

低双折射均匀光纤布拉格光栅斯托克斯参量的研究

田春华^{1,2} 励强华¹ 郭炳霞¹ 高社成¹¹ 哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150025
² 齐齐哈尔医学院医学技术学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006

摘要 根据耦合模理论和琼斯矩阵与斯托克斯矢量的关系给出单模均匀光纤布拉格光栅(FBG)反射和透射斯托克斯参量公式,数值模拟出低双折射单模光纤均匀 FBG 在不同双折射值下反射和透射斯托克斯参量随波长变化的曲线。结果显示 4 个归一化斯托克斯参量中, s_1 关于中心波长 λ_0 呈反对称分布, S_0 , s_2 和 s_3 关于 λ_0 呈对称分布;双折射值增大谱线不产生漂移,但谱线反射带宽变窄,反射信号与透射信号斯托克斯参量振幅均有不同程度的变化,表明双折射值对斯托克斯参量的影响非常显著。测出单模光纤均匀 FBG 反射和透射斯托克斯参量随波长变化曲线,理论分析与实验结果基本符合。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;斯托克斯参量;耦合模理论;双折射

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.110601

Research on Stokes Parameters of Low-Birefringence Uniform Fiber Bragg Gratings

Tian Chunhua^{1,2} Li Qianghua¹ Guo Bingxia¹ Gao Shecheng¹

¹ Institute of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China
² Medical Technology Department, Qiqihar Medical University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China

Abstract Based on the coupled-mode theory and the relation between Jones matrix and Stokes vector, we give the formulas for reflected and transmitted Stokes parameters of low-birefringence single-mode uniform optical fiber Bragg grating (FBG). The curves of reflected and transmitted Stokes parameters versus wavelength of low-birefringence single-mode uniform FBG are simulated under different birefringence values. The results show that: among the four normalized Stokes parameters, s_1 is antisymmetric about the central wavelength λ_0 , S_0 , s_2 and s_3 are symmetric about λ_0 . Although spectral lines do not produce a drift, the bandwidth of reflected signals is narrowed with the growing of birefringence values. The Stokes amplitudes of reflected and transmitted signals have different changes. It is shown that birefringence values have significant influences on Stokes parameters. The curves of reflected and transmitted Stokes parameters versus the parameters of single-mode uniform FBG are measured. The theoretical analysis and experimental results coincide with each other.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; Stokes parameter; coupled-mode theory; birefringence

OCIS codes 060.3735; 060.2340; 260.5430

1 引言

随着光纤通信和光纤传感逐步向高速度大容量方向发展,光纤光栅作为光通信和光传感的重要器件,偏振和双折射研究日益显得重要。Wu^[1~4]研究了写在高双折射光纤上的均匀光纤布拉格光栅(FBG)

收稿日期: 2011-05-23; 收到修改稿日期: 2011-06-02; 网络出版日期: 2011-09-03

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(A200910)资助课题。

作者简介: 田春华(1980—),女,硕士研究生,讲师,主要从事光纤光栅偏振特性方面的研究。

E-mail: tianchunhua1980@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)

反射和透射斯托克斯参量随波长变化的特性。国内研究人员主要集中于研究斯托克斯参量的测量^[5,6], 还未见光纤内光的斯托克斯参量特性的报道。由于光束的斯托克斯参量的测量在理论上有着重大的意义, 因此本文对低双折射单模 FBG 斯托克斯参量特性进行了详细的分析。首先, 根据耦合模理论和琼斯矩阵与斯托克斯矢量的关系给出低双折射单模光纤均匀 FBG 反射和透射斯托克斯参量公式; 然后, 数值模拟出低双折射单模光纤均匀 FBG 反射和透射斯托克斯参量随光纤光栅双折射变化的曲线, 分析了低双折射单模光纤均匀 FBG 斯托克斯参量随光纤的物理参数双折射 Δn 的变化关系; 最后, 用 A2000 偏振控制分析仪测出低双折射单模光纤均匀 FBG 反射和透射斯托克斯参量随波长变化的曲线图。理论分析与实验结果基本符合。

2 理论分析

光纤双折射是指光纤中传输的两个相互正交模式(本征模式)之间具有不同的折射率, 即双折射是由于光纤的不对称性导致的。低双折射单模光纤写入的均匀 FBG 双折射系数在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 数量级, 其反射和透射信号中存在两个互相垂直的 x 和 y 偏振模式^[7]。以笛卡儿坐标系为参考系, 根据耦合模理论, 利用琼斯矩阵与斯托克斯参量的关系, 取简单可测的 $\pi/4$ 线偏振态。

斯托克斯参量的定义式为^[8]

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2, \quad (1)$$

$$s_1 = \frac{E_x^2 - E_y^2}{E_x^2 + E_y^2}, \quad (2)$$

$$s_2 = \frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_x^2 + E_y^2}, \quad (3)$$

$$s_3 = \frac{2E_x E_y \sin \delta}{E_x^2 + E_y^2}, \quad (4)$$

式中 E_x 为 x 模的振幅, E_y 为 y 模的振幅, δ 为 x 模和 y 模光矢量之间的夹角。

由(1)~(4)式可得出反射信号和透射信号的斯托克斯参量公式^[1,2]。反射信号的斯托克斯参量公式为

$$S_0 = \frac{1}{2} \kappa^2 \left[\frac{1}{\hat{\sigma}_x^2 + A_x^2 \cot^2 g^2(A_x L)} + \frac{1}{\hat{\sigma}_y^2 + A_y^2 \cot^2 g^2(A_y L)} \right], \quad (5)$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \kappa^2 \left[\frac{1}{\hat{\sigma}_x^2 + A_x^2 \cot^2 g^2(A_x L)} - \frac{1}{\hat{\sigma}_y^2 + A_y^2 \cot^2 g^2(A_y L)} \right], \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{\kappa^2 [A_x A_y \cot g(A_x L) \cot g(A_y L) + \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y]}{[\hat{\sigma}_x^2 + A_x^2 \cot^2 g^2(A_x L)][\hat{\sigma}_y^2 + A_y^2 \cot^2 g^2(A_y L)]}, \quad (7)$$

$$S_3 = \frac{\kappa^2 [A_y \hat{\sigma}_x \cot g(A_x L) - A_x \hat{\sigma}_y \cot g(A_y L)]}{[\hat{\sigma}_x^2 + A_x^2 \cot^2 g^2(A_x L)][\hat{\sigma}_y^2 + A_y^2 \cot^2 g^2(A_y L)]}, \quad (8)$$

式中 $A_{x(y)} = \frac{\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2}}{j}$, $\kappa = \frac{\pi \nu \delta n}{\lambda}$, $\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff}, x(y)} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{B, x(y)}} \right] + \frac{2\pi}{\lambda} \delta n$, $n_{\text{eff}, x} = n_{\text{eff}} + \frac{\Delta n}{2}$, $n_{\text{eff}, y} = n_{\text{eff}} - \frac{\Delta n}{2}$,

$\lambda_{B, x(y)} = 2n_{\text{eff}, x(y)} \Lambda$ 为布拉格波长, L 为光栅长度, Λ 为光栅周期, λ 为波长, Δn 为光纤的双折射, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, δn 为 FBG 的调制系数, ν 为条纹可见度。透射光的斯托克斯参量为

$$S_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\cos^2(A_x L) + \gamma_x^2 \sin^2(A_x L)} + \frac{1}{\cos^2(A_y L) + \gamma_y^2 \sin^2(A_y L)} \right], \quad (9)$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\cos^2(A_x L) + \gamma_x^2 \sin^2(A_x L)} - \frac{1}{\cos^2(A_y L) + \gamma_y^2 \sin^2(A_y L)} \right], \quad (10)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\cos(A_x L) \cos(A_y L) + \gamma_x \gamma_y \sin(A_x L) \sin(A_y L)}{[\cos^2(A_x L) + \gamma_x^2 \sin^2(A_x L)][\cos^2(A_y L) + \gamma_y^2 \sin^2(A_y L)]} \right\}, \quad (11)$$

$$S_3 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\gamma_y \cos(A_x L) \sin(A_y L) - \gamma_x \sin(A_x L) \cos(A_y L)}{[\cos^2(A_x L) + \gamma_x^2 \sin^2(A_x L)][\cos^2(A_y L) + \gamma_y^2 \sin^2(A_y L)]} \right\}, \quad (12)$$

式中 $\gamma_{x(y)} = \frac{\hat{\sigma}_{x(y)}}{A_{x(y)}}$, 在以下讨论中, 采用归一化斯托克斯参量 $s_i = \frac{S_i}{S_0}$ ($i = 1, 2, 3$)。

3 双折射对斯托克斯参量的影响

根据上述理论,分析了FBG的双折射 Δn 对反射信号和透射信号斯托克斯参量的影响。基本参数为 $n_{\text{eff}} = 1.4682, L = 10 \text{ mm}, \delta n = 2 \times 10^{-4}, \nu = 1, \Delta n = 6 \times 10^{-6}, \Lambda = 528.46 \text{ nm}$,中心波长 $\lambda_0 = 1551.98 \text{ nm}$ 。图1(a)和(b)为双折射 Δn 对单模光纤均匀FBG反射和透射信号斯托克斯参量的影响曲线。由图中可以看出: S_0, s_2 和 s_3 关于 $\lambda_0 = 1551.98 \text{ nm}$ 呈对称分布, s_1 关于 $\lambda_0 = 1551.98 \text{ nm}$ 呈反对称分布; Δn 增大谱线不产生漂移,但谱线反射带宽变窄, s_1, s_2 和 s_3 振幅均随 Δn 增加而增加。为了能够清晰地看出这几个量的变化情况,在图2(a)和(b)中分别给出了反射和透射信号四个斯托克斯参量值在 $\lambda_0 = 1551.98 \text{ nm}$ 处随 Δn 变化的曲线。结合图1、图2以及(1)~(4)式可见,在中心波长处反射光和透射光的 x 模和 y 模振幅不随 Δn 的增加而改变,且 $E_x = E_y$,即 x 模和 y 模的光强相等且不变,只是 x 模和 y 模光矢量之间的夹角发生了变化,夹角 δ 在 $3\pi/2 \sim 2\pi$ 之间,随 Δn 增大从 2π 逐渐变小。

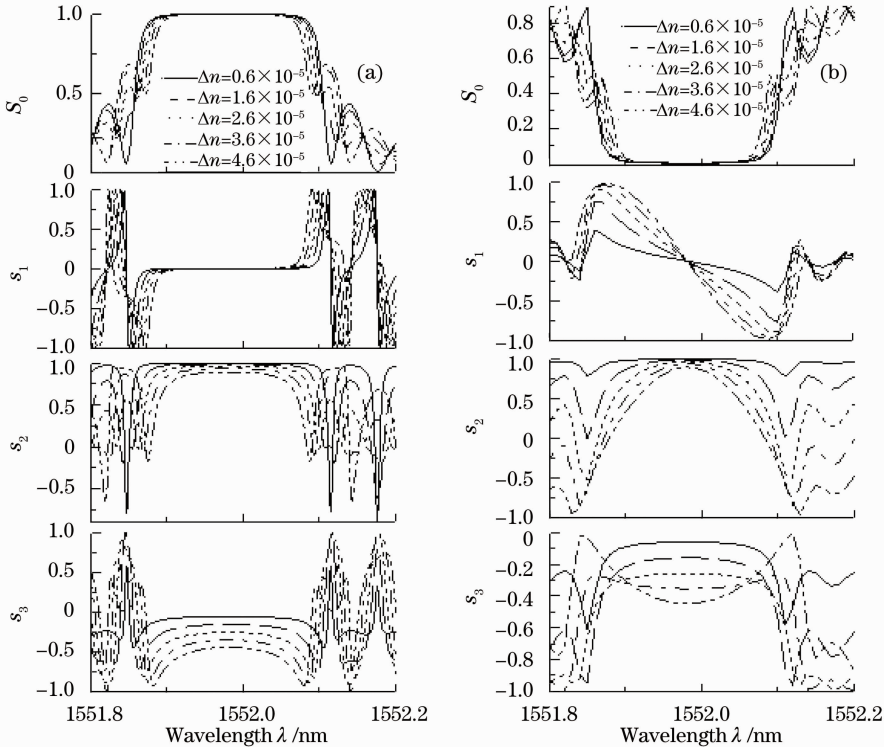


图1 在不同双折射 Δn 条件下,反射信号(a)和透射信号(b)斯托克斯参量随波长变化的曲线

Fig.1 Curves of Stokes parameters changing with wavelength for the (a) reflected and (b) transmitted signals under different birefringence values

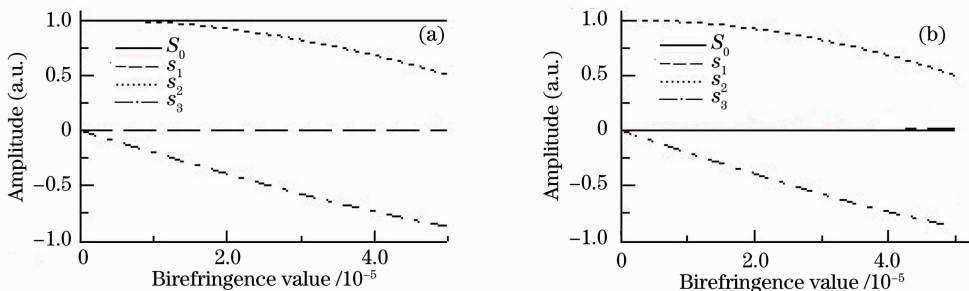


图2 反射信号(a)和透射信号(b)斯托克斯参量值在 $\lambda_0 = 1551.98 \text{ nm}$ 处随 Δn 变化的曲线

Fig.2 Curves of Stokes parameters changing with birefringence Δn for the (a) reflected and (b) transmitted signals at $\lambda_0 = 1551.98 \text{ nm}$

反射信号在 λ_0 处对应斯托克斯参量, S_0 值趋于1(这是由于在该处反射信号非常强造成的),而 s_1 值为零, s_2 随 Δn 增大而减小,并且变化曲线呈余弦函数规律,即由 $\cos \delta$ 决定其变化趋势, s_3 随 Δn 增大而减小,并

且变化曲线呈正弦函数规律,即由 $\sin \delta$ 决定其变化趋势。

透射信号在 λ_0 处斯托克斯参量变化与反射信号的变化关系相似, S_0 和 s_1 趋于定值0,两变化曲线重合在一起,这是由于在中心波长处透射的光非常微弱造成的; s_2 和 s_3 与反射信号在中心波长处的变化规律相同,即 s_2 随 Δn 增大而减小,并且变化曲线呈余弦函数规律,由 $\cos \delta$ 决定其变化趋势; s_3 随 Δn 增大而减小,并且变化曲线呈正弦函数规律,由 $\sin \delta$ 决定其变化趋势。同时需要注意的是,在 $\Delta n < 2 \times 10^{-5}$ 时谱线的变化规律遵循单模低双折射光纤均匀 FBG 的规律变化,当 $\Delta n > 2 \times 10^{-5}$ 并不断增加时,由图 1(b)可以看出,透射谱中 s_3 曲线在反射带内开始出现两个峰,其变化规律开始由单模低双折射光纤均匀 FBG 的规律向写在高双折射光纤上均匀 FBG 的规律演变。可见双折射对斯托克斯参量有很大的影响。

4 实验结果

实验装置如图 3 所示,可调谐激光光源 (Agilent 81980A) 发出的光进入光纤偏振分析仪 (Agilent A2000) 的控制端,产生偏振度几乎为 100% 且两正交本征偏振态相位角相差 $\pi/4$ 的偏振光, A2000 控制端产生的偏振光经过环形器再通过单模光纤光栅,最后利用 A2000 的测试端口分别对光纤光栅的反射和透射端进行测量,选择测量分辨力为 1 pm, 波长范围为 1551~1553 nm, 测量精度为 1 pm, 测量选用的单模光纤光栅为康宁 SMF-28 光纤写制的 FBG, 其中 $n_{\text{eff}}=1.4682$, $L=10$ mm, $\lambda_0=1551.98$ nm, $\Lambda=528.495$ nm。测量结果如图 4(a) 和 (b) 所示, 分别为实验反射信号和透射信号四个斯托克斯参量随波长变化的曲线。

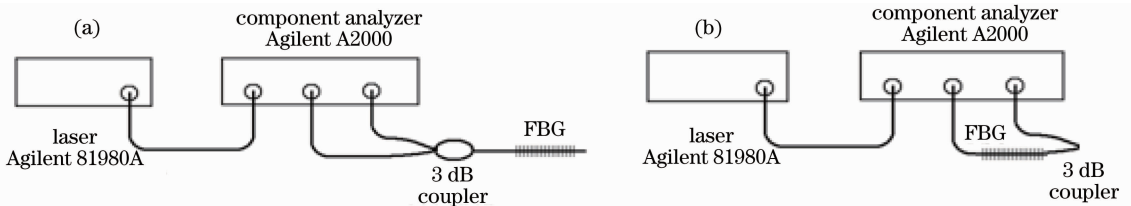


图 3 实验装置简图。(a)反射装置图;(b)透射装置图

Fig. 3 Experimental setup. (a) Reflection set up; (b) transmission set up

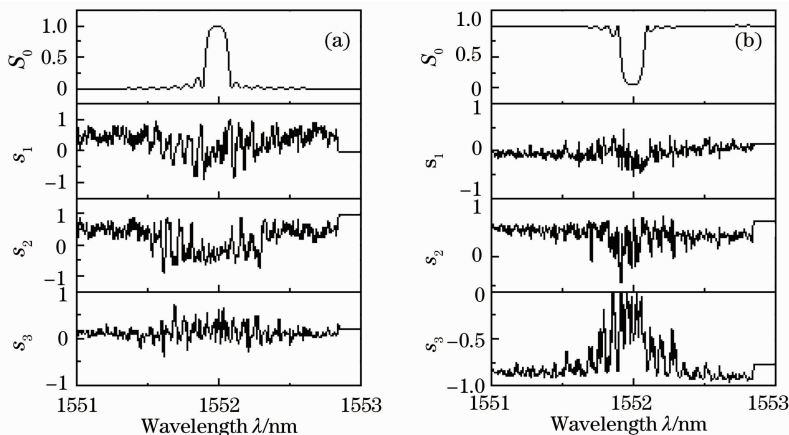


图 4 实验反射信号(a)和透射信号(b)斯托克斯参量随波长变化曲线

Fig. 4 Curves of Stokes parameters changing with wavelength for the experimental (a) reflected and (b) transmitted signals

结合实验数据得到模拟参数为: $L=10$ mm, $\delta n=1.1 \times 10^{-4}$, $\Delta n=6 \times 10^{-6}$, $n_{\text{eff}}=1.4682$, $\nu=1$, $\lambda_0=1551.98$ nm, $\Lambda=528.495$ nm, 得到反射和透射归一化斯托克斯参量随波长变化的曲线分别如图 5 所示。图 5(a) 和 (b) 分别是对应实验图 4(a) 和 (b) 的理论模拟图, 即反射信号和透射信号四个斯托克斯参量随波长变化的曲线。

通过对比发现所测量曲线的整体轮廓与模拟曲线基本符合。但实验曲线有很多波动, 原因如下: 1) 由于单模光纤光栅受内部因素(椭圆度、内部残余应力)和外部因素(环境温度微小变化、微弯)的影响使其双折射值发生改变, 而常规单模光纤光栅其本身双折射值很小, 相对而言造成的影响就比较大; 2) 测量时采用的精

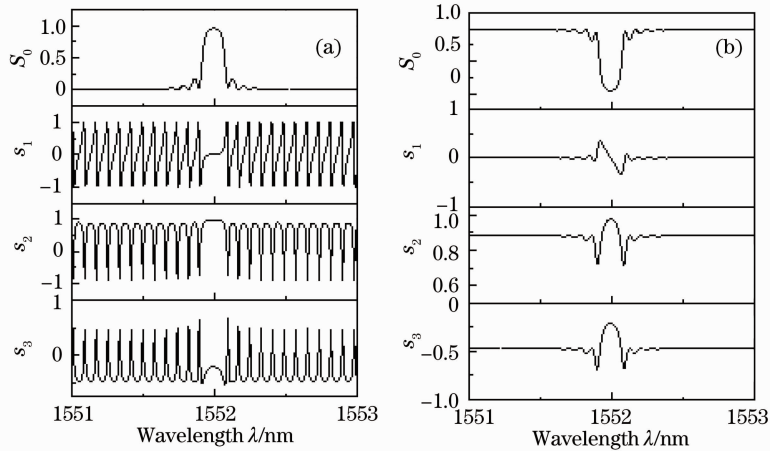


图5 模拟反射信号(a)和透射信号(b)斯托克斯参量随波长变化曲线

Fig. 5 Curves of Stokes parameters changing with wavelength for the simulated (a) reflected and (b) transmitted signals

度高达1 pm,这样一些噪声信号也被测量出来了,所以曲线势必产生很多随机的波动。如果经过多次测量并进行数值重建对曲线进行平滑,就会符合得更好,但为了保证实验的真实有效性,就未对图像做任何处理,这样所测量的斯托克斯参量随波长变化的曲线就不像理论模拟的曲线那样光滑。

5 结 论

根据耦合模理论以及琼斯矢量与斯托克斯参量的关系,给出单模均匀FBG的反射和透射的斯托克斯参量公式;数值模拟出单模光纤均匀FBG在不同双折射值下的反射和透射斯托克斯参量随光纤光栅波长变化的曲线,并分析了单模光纤均匀FBG的斯托克斯参量随光纤的双折射 Δn 变化的关系,得出如下结论: S_0 , s_2 和 s_3 关于 $\lambda_0 = 1551.98$ nm呈对称分布, s_1 关于 $\lambda_0 = 1551.98$ nm呈反对称分布; Δn 增大谱线不产生漂移,但导致谱线反射带宽变窄,反射信号 s_2, s_3 与透射信号 s_1, s_2, s_3 均有不同程度的变化,其双折射值在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 范围内对斯托克斯参量的影响非常显著。

由于光纤光栅传感测量是基于能量谱波长漂移的,其反射带宽平坦区比较宽而使其测量精度相对较低。通过分析可知:透射谱线 s_1 在反射带内有一个峰值,并且该峰值单值性比较好,因此有望在传感测温 and 测应力应用中作为一个敏感测量参数,以提高测量精度。采用A2000偏振控制分析仪测出单模光纤均匀FBG的反射和透射的斯托克斯参量随波长变化的曲线图,理论分析与实验结果基本符合。

参 考 文 献

- 1 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(4-6): 239~245
- 2 M. Wuilpart, C. Caucheteur, S. Bette *et al.*: Analysis of stokes parameters reflected and transmitted by uniform fibre Bragg gratings written in highly birefringent fibers[C]. Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2004, 327~330
- 3 C. Caucheteur, S. Bette, R. García 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
- 4 C. Caucheteur, M. Wuilpart, S. Bette *et al.*: Wavelength dependency of degree of polarization for uniform Bragg ratings written into polarization maintaining optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2005, 247(4-6): 325~333
- 5 J. Apefl. Phase retardance of periodic multilayer mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(4): 733~738
- 6 Qin Zhaoyu, Cheng Zhaogu, Zhang Zhiping *et al.*: High-speed and real-time measurement of Stokes parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 659~662
- 7 覃兆宇, 程兆谷, 张志平等. 偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 659~662
- 8 Li Zhizhong. Theoretical and Experimental Research on Sensing Characteristics of Birefringent Fiber Gratings [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006, 7~20
- 9 李智忠. 双折射光纤光栅传感的特性理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006, 7~20
- 10 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2005, 47~52, 157~160
- 11 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 47~52, 157~160