n_{\text{eff},x(y)} + \overline{\delta n_{\text{eff}}}] \Lambda. \quad (11)$$

光栅的两本征模对应的谐振峰分开的最大波长量为  $\Delta\lambda = 2\Delta n \Lambda$ 。实际上,由于一般光致双折射的

大小量级在  $10^{-6}$  和  $10^{-5}$  之间,所以  $\rho_x(\lambda)$  和  $\rho_y(\lambda)$  之间的光谱漂移只有几个皮米,从而此双折射对反射谱的影响很小。

反射光  $E_{\text{total},r}$  是  $x$  和  $y$  模反射光的合成,由(3)式可得

$$E_{\text{total},r} = \sqrt{(\rho_x E_{i,x})^2 + (\rho_y E_{i,y})^2}, \quad (12)$$

考虑到输入光的偏振态是由相应参考角  $\varphi$  决定的线偏振态[对应(4)式取  $M_x = \cos \varphi$ ,  $M_y = \sin \varphi$  和  $\phi_x = \phi_y = 0$ ],总的反射系数  $R_{\text{total},\varphi}$  可表示成

$$R_{\text{total},\varphi} = \frac{(\rho_x E_{i,x})^2 + (\rho_y E_{i,y})^2}{(E_{i,x})^2 + (E_{i,y})^2} = \cos^2(\varphi)r_x + \sin^2(\varphi)r_y, \quad (13)$$

特别是当入射光的  $\varphi$  为  $\pi/4$  的线偏振光时,入射光在两本征模方向上的分量相等,总反射系数可简化为  $R_{\text{total},\pi/4} = r_x/2 + r_y/2$ 。图1给出了  $R_{\text{total},\pi/4}$ ,  $r_x$  和  $r_y$  随波长的变化,其对应的光栅结构参数为  $\Lambda = 530.72 \text{ nm}$ ,  $L = 5 \text{ mm}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 2 \times 10^{-4}$ ,  $\Delta n = 7 \times 10^{-6}$ 。两个本征模对应的谐振峰分开的最大波长量  $\Delta\lambda$  为  $7.47 \text{ pm}$ ,这个值是相当小的,很难在反射谱中显示出来。

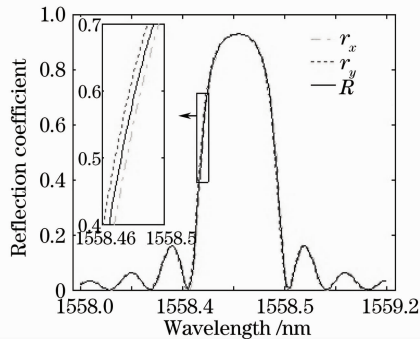


图1  $R_{\text{total},\pi/4}$ ,  $r_x$  和  $r_y$  随波长的变化

Fig. 1 Relation of reflection coefficients  $r_x$ ,  $r_y$  and  $R_{\text{total},\pi/4}$  with wavelength

## 2.2 偏振相关损耗

光学系统的 PDL( $P_{\text{DL}}$ )描述的是光学系统对传输光的偏振态的敏感程度。PDL 定义为对应等光强的所有可能输入偏振态的最大传输和最小传输的比例。PDL 一般用 dB 来表示为<sup>[14]</sup>

$$P_{\text{DL}}(\lambda) = 10 \lg \frac{P_{\text{max}}(\lambda)}{P_{\text{min}}(\lambda)}, \quad (14)$$

式中  $P_{\text{max}}$  和  $P_{\text{min}}$  分别为最大和最小功率。

对一般光纤来说,其 PDL 是非常小( $\leq 0.1 \text{ dB}$ ),可忽略。作为反射元件的 FBG,PDL 可以表示成

$$P_{\text{DL}}(\lambda) = 10 \lg \frac{R_{\text{max}}(\lambda)}{R_{\text{min}}(\lambda)}, \quad (15)$$

式中  $R_{\text{max}}$  和  $R_{\text{min}}$  表 FBG 的最大和最小反射光强。

光学器件的  $R_{\text{max}}$  和  $R_{\text{min}}$  的计算在文献[14,16]中有详述,在此运用其中的方法得出具有一定双折射的 FBG 的  $R_{\text{max}}$  和  $R_{\text{min}}$ ,表示为

$$\begin{aligned} R_{\text{max}} &= r_x + r_y + |r_x - r_y|, \\ R_{\text{min}} &= r_x + r_y - |r_x - r_y|, \end{aligned} \quad (16)$$

因而 PDL 可表示为

$$P_{\text{DL}}(\lambda) = \left| 10 \lg \frac{r_x(\lambda)}{r_y(\lambda)} \right|, \quad (17)$$

(17)式给出的 PDL 与绝对光强无关,但实际的实验测试都有赖于实际光强(光强太弱仪器测不到)。为此,引入一更实际有效的 PDL,即  $P_{\text{DL,eff}}$ ( $P_{\text{DL,eff}}$ ):

$$P_{\text{DL,eff}}(\lambda) = R_{\text{total}}(\lambda) \left| 10 \lg \frac{r_x(\lambda)}{r_y(\lambda)} \right|, \quad (18)$$

式中  $R_{\text{total}}(\lambda) = r_x(\lambda)/2 + r_y(\lambda)/2$ 。图2(a)给出的是一非切趾的均匀 FBG 的  $R_{\text{total}}$ ,  $P_{\text{DL}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  随波长的变化,相应光栅参数为  $\Lambda = 530.72 \text{ nm}$ ,  $L = 10 \text{ mm}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 1 \times 10^{-4}$ ,  $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$ 。

$P_{\text{DL}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  的变化由相应的  $x$  和  $y$  模的反射谱决定,两反射谱的差异越大,  $P_{\text{DL,eff}}$  的值就越大,差异越小相应  $P_{\text{DL,eff}}$  的值就越小。  $P_{\text{DL,eff}}$  在反射带的带边处出现峰值,在反射带的中心出现极小值。零值出现在使  $r_x(\lambda_m) = r_y(\lambda_m)$  的波长  $\lambda_m$  处,主要出现在反射带的中间位置。

为说明切趾影响,图2(b)给出了相应的切趾光栅的  $R_{\text{total}}$ ,  $P_{\text{DL}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  随波长的变化情况。图2(b)中的光栅采用‘升余弦’切趾<sup>[15]</sup>,其它参数与图2(a)的参数完全相同,其半峰全宽(FWHM)为  $10 \text{ nm}$ 。从图2中可以已看出,切趾与非切趾的  $P_{\text{DL}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  曲线十分相似,差异主要是切趾的  $P_{\text{DL,eff}}$  的旁瓣如同  $R_{\text{total}}$  的旁瓣一样得到了抑制,另外切趾的谱线向短波方向有一定的展开,因而下面第3节中只给出非切趾的模拟结果。

## 3 FBG 的物理参数对 $P_{\text{DL,eff}}$ 的影响

利用上述的理论模型,分析了 FBG 的长度、调制深度和引入的双折射量值等物理参数对其  $P_{\text{DL,eff}}$  量值的影响。本节给出的结果都是利用(13)式和(18)式得到的,计算参数为  $\varphi = \pi/4$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.4682$ ,  $\Lambda = 530.72 \text{ nm}$ ,  $v = 1$ 。

### 3.1 光栅长度对 $P_{\text{DL,eff}}$ 的影响

图3给出了不同光栅长度情况下反射谱  $R_{\text{total}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  随波长的变化情况,  $\Delta n = 7 \times 10^{-6}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 2 \times 10^{-4}$ ,  $L = 2 \sim 14 \text{ mm}$ 。可以看到光栅长度  $L$  对反射谱  $R_{\text{total}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  有明显的影。值得特别注意的是在

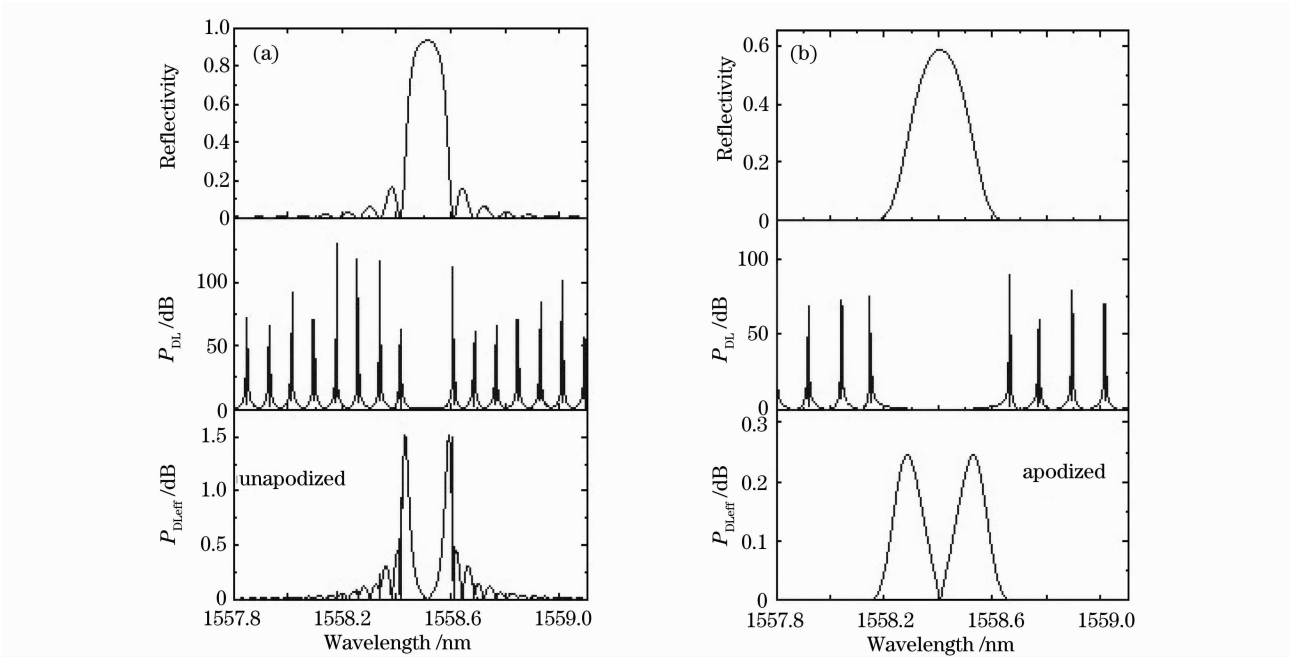


图 2 非切趾 FBG (a)和切趾 FBG(b)的  $R_{total}$  和对应的  $P_{DL}$ ,  $P_{DL,eff}$  曲线

Fig. 2  $R_{total}$  and  $P_{DL}$ ,  $P_{DL,eff}$  curve for an unapodized FBG (a) and an apodized FBG (b)

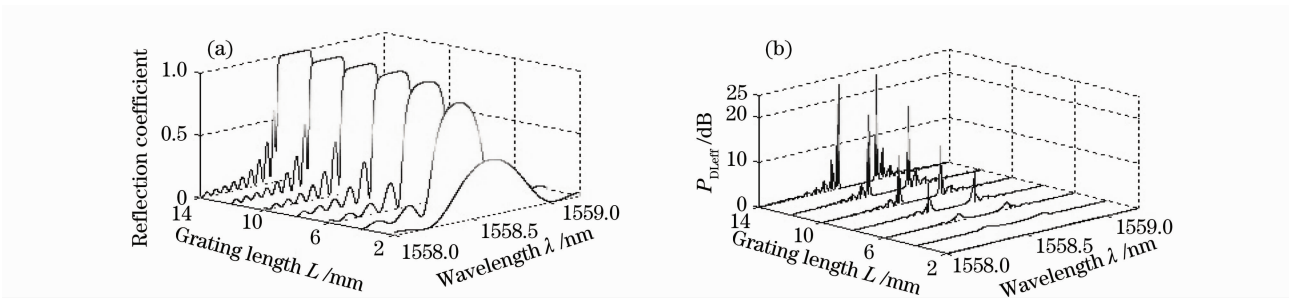


图 3 不同光栅长度  $L$  下 (a)  $R_{total}$  和 (b)  $P_{DL,eff}$  随波长的变化

Fig. 3 Evolution of (a)  $R_{total}$  and (b)  $P_{DL,eff}$  as a function of wavelength for different grating length

$L$  取 6~14 mm 时,  $R_{total}$  的变化不很明显,  $P_{DL,eff}$  却增大了将近 2 个数量级。主要是因为随着光栅长度的增加, 光栅的反射率增加, 带边变陡, 但两反射模之间的波长差异不变, 所以边带处两正交模的反射率差异变大, 导致  $P_{DL,eff}$  迅速增加。

### 3.2 折射率调制深度的影响

光栅的反射带宽随调制深度的增加而变宽, 同

时反射率提高, 带边变陡。相应的  $P_{DL,eff}$  的两个主峰值之间的距离增大, 同时峰值也随之迅速增加, 如图 4 所示, 其对应的光栅长度为  $L=8$  mm, 双折射为  $\Delta n=20 \times 10^{-6}$ , 调制深度取  $\overline{\delta n_{eff}}=[1 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-4}]$ 。另外由(11)式可知, 随着调制深度  $\overline{\delta n_{eff}}$  的增加反射峰将出现红移, 相应的  $P_{DL,eff}$  的峰值也随之红移。

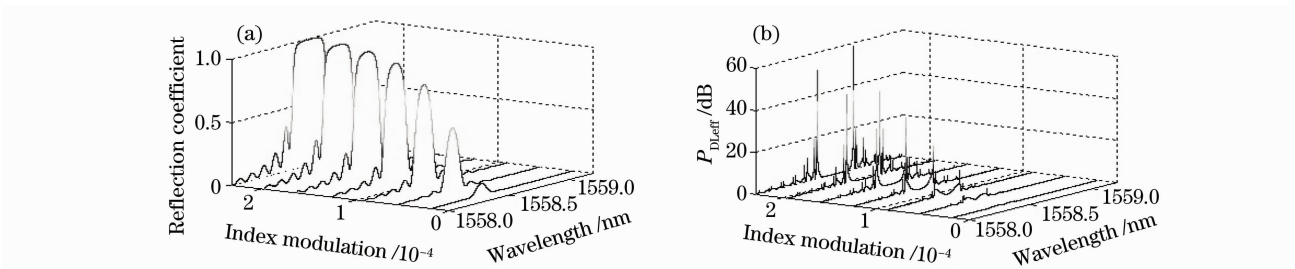


图 4 不同调制深度下 (a)  $R_{total}$  和 (b)  $P_{DL,eff}$  随波长的变化

Fig. 4 Evolution of (a)  $R_{total}$  and (b)  $P_{DL,eff}$  as a function of wavelength for different index modulation depth

## 4 双折射量值的影响

图 5 给出了光栅中双折射量值对其反射谱  $R_{\text{total}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  的影响,对应的  $L=8\text{ mm}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=2\times 10^{-4}$ ,  $\Delta n=[1\times 10^{-6}\sim 400\times 10^{-6}]$ 。结果表明,当双折射的值  $\Delta n$  小于  $20\times 10^{-6}$  时,由于  $x$  和  $y$  模的反射谱的重叠,双折射对总反射谱的影响可以忽略,但它对  $P_{\text{DL,eff}}$  的影响却非常巨大,这在图 5(c), (d) 中可以看出。随着  $\Delta n$  不断增加,  $x$  和  $y$  模的反射谱不断错

位,从而对总反射谱的影响也就表现了出来。当  $\Delta n$  足够大( $250\times 10^{-6}$ ) 时,总反射谱将完全分裂为两个峰,此时  $P_{\text{DL,eff}}$  的两个峰变得宽大并在其上出现子峰,小峰是由于两正交模的的旁瓣造成。如果  $\Delta n$  继续增大,两反射峰间的距离随之增大,而  $P_{\text{DL,eff}}$  的双峰间距增大的同时,其上的子峰相对变小,这是偏离主反射峰越远的地方的旁瓣也越弱的缘故,这在图 5(a), (b) 中很明显。

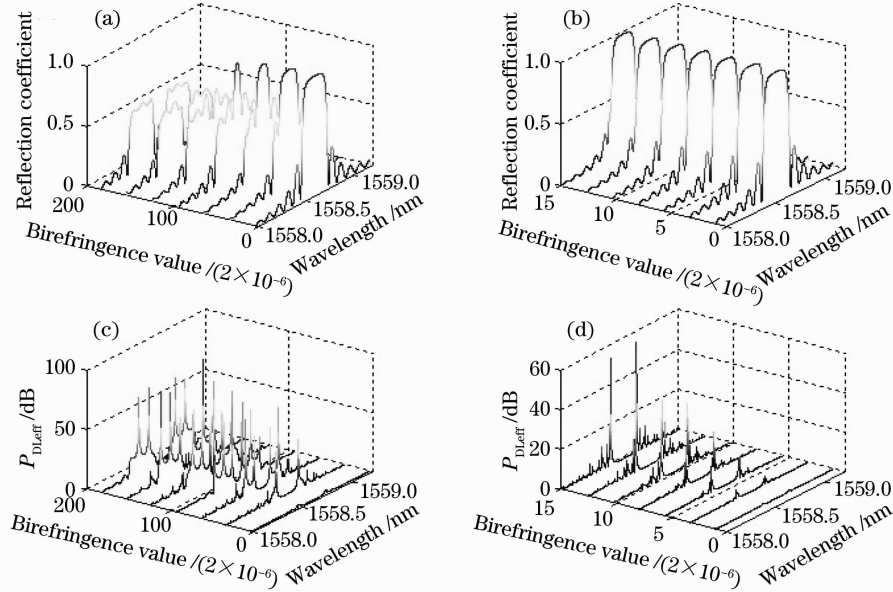


图 5 不同双折射  $\Delta n$  下 (a)  $R_{\text{total}}$  和 (b)  $P_{\text{DL,eff}}$  随波长的变化

Fig. 5 Evolution of (a)  $R_{\text{total}}$  and (b)  $P_{\text{DL,eff}}$  as a function of wavelength for different birefringence value

## 5 实验结果

下面给出切趾和非切趾光栅的实验结果。为了验证前文的结果,测了两个用康宁 SMF-28 光纤写制的 FBG, 其中一个切趾的, 另一个是非切趾的。

实验装置如图 6 所示, 其中 Agilent 81980A 集成可调谐激光模块与 Agilent 8163B 光波多用表一起提供可调谐的全偏振激光, Agilent A2000 component analyzer (N7788A) 用来测量 FBG 的反射谱和相应的 PDL, 其分辨率设置是 1 pm。利用 (18) 式得到对应的  $P_{\text{DL,eff}}$  如图 7 所示。

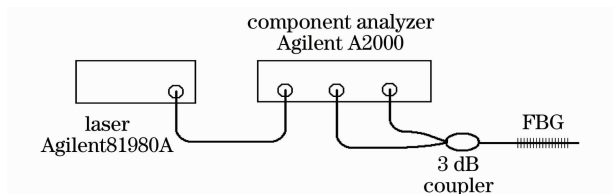


图 6 实验装置简图

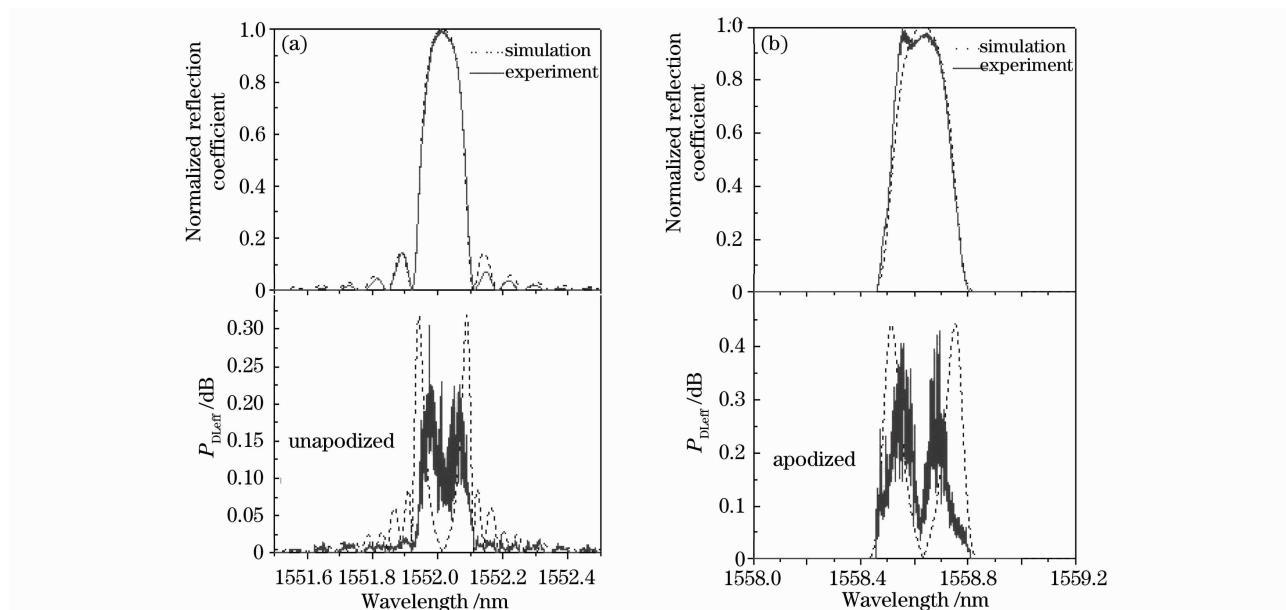
Fig. 6 Experimental setup

为了确认实验结果与理论的一致, 利用参数重构模拟了 FBG 的反射谱和通过调整模拟用的折射率调制深度和双折射值(定制的光栅长度为非切趾的  $L=10\text{ mm}$ , 切趾的  $L=14\text{ mm}$ ) 来使模拟结果与实验结果尽量一致。对于非切趾的光栅模拟结果是  $\Delta n=1.23\times 10^{-6}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=0.88\times 10^{-4}$  和  $\Lambda=528.512\text{ nm}$ 。相应的反射谱和  $P_{\text{DL,eff}}$  的模拟和实验结果如图 7(a) 所示。切趾光栅的模拟结果是  $\Delta n=4\times 10^{-6}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=1.16\times 10^{-4}$  和  $\Lambda=530.797\text{ nm}$ , 结果如图 7(b) 所示。从图 7 中可以看到实验和模拟的结果基本一致, 说明了理论分析的正确性。

## 6 结 论

通过理论和实验研究给出了研究 FBG 反射偏振相关损耗的有效途径, 以及写于 SMF-28 光纤的 FBG 的  $P_{\text{DL,eff}}$  相应特性。利用耦合模理论和 Jones 矩阵分析了 FBG 的反射 PDL 随波长的变化, 提出了



图 7 非切趾(a)和切趾(b)光栅的  $R_{\text{total}}$  和  $P_{\text{DL,eff}}$  随波长的变化Fig. 7 Evolution of  $R_{\text{total}}$  and  $P_{\text{DL,eff}}$  of unapodized (a) and apodized (b) gratings with wavelength

FBG 的  $P_{\text{DL,eff}}$ , 并对其进行了相应的分析。尽管 FBG 的 PDL 是由双折射引起的, 但分析表明 FBG 的  $P_{\text{DL,eff}}$  也直接受光栅的长度和调制深度等物理参数的影响。

全面地理论分析了 FBG 的  $P_{\text{DL,eff}}$  特性, 并给出了与之吻合的实验结果。对于写于 SMF-28 光纤的 FBG 来说, 其双折射主要是由调制过程中光致折射率的变化不均匀性造成的, 由于其值一般来说很小, 无法从其反射谱上获得相应的信息。本文的研究提供了一种检测小量值双折射的方法。随着光纤光栅在光纤通信和传感器系统发展, 本文研究结果对 FBG 的应用和开发应会有一些帮助。

## 参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 2 Ma Weitao, Zhou Jun, Xu Tiefeng *et al.*. Design of optical filter with multi-concatenated linear chirped fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1284~1289  
马伟涛, 周 骏, 徐铁峰等. 多级联线性啁啾光纤光栅梳状滤波器的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1284~1289
- 3 Pei Li, Zhao Ruifeng, Ning Tigang *et al.*. Wavelength-division demultiplexer based on FBG coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 308~311  
裴 丽, 赵瑞峰, 宁提纲等. 基于光纤光栅辅助耦合的 WDM 下话路研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 308~311
- 4 Feng Suchun, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser using polarization-maintaining fiber Bragg gratings in symmetrical linear cavities [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1886~1889  
冯素春, 许 鸥, 鲁韶华等. 基于保偏光纤光栅的对称腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1886~1889
- 5 Li Chuanqi, Zhou Xu, Zhu Yingchun *et al.*. The spectral analysis of the fiber grating arrays encoder/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3277~3281  
李传起, 周 谔, 朱迎春等. 光纤光栅阵列编解码器反射谱性能研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3277~3281
- 6 Z. N. Wang, C. J. Xie, X. M. Ren. PMD and PDL impairments in polarization division multiplexing signals with direct detection[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 7993~8004
- 7 S. T. Oh, W. T. Han, U. C. Paek *et al.*. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(4): 724~729
- 8 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of magnetic field sensor with phase-shifted grating based on the polarization properties[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 763~769  
冯 奎, 朱 勇, 苏 洋等. 基于偏振特性的相移光栅磁场传感方法分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 763~769
- 9 S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Spectral characterization of differential group delay in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 9954~9960
- 10 C. Caucheteur, P. Megret, T. Ernst *et al.*. Polarization properties of fibre Bragg gratings inscribed by high-intensity femtosecond 264 nm pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **271**: 303~308
- 11 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina *et al.*. Influence of the grating parameters on the polarization properties of fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(8): 1000~1010
- 12 M. Wuilpart, C. Caucheteur, S. Bette *et al.*. Polarization properties of uniform fiber Bragg gratings written in highly birefringent fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**: 239~245
- 13 C. Caucheteur, M. Wuilpart, S. Bette *et al.*. Wavelength dependency of degree of polarization for uniform Bragg gratings written into polarization maintaining optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**: 325~333
- 14 S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Theoretical and experimental study of differential group delay and polarization dependent loss of Bragg gratings written in birefringent fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**: 331~337
- 15 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**: 277~1294
- 16 P. Lu, D. S. Waddy, S. J. Mihailov. Characterization of the growths of UV-induced birefringence in effective mode index and index modulation in fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J. Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**: 2337~2339