

# 基于光纤偏振特性的压力传感中最佳入射光偏振态的确定

苏洋\*, 张超, 王艺敏, 汪井源, 周华

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210014

**摘要** 入射光偏振态的选择对基于偏振特性的光纤压力传感系统性能有着重要影响。以提高传感灵敏度和线性度为目标,提出了一种基于 Muller 矩阵的简单快速的最佳入射光偏振态优化方案,取代传统的偏振态“盲调”,利用基于压电陶瓷的挤压装置和偏振检测计,在实验中获得了灵敏度为  $0.2410 \text{ N}^{-1}$ 、线性度为 99.9% 的最佳传感性能,实验结果与理论预期吻合较好。所提方案可以大幅度提高基于光纤偏振特性的传感系统的性能并扩展其实用价值。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 偏振特性; 斯托克斯参量; Muller 矩阵

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1406001

## Optimization of Incident Light Polarization State in Pressure Sensing Based on Fiber Polarization Properties

Su Yang\*, Zhang Chao, Wang Yimin, Wang Jingyuan, Zhou Hua

College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210014, China

**Abstract** The selection of the state of polarization (SOP) of incident light plays a significant role in the performance of optical fiber pressure sensor based on the polarization properties. In order to improve the sensitivity and linearity of the sensor, a simple and fast optimization scheme for optimal incident light polarization state based on Muller matrix is proposed to replace the traditional “blind adjustment” of SOP. In the experiment, with the squeezing devices based on piezoelectric ceramics and polarimeters, the optimal performance is achieved with sensitivity of  $0.2410 \text{ N}^{-1}$  and linearity of 99.9%, which agree well with the theoretical prediction. The proposed scheme will greatly improve the performance and extend the practical applications of the sensors based on the fiber polarization properties.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; polarization properties; Stokes parameters; Muller matrix

**OCIS codes** 060.2370; 260.5430; 280.5475

## 1 引 言

光纤传感方法具有体积小、质量轻、抗电磁干扰等诸多优势,被广泛用于压力、位移、温度等多种物理量的监测<sup>[1-4]</sup>。光纤传感系统通过监测光波的强度、相位、频率或偏振态(SOP)等参数,实现对外界待测物理量的传感。强度调制型光纤传感器通常结构简单,容易实现,成本低,但易受光源强度波动和连接器损耗变化的影响。相位调制型传感器灵敏度较高<sup>[5-6]</sup>,但通常需用特殊光纤及高精度检测系统,

成本较高。基于偏振特性的光纤传感方法具有灵敏度高、检测结构简单的优点,逐渐成为一个重要的研究方向<sup>[7-8]</sup>。基于光偏振特性的压力传感方法通常利用压力致双折射效应使偏振态发生变化。文献[9]中分析了单模光纤中的应力分布,得到 1550 nm 波长处双折射与压力的关系,并基于 2 km 单模光纤进行了静态应力矢量传感。

近年来,光纤压力传感表现出灵敏度高、结构简单、动态性能好等优点,尤其是在高频动态压力信息监测和弱压监测方面。本课题组提出了基于光纤偏

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-04-07; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61975238)

\* E-mail: qieziyangyang@163.com

振特性的实时压力传感方法,利用光的斯托克斯参量与压力之间的线性关系达到传感的目的<sup>[10-11]</sup>,实现了对压力、位移的测量,这种方法结构简单、实时性强,已经得到了实验验证。

在光纤传感系统中,入射光偏振态可以明显地改变传感系统的灵敏度、线性度和动态范围。在随机入射的偏振态情况下,可能出现低灵敏度和非线性变化的情况<sup>[11]</sup>,需要对偏振控制器进行多次调节。由于没有目标偏振态,实际操作是一种“盲调”过程。因此,为了获得较好的传感性能,需要研究一般性的入射光偏振态优化选择方法来指导偏振控制器的调节。本文从入射光偏振态与传感灵敏度和线性度的关系入手,建立数学模型,提出最佳入射光偏振态的确定方法,并用实验数据验证了该方案的可行性和准确性,从而满足高灵敏度和高线性度的传感需求。

## 2 基本原理

如果在光纤上施加横向压力,受力区域光纤的两个正交模式的折射率会产生差异,即产生双折射。

这种压力致双折射  $\Delta n$  与压力的大小成正比:

$$\Delta n = \Delta n_{\text{eff},x} - \Delta n_{\text{eff},y} = K \frac{F}{LD}, \quad (1)$$

式中: $D$  是光纤的直径; $F$  是所施加的压力; $L$  是受压光纤的长度; $K$  是压力常数; $\Delta n_{\text{eff},x}$  和  $\Delta n_{\text{eff},y}$  分别为有效折射率在  $x$ 、 $y$  方向的变化量。根据文献<sup>[12-14]</sup>中的参数,可以计算得到  $K = 9.0431 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 。相应地,压力致双折射产生的相位差为

$$\theta(F) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L = \frac{2\pi K F}{\lambda D}, \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为光波波长。

另一方面, Muller 矩阵是一个  $4 \times 4$  的实数坐标变换矩阵,它能够很好地描述光纤偏振态的改变。进行归一化处理后, Muller 矩阵可以退化为一个  $3 \times 3$  的旋转矩阵,用来描述三维空间中绕任意轴旋转任意角度的坐标变换,这里的轴指的是传感头的本征旋转轴。

设本征旋转轴的方向向量  $\mathbf{n} = (a, b, c)$ , 绕本征旋转轴旋转角度  $\theta$  的 Muller 矩阵表示为<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{M}(F) = \begin{bmatrix} a^2 + (1 - a^2) \cos \theta(F) & ab[1 - \cos \theta(F)] - c \sin \theta(F) & ac[1 - \cos \theta(F)] + b \sin \theta(F) \\ ab[1 - \cos \theta(F)] + c \sin \theta(F) & b^2 + (1 - b^2) \cos \theta(F) & bc[1 - \cos \theta(F)] - a \sin \theta(F) \\ ac[1 - \cos \theta(F)] - b \sin \theta(F) & bc[1 - \cos \theta(F)] + a \sin \theta(F) & c^2 + (1 - c^2) \cos \theta(F) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

光的偏振态可以用斯托克斯参量来表示,即  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)^T$ , 其中  $s_1, s_2$  和  $s_3$  为归一化的斯托克斯参量。出射偏振态  $\mathbf{s}_{\text{out}}$  和入射光偏振态  $\mathbf{s}_{\text{in}}$  的关系可以描述为

$$\mathbf{s}_{\text{out}} = \mathbf{M}(F) \times \mathbf{s}_{\text{in}}. \quad (4)$$

在邦加球上,压力作用下的偏振态将绕本征旋转轴  $\mathbf{n} = (a, b, c)$  旋转,如图 1(a) 中的仿真结果所示,偏振态的轨迹取决于入射光偏振态的位置以及本征旋转轴的方向。因此斯托克斯参量和压力之间存在余弦变化关系,如图 1(b) 所示。

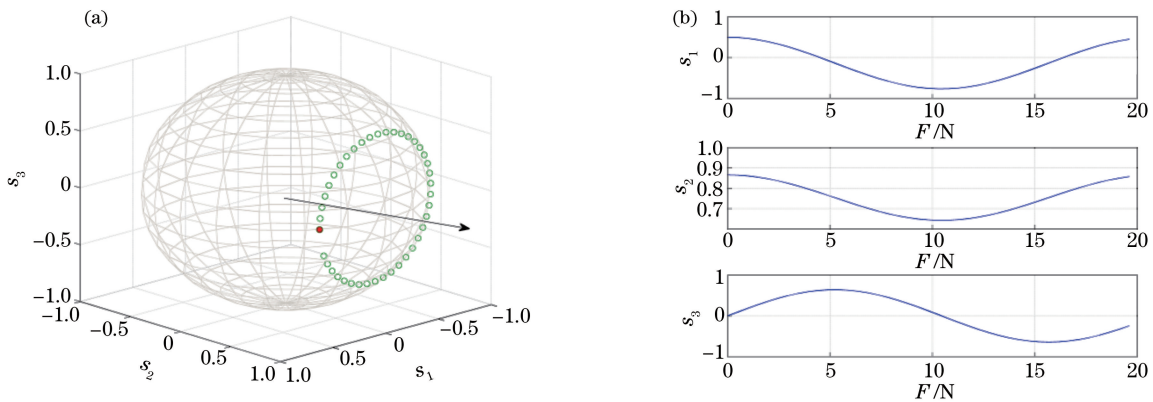


图 1 仿真结果。(a) 仿真所得的输出 SOP 轨迹;(b) 斯托克斯参量与压力的关系

Fig. 1 Simulation results. (a) Simulated trace of SOP; (b) Stokes parameters versus applied force

旋转矩阵描述了压力传感头的本征旋转轴在以检偏器为基准建立的邦加球上的实际位置。在已知输入偏振态与不同压力的情况下,通过(4)式可以求出相应的输出偏振态。在锁定光纤挤压装置的情况下,本征旋转轴即确定。此时,入射光偏振态就成为影响斯托克斯参量性能曲线的重要因素,其不仅影响灵敏度,也会影响线性范围和线性度。

根据理论模型,搭建了压力检测装置,如图 2 所示。采用可调谐激光器(TLS)产生单波长光源,利用偏振控制器(PC)调整入射光偏振态。通过压电陶瓷(PZT)实现负载的施加,被施压光纤长度为 5 mm。偏振检测部分使用在线检偏模块对偏振信息进行检测,利用数据处理模块对数据进行处理,结果显示在实时界面上。

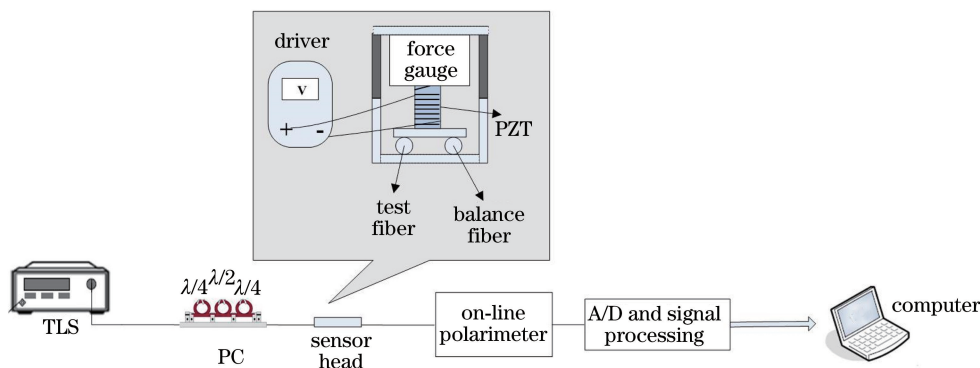


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

图 3(a)是在某随机入射光偏振态下施加压力时,输出偏振态斯托克斯参量的时间演化图,图 3(b)是对应的三个斯托克斯参量的幅度与压力的关系图。数据拟合显示, $s_1$ 、 $s_2$  和  $s_3$  对压力  $F$  的灵敏度分别为  $0.1, 0.08, 0.15 \text{ N}^{-1}$ , 线性度分

别为  $99.18\%, 96.78\%, 97.99\%$ 。对于随机入射光偏振态,很难得到较高的灵敏度和线性度。因此,有必要对入射光偏振态进行优化选择,使系统能够工作在余弦曲线的线性部分,同时具有较高的灵敏度。

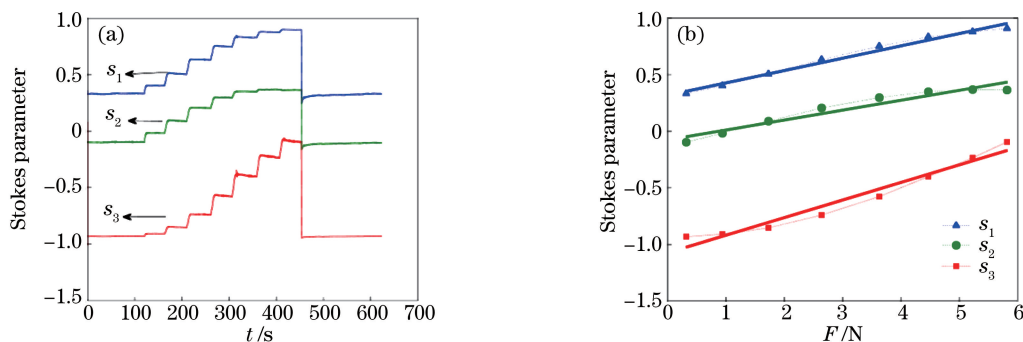


图 3 随机入射光偏振态下的结果。(a)输出斯托克斯参量演变;(b)斯托克斯参量幅度与压力的变化关系以及线性拟合结果

Fig. 3 Results under randomly incident SOP. (a) Evolutions of output Stokes parameters; (b) amplitudes of Stokes parameters as functions of applied force and linear fitting results

### 3 最佳入射光偏振态确定方案

#### 3.1 传感头实际 Muller 矩阵的确定

要确定 Muller 矩阵,首先要计算出传感头本征旋转轴的方向向量。根据前面的分析,在固定的输入偏振态下持续增加压力,测量得到的输出偏振态所在圆面的法向量就是旋转轴的方向向量。因而,只要知道偏振态轨迹所在的平面方程,就可以求解出本征旋转轴的方向向量,进而得到了挤压器的

Muller 矩阵。但是,实际中环境温度以及实验操作会引起误差,导致一部分偏振点在该平面附近波动,进而导致所获得的本征旋转轴不精确。为了解决这个问题,引入特征值最小二乘法处理实验数据,得到最接近于真实值的方向向量  $n = (a, b, c)$ ,进而确定传感装置的 Muller 矩阵。

根据图 3 的实验数据,在邦加球上标记出这 8 个偏振态,通过计算得到传感头实际本征旋转轴的方向向量  $n = (0.7445, -0.6491, -0.1562)$ ,如图

4 所示。将  $\mathbf{n}$  代入(3)式中即可求解出传感头的实际 Muller 矩阵。

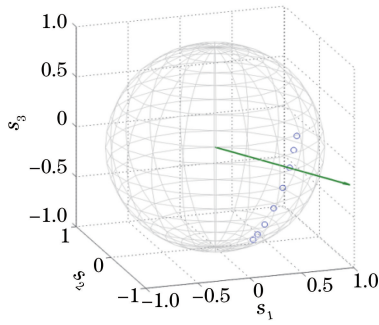


图 4 随压力变化的偏振态以及本征旋转轴在邦加球上的表示  
Fig. 4 Force-related SOPs and characterization of intrinsic rotation axis on Poincare sphere

### 3.2 灵敏度的选择

随着压力的增加,输出偏振态将在邦加球上

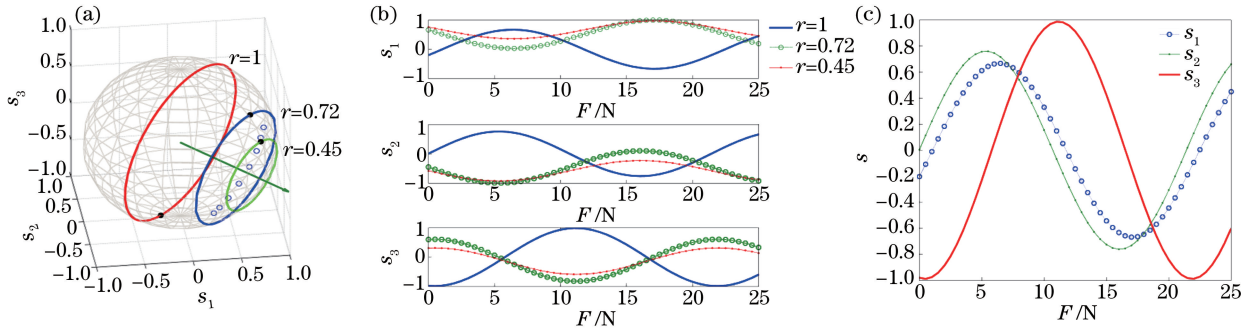


图 5 灵敏度优化方案。(a)不同入射光偏振态围绕偏振旋转轴所形成的半径不同的同心圆;(b)对应不同圆半径的输出斯托克斯参量与压力关系的比较图;(c)半径  $r=1$  时三个斯托克斯参量  $s_1, s_2$  和  $s_3$  曲线对比

Fig. 5 Scheme for optimization of sensitivity. (a) Representation of three coaxial circles with different radii, which are formed by different incident polarization states rotating around axis of polarization; (b) output Stokes parameters  $s_1, s_2$ , and  $s_3$  with respect to applied force for different radii; (c) comparison of  $s_1, s_2$ , and  $s_3$  when radius is 1

### 3.3 线性度的选择

根据半径  $r=1$  时参量  $s_3$  与  $F$  的余弦关系,寻找较优的线性度和动态范围。考虑半个周期区间内的余弦曲线,取不同的范围进行线性拟合,比较它们的线性度和线性范围,如表 1 所示。

表 1 半周期余弦曲线中,对应不同角度范围的相关系数和线性范围

Table 1 Correlation coefficient and linear range for different angle ranges in half period of cosine function

| Angle range / ( $^{\circ}$ ) | Correlation coefficient $R$ | Linear span $D$ / ( $^{\circ}$ ) |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 60-120                       | 0.9999                      | 60                               |
| 45-135                       | 0.9995                      | 90                               |
| 20-155                       | 0.9975                      | 115                              |

综合比较线性度和动态范围,以  $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$  的范围为例,一个周期内  $s_3$  工作区域如图 6(a)中所示。

形成一个绕“本征旋转轴”旋转的圆,旋转轨迹半径的大小以及具体路径取决于入射光偏振态在邦加球的位置,即初始入射光偏振态  $\mathbf{s}_{in}$ 。不同的入射光偏振态  $\mathbf{s}_{in}$  将围绕旋转轴在邦加球上形成一系列的同心圆,如图 5(a)所示。图 5(a)中随机列举了三个不同的入射光偏振态形成的偏振轨迹同心圆,对应半径分别为 1, 0.72, 0.45,并利用(3)和(4)式分别描绘出三种情况下三个输出斯托克斯参量与压力的关系,如图 5(b)所示。分析表明,半径  $r=1$  的圆所对应的斯托克斯曲线的峰峰值最大,即具有达到最大灵敏度的可能性。因此,性能优化的第二步是根据本征旋转轴在邦加球上描绘出的半径为 1 的圆,比较此时三个斯托克斯参量的幅度,如图 5(c)所示,其中  $s_3$  的峰峰值最大,因此确定  $s_3$  为最优传感参量。

由于具有对称性,这两段线性区域具有同样的线性度和灵敏度。通过计算得到初始入射光偏振态分别为  $\mathbf{s}_{in} = (0.361, 0.588, -0.723)$  和  $\mathbf{s}_{in} = (-0.407, -0.6267, 0.664)$ 。以  $\mathbf{s}_{in} = (0.361, 0.588, -0.723)$  为例,在此输入偏振态下,系统在压力作用下的性能曲线如图 6(b)所示。经过拟合,得到传感头的理论最大灵敏度为  $0.264 \text{ N}^{-1}$ ,线性度为 99.95%。图 6(a)的仿真。结果表明,在裸光纤的压力传感中, $s_3$  与压力的正弦关系曲线中半周期对应的量程是 10.5 N,  $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$  的范围对应的压力线性量程约为 5.25 N。实际中还可以根据需求改变线性范围,在小量程时可以得到更高的线性度。

### 3.4 实验验证

下面对理论分析进行实验验证。首先调节实验装置中的 PC。由于实验中使用的是手动三环偏振控制器,最终将入射光偏振态调整为



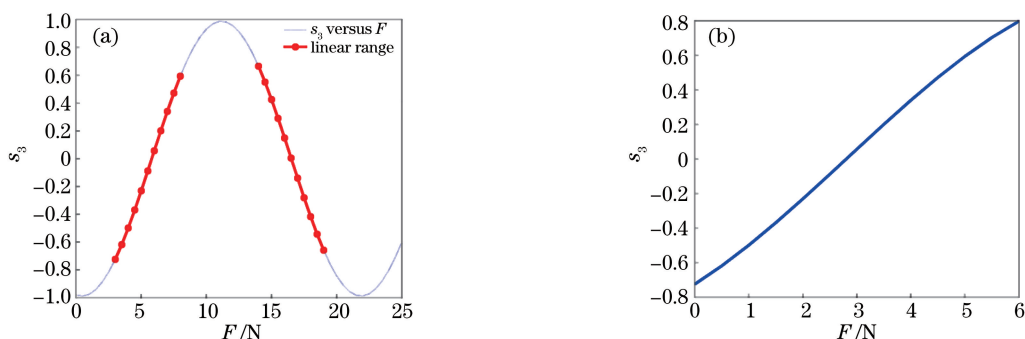


图 6 线性度优化方案。(a)  $s_3$  经优化选择后的工作区域;(b)  $s_3$  性能曲线的理论仿真结果  
Fig. 6 Scheme for optimization of linearity. (a) Working range after optimization in whole range of  $s_3$ ;  
(b) simulated result of  $s_3$

$s_{in} = (0.366, 0.566, -0.739)$ , 与理论最佳偏振态  $(0.361, 0.588, -0.723)$  非常接近。重新加载压力, 得到斯托克斯参量的演化轨迹图如图 7(a) 所示。图 7(b) 是对应的三个斯托克斯参量幅度与压力的关系图, 可以看出实验结果与理论分析的预期效果一致,  $s_3$  表现出很高的灵敏度和线性度。对  $s_3$  曲线进行拟合得到灵敏度为  $0.2410 \text{ N}^{-1}$ , 线性度为

99.9%, 这与理论估值非常接近。此时的灵敏度是图 3 中  $s_1$  灵敏度的 2.4 倍, 且线性度更高。将实验数据点描绘在邦加球上, 如图 7(c) 中实心点所示。在最佳入射光偏振态下, 输出偏振态的轨迹基本保持在  $r = 1$  的圆周上, 微小的误差可能来源于压力第二次加载时对压电陶瓷挤压装置的轻微改变, 使实际偏振旋转轴产生了微小的偏移。

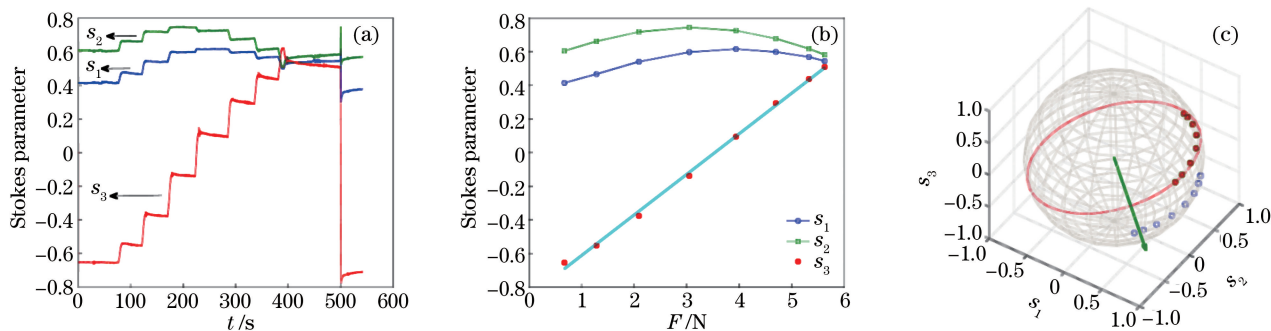


图 7 最佳入射光偏振态的实验结果。(a) 斯托克斯参量的实验演变;(b)  $s_1, s_2$  和  $s_3$  幅度与压力的变化关系以及  $s_3$  的线性拟合;(c) 邦加球上偏振态轨迹(实心点)

Fig. 7 Experimental results under optimized SOP of incident light. (a) Experimental evolutions of Stokes parameters;  
(b) amplitudes of  $s_1, s_2$ , and  $s_3$  as functions of applied force and linear fitting of  $s_3$ ;  
(c) trace of output SOPs on Poincare sphere (solid dots)

## 4 结 论

在基于光斯托克斯参量的压力传感中, 入射光偏振态的选择对系统性能有重要影响, 提出了一种最佳入射光偏振态的优化选择方法, 能根据实际需求获得最佳的灵敏度和线性度, 实验结果与理论预期相符。本工作在实验中得到了线性度为 99.9%、灵敏度为  $0.2410 \text{ N}^{-1}$  的最佳传感性能。对比“盲调”入射光偏振态下的实验结果<sup>[10]</sup> 可得, 灵敏度提高了 6 倍。这种最佳入射光偏振态的确定方法极大地提高了基于斯托克斯参量的实时压力传感方法的

实用性。在下一步的工作中, 拟使用电动偏振控制器取代手动偏振控制器, 以对入射光偏振态进行更为方便和精确的调节。

## 参 考 文 献

[1] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.  
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.  
[2] Zhou J T, Liao C R, Wang Y P, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature by employing

- fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1680-1686.
- [3] Liao C R, Wang D N, Wang M, et al. Fiber in-line Michelson interferometer tip sensor fabricated by femtosecond laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(22): 2060-2063.
- [4] Li Z Y, Liao C R, Wang Y P, et al. Highly-sensitive gas pressure sensor using twin-core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6673-6678.
- [5] Chen W M, Lei X H, Zhang W, et al. Recent progress of optical fiber Fabry-Pérot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.  
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328010.
- [6] Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0606002.  
黄炳森, 高社成, 黄新成, 等. 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0606002.
- [7] Chowdhury D, Wilcox D. Comparison between optical fiber birefringence induced by stress anisotropy and geometric deformation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(2): 227-232.
- [8] Caucheteur C, Guo T, Albert J. Polarization-assisted fiber Bragg grating sensors: tutorial and review [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3311-3322.
- [9] Li Z Y, Wu C Q, Dong H, et al. Stress distribution and induced birefringence analysis for pressure vector sensing based on single mode fibers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 3955-3960.
- [10] Su Y, Zhu Y, Zhang B F, et al. Real-time transverse force sensing using fiber Bragg grating through direct Stokes parameters measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32300-32310.
- [11] Su Y, Zhou H, Shen H P, et al. High-sensitivity and real-time displacement sensor based on polarization properties in fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 24-29.
- [12] Gafsi R, El-Sherif M A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, 6(3): 299-323.
- [13] Wagreich R B, Atia W A, Singh H, et al. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(13): 1223-1224.
- [14] Espejo R J, Dyer S D. Transverse-stress fiber Bragg grating sensor with high spatial resolution and temperature stability [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1777-1785.
- [15] Li Z Y, Wu C Q, Dong H, et al. Cascaded dynamic eigenstates of polarization analysis for piezoelectric polarization control [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(19): 2900-2902.