

光栅参数对线性啁啾光纤光栅偏振特性的影响

郭炳霞 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 研究了单模线性啁啾光纤光栅的偏振相关损耗特性。运用耦合模理论和传输矩阵分析法推出了反射光的偏振相关损耗,并模拟了光栅的反射谱和偏振相关损耗随光栅参数和双折射量的变化曲线。模拟显示双折射值的变化对啁啾光栅偏振相关损耗的影响非常显著,尤其是在带边比较陡峭时。啁啾光栅的偏振相关损耗也受光栅的啁啾系数和调制深度的影响。这表明线性啁啾光栅的偏振相关损耗不光依赖光栅双折射量,还依赖其啁啾系数等其他参数。实验结果与理论模拟基本吻合。

关键词 光栅;线性啁啾光纤光栅;偏振相关损耗;耦合模理论;传输矩阵;双折射

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s105004

Influence of Grating Parameters on Polarization Properties of Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings

Guo Bingxia Li Qianghua

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

Abstract The wavelength dependency of polarization dependent loss (PDL) in reflection in linearly chirped fiber Bragg gratings (CFBGs) written in single mode fibers is studied. Using the coupled theory and transfer matrix, the evolution with wavelength of PDL as a function of the grating parameters and the birefringence value is analyzed. And simulation results show that the chirped grating polarization dependent loss is very significant as the birefringence changes, especially with steep sides. The chirp grating PDL is also affected by the chirp grating coefficient and the modulation depth, which indicates that the linear chirped grating polarization dependent loss is not only dependent on the grating birefringence, but also dependent on other parameters of the chirp coefficient and other parameters. Theoretical analysis and experimental results are matchable to each other.

Key words gratings; linearly chirped fiber Bragg grating; polarization dependent loss; coupled mode theory; transfer matrix; birefringence

OCIS codes 260.5430; 060.3735; 060.2340

1 引言

随着光纤通信逐步向高速度大容量的方向发展,光纤通信系统对各种偏振效应的敏感度不断增加,作为重要器件的啁啾光纤光栅(CFBG),其偏振特性研究的重要性日益显著,因此对 CFBG 的偏振特性的研究也变得尤为重要。在大多数情况下,CFBG 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更为重要。国外对 CFBG 的研究主要有,利用高低双折射和弯曲状啁啾光栅进行色散补偿^[1~3]以及 CFBG 在传感器和波分复用的应用^[4,5];国内对 CFBG 的研究主要是利用其制作出波长可调谐的带通滤波器^[6~8],利用 CFBG 的温度不敏感性制作压力加速传感器^[9]。虽然 CFBG 在偏振相关方面的应用有很大

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-02-21

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(A200910)资助课题。

作者简介: 郭炳霞(1977—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅偏振特性方面的研究。

E-mail: woaiwojia760321@163.com

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)

的开发潜力。但目前就作者所知,国内外还未见有定性分析光栅的结构参数对CFBG偏振相关损耗(PDL)的响应的文章。这也给相关类型器件的设计及优化造成了限制。

本文基于耦合模理论和传输矩阵理论分析了双折射CFBG的反射PDL随波长变化的特性,推导出明确的CFBG波长相关的PDL解析表达式。通过模拟计算相应的反射谱以及PDL随波长变化的曲线,比较了不同结构参数和双折射的偏振效应。实验结果为理论提供了有力的支持。

2 理论模型

在常规CFBG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匀,这种折射率分布的不均匀即形成了光致双折射^[10]。光致双折射和光纤固有的双折射组成了CFBG的双折射 Δn 。具有双折射的CFBG的两个本征模(x 和 y),其有效折射率可以写成

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

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

式中 n_{eff} 为纤芯平均射率, Δn 为光栅写好的后的光栅双折射。

2.1 双折射CFBG的反射谱

CFBG是指光纤纤芯折射率变化的周期沿光纤轴向逐渐变化的一种光纤光栅,需要在理论上建立相应的模型。由于双折射的存在,光纤光栅两个偏振方向的本征模具有不同的耦合系数,从而CFBG的反射系数有两个,分别对应于 x 模和 y 模。对于Bragg光纤光栅,模式耦合主要发生在正向模和反向模之间,它们满足耦合模方程。由于CFBG耦合模方程没有解析解,因此可利用矩阵分析法来分析光栅的反射特性^[11]。用矩阵 $\mathbf{F}_{x(y)i-1}$ 来描述第 i 个光栅段的传输特性,假设 $R_{x(y)i}$ 和 $S_{x(y)i-1}$ 分别为正、反向传输模式经过第 i 段光栅传输后的光场幅度,那么它和经过第 $i-1$ 段光栅传输后的光场幅度 $R_{x(y)i-1}$ 和 $S_{x(y)i-1}$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} R_{x(y)i} \\ S_{x(y)i} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{x(y)i} \begin{bmatrix} R_{x(y)i-1} \\ S_{x(y)i-1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

知道所有光栅段的传输特性矩阵 $\mathbf{F}_{x(y)i}$ 后,就可以得到整个光栅的传输特性矩阵。其中

$$\begin{bmatrix} R_{x(y)M} \\ S_{x(y)M} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{x(y)} \begin{bmatrix} R_{x(y)M0} \\ S_{x(y)M0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{x(y)i} = \begin{bmatrix} F_{x(y)11} & F_{x(y)12} \\ F_{x(y)21} & F_{x(y)22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{x(y)} = F_{x(y)M} \cdot F_{x(y)(M-1)} \cdots F_{x(y)j} \cdots F_{x(y)1}, \quad (4)$$

对于均匀光纤布拉格光栅,其传输矩阵为

$$\mathbf{F}_{x(y),j} = \begin{bmatrix} \cosh[\gamma_{x(y)} \Delta z] - i \frac{\hat{\sigma}_{x(y)}}{\gamma_{x(y)}} \sinh[\gamma_{x(y)} \Delta z] & -i \frac{\kappa_{x(y)}}{\gamma_{x(y)}} \sinh[\gamma_{x(y)} \Delta z] \\ i \frac{\kappa_{x(y)}}{\gamma_{x(y)}} \sinh[\gamma_{x(y)} \Delta z] & \cosh[\gamma_{x(y)} \Delta z] + i \frac{\hat{\sigma}_{x(y)}}{\gamma_{x(y)}} \sinh[\gamma_{x(y)} \Delta z] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $R_{x(y)M}$ 为 $x(y)$ 方向上的反射振幅, $S_{x(y)M}$ 为 $x(y)$ 方向的入射振幅, $R_{x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上的整个光栅的传输特性矩阵, Δz 为光栅段的长度, $\kappa_{x(y)}$ 为交流耦合系数, $\hat{\sigma}_{x(y)}$ 为自流耦合系数,

$$\gamma_{x(y)} = \sqrt{\kappa_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2}, \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff},x(y)} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d\varphi}{dn_{\text{eff}}} - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}. \quad (7)$$

利用(4)式求得啁啾光栅反射系数为

$$\rho_{x(y)} = S_{x(y)M}/R_{x(y)M} = F_{x(y)21}/F_{x(y)11}, \quad (8)$$

$x(y)$ 方向上的反射谱为

$$r_{x(y)} = |\rho_{x(y)}|^2. \quad (9)$$

根据文献^[12],总反射系数可化简为: $R_{\text{total}} = r_x/2 + r_y/2$ 。

2.2 偏振相关损耗

根据2.1节及偏振相关损耗的定义^[13]即可求

得啁啾光栅的偏振相关损耗的定义式:

$$L_{\text{PD}}(\lambda) = 10 \lg[S_{x(y)M}/R_{x(y)M}] = 10 \lg[F_{x(y)21}/F_{x(y)11}]. \quad (10)$$

根据(10)式并在符合相关材料参数的情况下模拟出CFBG总的反射功率和PDL随波长变化的曲线,参数为: $n_{\text{eff}} = 1.45$, $\Delta n = 20 \times 10^{-6}$, $\overline{dn}_{\text{eff}} = 6 \times 10^{-4}$, $c = 1.5 \times 10^{-7}$, $L = 10$ mm。如图1(a)所示,两个模式(x 模和 y 模)的差异非常小,很难在反射谱显现出来,但从图1(b)可以看出,由双折射引起的PDL却很大,可见双折射对PDL影响很大。PDL在反射带的中心偏振极小,而在反射带的带边处出现峰值。原因可由PDL定义可知,PDL由相应的 x 和 y 模的反射谱决定,在某一波长处 x 模和 y 模的反射能量差异越大,其相应的PDL就越大,差异越小相应PDL的值就越小。

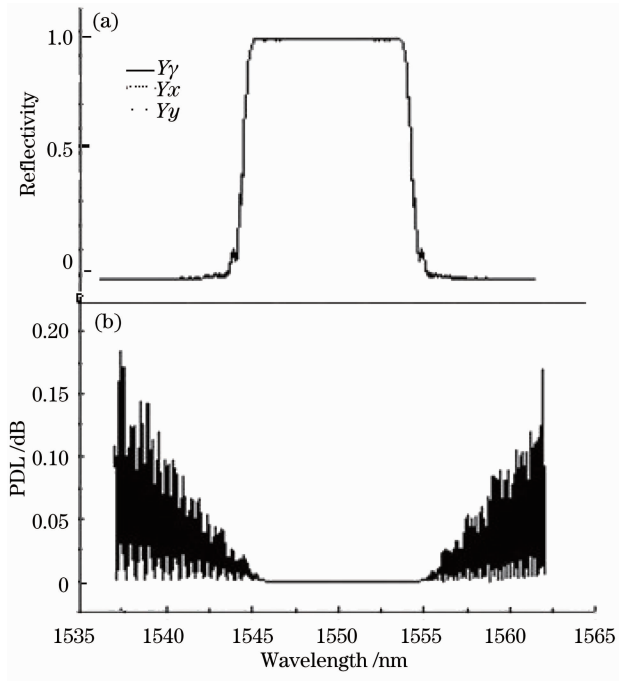


图1 CFBG的 R_{total} (a)和对应的PDL(b)曲线
Fig.1 R_{total} (a) and PDL (b) curve for CFBG

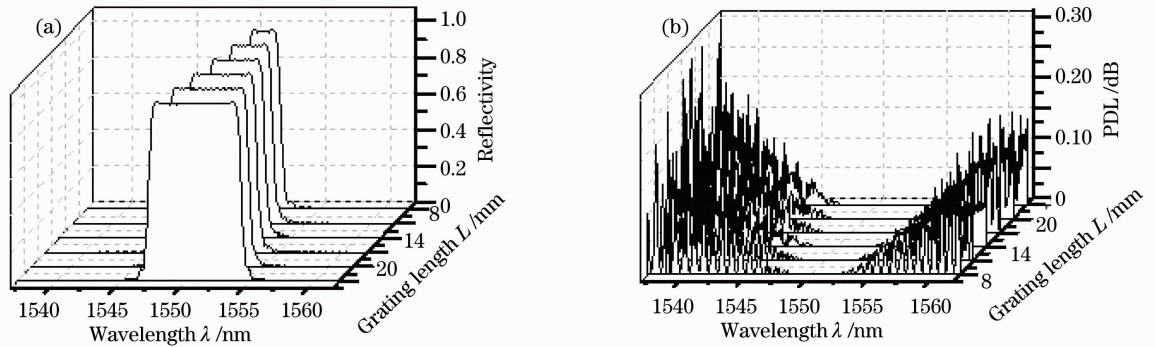


图2 不同光栅长度 L 下 R_{total} (a)和PDL(b)随波长的变化曲线

Fig.2 R_{total} (a) and PDL (b) evolution as a function of wavelength in different modulation index value

3.2 折射率调制深度的影响

图3是其他参数不变时不同光栅调制深度下的啁啾光栅的反射谱 R_{total} 和PDL随波长的变化情况。参数为： $n_{\text{eff}}=1.45$, $\Delta n=2 \times 10^{-5}$, $L=10$ mm, $c=2.5 \times 10^{-7}$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=[4 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4}]$ 。得出光栅的调制深度增大时，反射带宽增大，并且稍向长波方向移动，反射谱中心部分抖动变弱。反射率增大，PDL稍有变大，并且也相应地有少许向长波方向移动。双峰的间距有少许变宽。

3.3 啁啾系数对PDL的影响

图4是其他参数不变时不同啁啾系数下CFBG的反射谱 R_{total} 和PDL随波长的变化情况。参数为： $n_{\text{eff}}=1.45$, $\Delta n=2 \times 10^{-5}$, $L=10$ mm, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=8 \times$

3 CFBG的物理参数对PDL的影响

利用2节的理论，分析了CFBG的长度、调制深度、啁啾系数和引入的双折射量值等物理参数对其反射谱 R_{total} 和PDL值的影响。这部分给出的结果都是利用(9)、(10)式得到的。

3.1 光栅长度对PDL的影响

图2是其他参数不变时不同光栅长度啁啾光栅的反射谱 R_{total} 和PDL随波长的变化情况。参数为： $n_{\text{eff}}=1.45$, $\Delta n=2 \times 10^{-5}$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=6 \times 10^{-4}$, $c=2.5 \times 10^{-7}$, $L=8 \sim 23$ mm。可以看出光栅的长度 L 增大时，反射带宽增大，反射谱中心部分抖动变弱。但最大反射率不发生变化。由于反射率没有变化，所以反射模之间的波长差异不变，根据PDL的定义可知PDL大小不发生变化。正如图2所示，由于啁啾光栅的3 dB带宽变大，相应的偏振损耗的极值会出现在相应的带边处，所以PDL双峰的间隔变大了。

10^{-4} 。 $c=[1.5 \times 10^{-4} \sim 3.5 \times 10^{-4}]$ ，从图4(a)看出随啁啾系数变大光栅的带宽变宽但反射率却降低了，同时反射谱中心抖动更严重。由于反射率降低，带边由陡峭逐渐变得平缓，如图4(b)所示，啁啾光栅的PDL迅速变小，并且两个峰值的距离变大。

3.4 双折射量对PDL的影响

图5是其他参数不变时不同双折射值 Δn 下反射谱 R_{total} 和PDL的变化曲线。参数为： $n_{\text{eff}}=1.45$, $L=10$ mm, $c=1 \times 10^{-7}$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=6 \times 10^{-4}$, $\Delta n=[1 \times 10^{-5} \sim 4.1 \times 10^{-4}]$ 。随双折射值的改变，其反射谱谱形基本不发生变化。如图5(a)所示，反射谱重合。然而双折射的改变对啁啾光栅反射偏振相关损耗影响很大。从图5(b)可以明显看出：随着双折射

值的变大,其 PDL 的峰值迅速变大,特别是在边带处。选定左右两个峰,从图 6 可以看出,随双折射的变化选定的两个峰对应的 PDL 的峰值对应的波长

位置不变(两个峰之间的距离不发生改变)。从图 7 可以看出随着双折射的变化其 PDL 的左右峰值呈很好的线性变化结果。

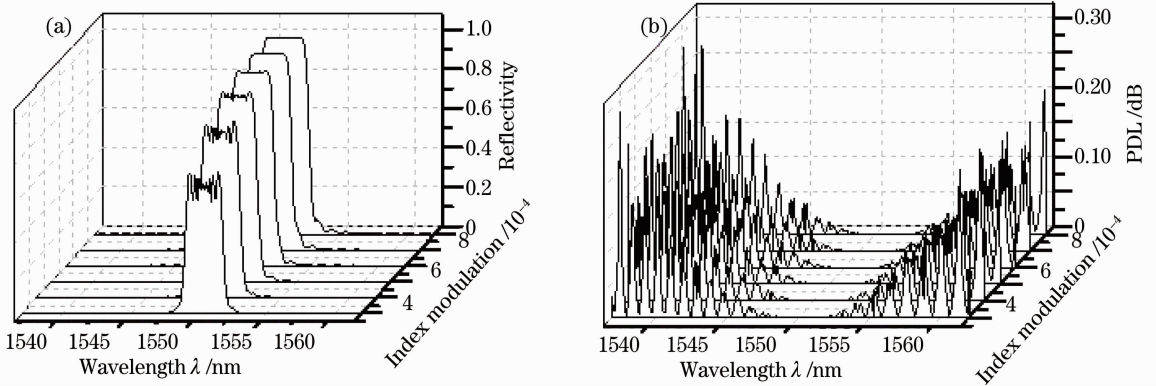


图 3 不同调制深度下 R_{total} (a)和 PDL (b)随波长的变化曲线

Fig. 3 R_{total} (a) and PDL (b) evolution as a function of wavelength in different modulation index value

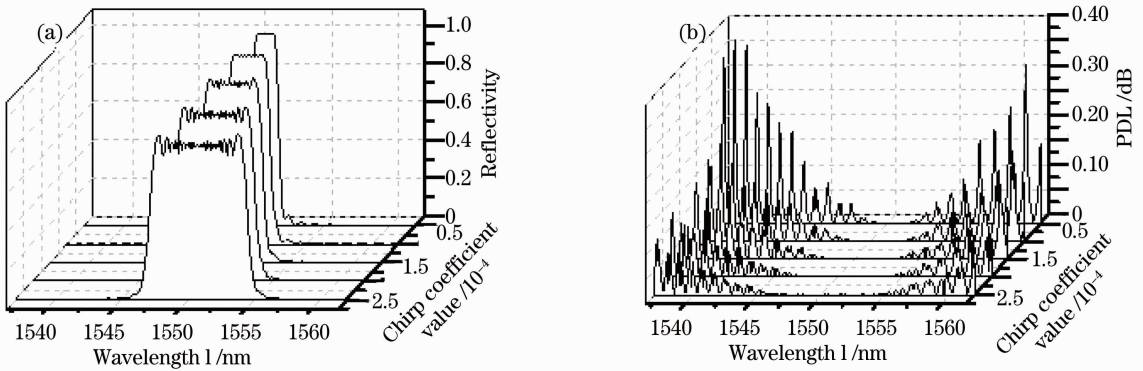


图 4 不同啾啉系数下 R_{total} (a)和 PDL (b)随波长的变化

Fig. 4 R_{total} (a) and PDL (b) evolution as a function of wavelength in different chirp coefficient

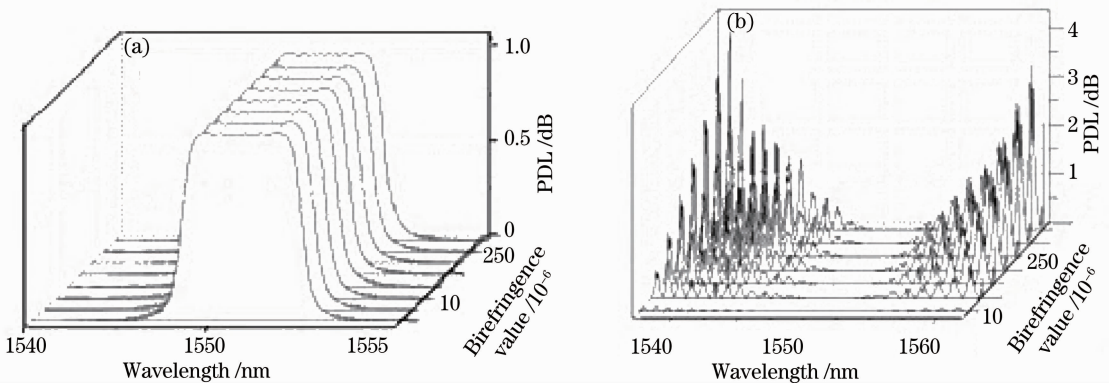


图 5 不同双折射 Δn 下 R_{total} (a) 和 PDL (b) 随波长的变化曲线

Fig. 5 R_{total} (a) and PDL (b) evolution as a function of wavelength in different birefringence

4 实验结果

实验装置如图 8 所示,其中 Agilent81980A 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

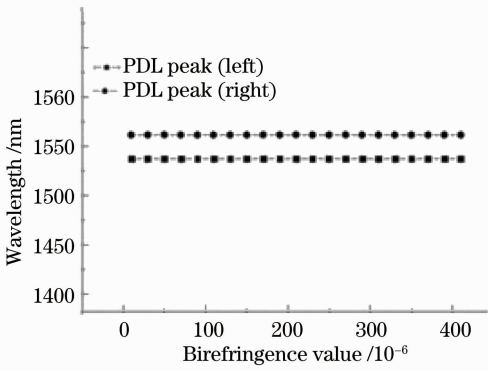


图 6 PDL 的左右对称峰值位置随双折射的变化曲线
Fig. 6 Curves of symmetrical peak position with birefringence

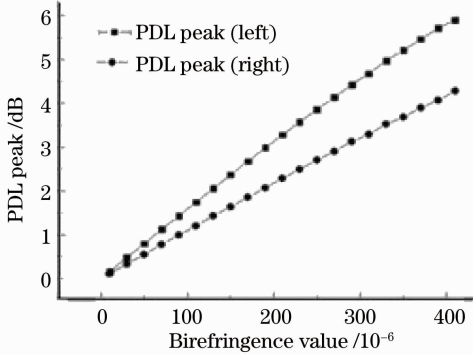


图 7 PDL 的左右对称峰值随双折射的变化曲线
Fig. 7 Curves of symmetrical peak around with birefringence

Component Analyzer (N7788A) 用来测量 CFBGs 的反射谱和相应的 PDL。为了确认实验结果与理论一致,测量选用的单模光纤光栅为康宁 SMF-28 光纤写制的 CFBG。其中 $n_{\text{eff}}=1.4582, L=10 \text{ mm}, \lambda_0=1550.95 \text{ nm}$ 。测量结果如图 9(a)和(b)所示,分别为实验反射谱和对应的 PDL 随波长的变化曲线。从图 9 可以看到实验和模拟的图 1 基本一致,这说明了理论分析的正确性。

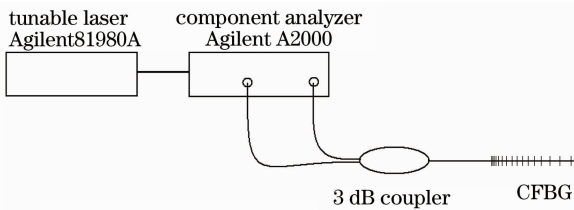


图 8 实验装置简图
Fig. 8 Experimental setup

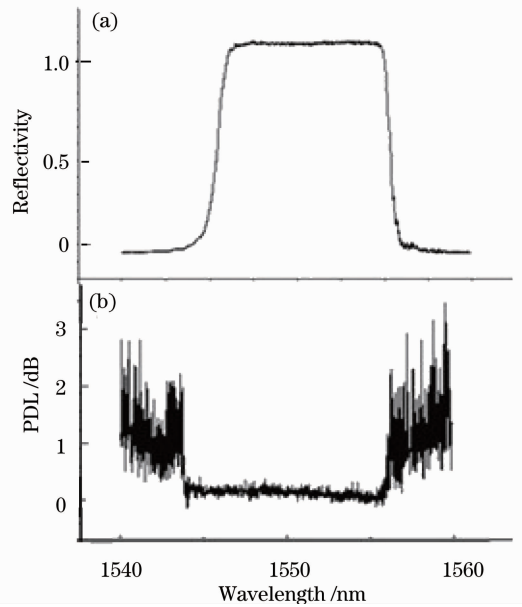


图 9 实验反射谱 R_{total} (a)和 PDL (b) 随波长的变化曲线
Fig. 9 Curves of reflection spectrum R_{total} (a) and PDL (b) changing with wavelength for the experiment

5 结 论

通过耦合模理论和传输矩阵理论分析了 CFBG 反射 PDL 随波长变化的关系,并模拟分析了 PDL 随光栅参数和双折射的变化。尽管 CFBG 的 PDL 是由双折射引起的,但分析表明 CFBG 的 PDL 也直接受光栅的啁啾系数和调制深度等物理参数的影响。双折射值对啁啾光栅的偏振相关损耗的影响非常显著,尤其是在带边比较陡峭时。PDL 的左右峰值随双折射的变化呈线性变化趋势。并且任意选定 PDL 的两峰之间的间距不发生改变。理论分析与实验结果基本符合。

参 考 文 献

- 1 Md. S. Islam, S. P. Majumder. Analytical performance evaluation of an adjustable PMD compensator using high-birefringence linearly chirped FBG[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, **121**(2): 168~173
- 2 J. Kwon, Y. Jeon, B. Lee. Tunable dispersion compensation with fixed center wavelength and bandwidth using a side-polished linearly chirped fiber Bragg grating[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2005, **11**(2): 159~166
- 3 R. Romero, O. Frazão, P. V. S. Marques *et al.*. Ring chirped fibre Bragg grating for dynamic dispersion compensation[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**(4-6): 417~423
- 4 S. C. Tjin, L. Mohanty, N. Q. Ngo. Pressure sensing with embedded chirped fiber grating [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **216**(1-3): 115~118

- 5 R. Romeroa, O. Frazão, F. Floreani *et al.*. Chirped fibre Bragg grating based multiplexer and demultiplexer for DWDM applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(9): 987~994
- 6 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. 多级联线性啾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
- 7 Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Wavelength tunable band-pass filter based on chirped fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 873~878
姜 萌, 张伟刚, 金 龙等. 基于啾啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 873~878
- 8 Zhongwei Tan, Yanhua Wang, Wenhua Ren *et al.*. Transmission system over 3000 km with dispersion ompensated by chirped fiber Bragg gratings[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2009, **120**(1): 9~13
- 9 Wenjun Zhou, Xinyong Dong, K. Ni *et al.*. Temperature-insensitive accelerometer based on a strain-chirped FBG [C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75033R
- 10 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 Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2337~2339
- 11 Wang Zhongqing, Dai Li, Xue Hao *et al.*. An investigation on the transmission properties of chirped and apodized fiber gratings [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(5): 54~56
汪仲清, 戴 笠, 薛 皓等. 啾啾光纤光栅的传输特性与切趾变迹研究[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(5): 54~56
- 12 Gao Shecheng, Li Qianghua. Characterization of polarization dependent loss in reflection in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0306004
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
- 13 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**(2): 331~337

栏目编辑: 李文喆