

# 钛扩散 $\text{LiNbO}_3$ 相位调制器尾纤偏振串音的 白光干涉测量方法

李传生 张春熹 王夏霄 李立京 于佳 冯秀娟

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要** 提出了一种基于白光干涉原理的钛扩散铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )集成光学相位调制器尾纤偏振串音测量方法,分析了白光干涉仪输出干涉信号与集成光学芯片和保偏尾纤对轴角度、偏振器起偏角度之间的关系。仿真结果表明:白光干涉仪输出的干涉包络与相位调制器的耦合点存在一一对应的关系,干涉包络的峰值反映了相位调制器的尾纤偏振串音。利用白光干涉仪对某型钛扩散  $\text{LiNbO}_3$  集成光学相位调制器的尾纤偏振串音进行了实际测试,干涉图样中产生了与耦合点位置对应的干涉峰;常温下其输入、输出尾纤偏振串音分别为  $-34.5$  dB 和  $-23.3$  dB;在  $-40$  °C~ $60$  °C 范围内,尾纤偏振串音随温度升高而减小。实验结果验证了测量方法的可行性。

**关键词** 集成光学;  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器; 钛扩散; 白光干涉; 偏振串音

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0508003

## White Light Interferometry for Pigtail Polarization Crosstalk of Ti-Diffused $\text{LiNbO}_3$ Integrated Optic Phase Modulator

Li Chuansheng Zhang Chunxi Wang Xiaoxiao Li Lijing Yu Jia Feng Xiujuan

(School of Instrument Science and Optical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** A new test method for the pigtail polarization crosstalk of the Ti-diffused  $\text{LiNbO}_3$  integrated optic phase modulator(Ti:  $\text{LiNbO}_3$  IOPM) is proposed based on the white-light interferometry. The white light interference intensity as a function of the alignment angle between the integrated optic chip and the polarization-maintaining pigtail and the azimuth of the polarizer is theoretically analyzed. It is shown by the digital simulation that the pigtail polarization crosstalk of the IOPM can be obtained by the peaks of the interference envelope associated with the polarization coupling points of the IOPM. The pigtail polarization crosstalk of the Ti:  $\text{LiNbO}_3$  IOPM is tested by utilizing the white light interferometry, and the apparent interference peaks are exhibited at the polarization coupling points. The input and output pigtail polarization crosstalk are  $-34.5$  dB and  $-23.3$  dB respectively at room temperature, and decrease as the temperature rises from  $-40$  °C to  $60$  °C. The feasibility of the white light interferometry is verified by the experimental results.

**Key words** integrated optics;  $\text{LiNbO}_3$  integrated optic phase modulator; Ti-diffused; white light interference; polarization crosstalk

**OCIS codes** 130.3120; 130.3730; 130.4110; 060.2300; 260.5430

## 1 引 言

基于钛扩散工艺的铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )集成光学相位调制器是一种双折射相位调制器,可以在两个正交的偏振模式之间引入调制相位差,它是反射式

Sagnac 型光纤电流、电压互感器实现高精度、大动态范围测量的核心器件<sup>[1~4]</sup>。相位调制器尾纤对轴误差引起的两个正交偏振模式之间的耦合是互感器主要的偏振误差源<sup>[1,5]</sup>,变温环境下相位调制器尾

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-01-25

作者简介: 李传生(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤电力传感及光纤陀螺技术等方面的研究。

E-mail: li\_chuansheng@163.com

导师简介: 张春熹(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺及惯性技术等方面的研究。

E-mail: zhangchunxi@buaa.edu.cn

纤偏振串音的变化也是导致互感器测量准确度随温度漂移的主要原因之一。为对相关的机理进行验证,必须了解相位调制器保偏尾纤与集成光学芯片的耦合情况,尤其是变温环境下的变化规律。基于钛扩散工艺的 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学波导可以同时传输横电模(TE)、横磁模(TM)两个偏振模式,没有起偏能力,通过测试器件的消光比只能得到器件偏振耦合的整体情况,而每一根保偏光纤的偏振主轴与集成光学波导 TE、TM 偏振方向的对准误差及其随温度的变化规律是无法确定的。

本文借鉴基于白光干涉方法的保偏光纤偏振耦合分布式测量机理<sup>[6~8]</sup>,实现了钛扩散 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学相位调制器尾纤偏振串音的测量。借助琼斯矩阵,建立了测试系统模型,根据宽谱光干涉理论,分析了系统的测试原理,并对目前正在使用的钛扩散 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学相位调制器进行了测试。

## 2 尾纤偏振串音的白光干涉测量方法

LiNbO<sub>3</sub> 集成光学相位调制器的尾纤偏振串音既不同于波导芯片的偏振消光比,也不同于输出尾纤本身的偏振串音,它是指保偏尾纤工作轴与非工作轴输出光功率的比值,反映了波导芯片输出光耦合进入尾纤非工作轴的程度,它主要由保偏尾纤与波导芯片的对轴角度  $\theta$  决定,即

$$C_T = 10\lg(\tan^2\theta) \approx 20\lg|\theta|. \quad (1)$$

实际的 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学相位调制器通常采用保偏尾纤的慢轴与波导的 TE 偏振方向对准耦合。

### 2.1 基本原理

白光干涉法测试相位调制器尾纤偏振串音的基本原理是利用迈克耳孙干涉仪补偿相位调制器中主波与耦合次波之间由于高线性双折射引起的光程差,重建干涉仪的对比度,利用干涉条纹分析尾纤与集成光学波导耦合点的位置和耦合强度。如图 1 所示,超辐射发光二极管(SLD)发出的光经起偏器起偏后被耦合进入待测集成光学(IO)相位调制器的输入尾纤中,通过调整起偏器的方位角保证入射光的偏振方向

与输入尾纤的一个偏振轴重合,在光纤与集成光学波导的两个耦合点上,分别有一部分线偏光耦合至正交的偏振模式上,在输出尾纤中形成四个波列,由于双折射效应,这些波列将以不同的速度在相位调制器中传输,在输出尾纤出射时将携带光程差,该光程差与保偏尾纤和集成光学波导的模式双折射及耦合点到光纤出射端的距离有关。输出尾纤中的光经分束棱镜(BS)后分别进入迈克耳孙干涉仪的两臂,经固定反射镜与扫描反射镜反射后,由 45°检偏器投影至同一偏振方向。宽谱 SLD 光源的相干长度很短(一般几十微米),在干涉仪扫描镜连续扫描的过程中,只有当匹配干涉仪产生的光程差精确补偿了相位调制器的双折射相位差时,干涉仪的输出才出现干涉条纹,其中干涉峰的位置反映了耦合点的位置,干涉条纹的对比度反映了耦合点耦合强度,可以用来计算尾纤与集成光学芯片的耦合角度。

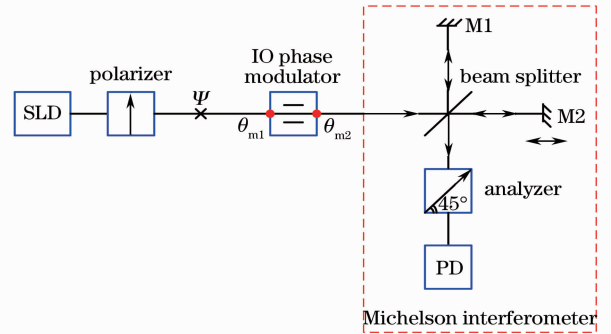


图 1 相位调制器尾纤偏振串音测试系统示意图  
Fig. 1 Diagram of test system for pigtail polarization crosstalk of the phase modulator

### 2.2 理论分析

相位调制器尾纤偏振串音测试系统各器件的琼斯矩阵分别为:

1) 起偏器及其方位角  $\Psi$ :

$$\mathbf{M}_p = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi \\ -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\Psi$  为起偏器通光方向与相位调制器输入尾纤慢轴方向的夹角,  $\mathbf{M}_p$  表示起偏器的琼斯矩阵。

2) 待测相位调制器:

$$\mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} a: \cos \theta_{m1} \cos \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{mx}L_{m1} + \beta_{mx}L_{m2} + \beta_{me}L_m)] - \sin \theta_{m1} \sin \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{mx}L_{m1} + \beta_{mx}L_{m2} + \beta_{mm}L_m)] \\ b: \sin \theta_{m1} \cos \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{my}L_{m1} + \beta_{mx}L_{m2} + \beta_{me}L_m)] + \cos \theta_{m1} \sin \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{my}L_{m1} + \beta_{mx}L_{m2} + \beta_{mm}L_m)] \\ c: -\cos \theta_{m1} \sin \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{mx}L_{m1} + \beta_{my}L_{m2} + \beta_{me}L_m)] - \sin \theta_{m1} \cos \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{mx}L_{m1} + \beta_{my}L_{m2} + \beta_{mm}L_m)] \\ d: -\sin \theta_{m1} \sin \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{my}L_{m1} + \beta_{my}L_{m2} + \beta_{me}L_m)] + \cos \theta_{m1} \cos \theta_{m2} \exp[-j(\beta_{my}L_{m1} + \beta_{my}L_{m2} + \beta_{mm}L_m)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\theta_{m1}$  和  $\theta_{m2}$  分别为输入、输出尾纤与集成光学芯片的对轴角度,  $\beta_{m,x}$  和  $\beta_{m,y}$  分别为输入、输出尾纤慢、快轴的传播常数,  $\beta_{m,e}$  和  $\beta_{m,m}$  分别为集成光学波导 TE 模、TM 模的传播常数,  $L_{m1}$ 、 $L_{m2}$  和  $L_m$  分别为输入、输出尾纤及集成光学波导的长度,  $\mathbf{M}_m$  表示相位调制器的琼斯矩阵。

3) 迈克耳孙干涉仪的固定臂和扫描臂:

$$\mathbf{M}_f = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_s = \frac{1}{2} \exp(jk\Delta L) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $k$  为波数,  $\Delta L$  为迈克耳孙干涉仪两臂引入的总光程差。

4) 45° 检偏器:

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix}. \quad (6)$$

5) SLD 光源输出光的琼斯矢量:

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $E_x$  和  $E_y$  分别为光源发出光波的电场矢量的  $x$  分量和  $y$  分量。

光电探测器接收到光的琼斯矢量可表示为

$$\mathbf{E}_{out} = \mathbf{M}_a (\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_f) \mathbf{M}_m \mathbf{M}_p \mathbf{E}_{in}. \quad (8)$$

由此得到干涉光强为

$$I = \langle \mathbf{E}_{out}^H \cdot \mathbf{E}_{out} \rangle = \frac{E_x^2}{4} \left\{ 1 + \sum_{q=1}^{28} A_q [\gamma_{ce}(\tau_q) \cos \Phi_q + \gamma_{co}(\tau_q) \sin \Phi_q] \right\}, \quad (9)$$

式中 H 表示矩阵的共轭转置,  $\langle \cdot \rangle$  表示时间平均,  $A_q$  和  $\Phi_q$  分别表示各干涉项的幅值和相位,  $\tau_q$  表示与光程差对应的时间差,  $\gamma_{ce}(\cdot)$  和  $\gamma_{co}(\cdot)$  分别为光源相干函数的偶分量和奇分量, 可由光源光谱根据维纳-欣钦定理计算得到<sup>[9]</sup>。根据(2)~(9)式, 将与迈克耳孙干涉仪两臂光程差有关的干涉项的幅值和相位列于表 1, 其中  $\Phi(\Delta L) = k\Delta L$ , 表示迈克耳孙干涉仪两臂引入的总相位差;  $\Delta\Phi(L_{m*}) = (\beta_{m,x} - \beta_{m,y})L_{m*}$  ( $*$  = 1, 2) 和  $\Delta\Phi(L_m) = (\beta_{m,m} - \beta_{m,e})L_m$  分别表示保偏尾纤或集成光学波导的双折射相位差。

表 1 白光测试系统各干涉项的幅值和相位差

Table 1 Amplitude and phase of the interference intensity for the test system

	$\Phi_q$	$A_q$
1	$\Phi(\Delta L)$	1
2	$\Phi(\Delta L) \pm \Delta\Phi(L_{m2})$	$-\cos 2\Psi \cos 2\theta_{m1} \cos \theta_{m2} \sin \theta_{m2}$
3	$\Phi(\Delta L) \pm [\Delta\Phi(L_m) - \Delta\Phi(L_{m2})]$	$-\cos 2\Psi \cos 2\theta_{m2} \cos \theta_{m1} \sin \theta_{m1}$
4	$\Phi(\Delta L) \pm [\Delta\Phi(L_m) + \Delta\Phi(L_{m2})]$	$\cos 2\Psi \cos \theta_{m1} \sin \theta_{m1} \sin^2 \theta_{m2}$
5	$\Phi(\Delta L) \pm \Delta\Phi(L_{m1} + L_{m2})$	$\sin 2\Psi \cos \theta_{m1} \sin \theta_{m1} \cos \theta_{m2} \sin \theta_{m2}$
6	$\Phi(\Delta L) \pm \Delta\Phi(L_{m1} - L_{m2})$	$\sin 2\Psi \cos \theta_{m1} \sin \theta_{m1} \cos \theta_{m2} \sin \theta_{m2}$
7	$\Phi(\Delta L) \pm [\Delta\Phi(L_m) - \Delta\Phi(L_{m1} + L_{m2})]$	$-\sin \Psi \cos \Psi \cos^2 \theta_{m1} \cos^2 \theta_{m2}$
8	$\Phi(\Delta L) \pm [\Delta\Phi(L_m) - \Delta\Phi(L_{m1} - L_{m2})]$	$\sin \Psi \cos \Psi \cos^2 \theta_{m1} \sin^2 \theta_{m2}$
9	$\Phi(\Delta L) \pm [\Delta\Phi(L_m) + \Delta\Phi(L_{m1} + L_{m2})]$	$-\sin \Psi \cos \Psi \sin^2 \theta_{m1} \sin^2 \theta_{m2}$
10	$\Phi(\Delta L) \pm [\Delta\Phi(L_m) + \Delta\Phi(L_{m1} - L_{m2})]$	$\sin \Psi \cos \Psi \sin^2 \theta_{m1} \cos^2 \theta_{m2}$

根据表 1, 在迈克耳孙干涉仪扫描经连续扫描的过程中, 在两臂光程差相等的位置处 ( $\Delta L = 0$ ) 将形成干涉主峰, 当两臂光程差恰好补偿相应的双折射相位差时, 会在干涉主峰的两侧形成对称的干涉次峰, 干涉峰的包络由相关函数的形状决定。弱耦合条件下, 干涉次峰的幅度近似取决于各耦合点的耦合角度, 根据表 1 第 2、3、7 项:  $\theta_{m2}$  由与相位调制器输出尾纤双折射相位差对应的干涉峰给出,  $\theta_{m1}$  由与输出尾纤和集成光学波导总的双折射相位差对应的干涉峰给出, 而偏振器与相位调制器输入尾纤的对轴角度  $\Psi$  也可以通过相应的干涉峰得到, 该干涉峰由输入、输出尾纤和集成光学波导三者总的双折射相位差造成。为保证这三个干涉峰不与干涉主峰

发生混叠, 输入、输出尾纤的长度需要满足:

$$\begin{cases} \Delta n_f L_{m2} > L_{dc} \\ |\Delta n_m L_m - \Delta n_f L_{m2}| > L_{dc} \\ |\Delta n_m L_m - \Delta n_f (L_{m1} + L_{m2})| > L_{dc} \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $L_{dc}$  为光源的去相干长度,  $\Delta n_f$  和  $\Delta n_m$  分别为保偏尾纤和波导芯片的折射率差。同时, 为保证这三个干涉峰之间不发生混叠, 各尾纤的长度需要满足:

$$\begin{cases} \Delta n_f L_{m1} > L_{dc} \\ |\Delta n_m L_m - 2\Delta n_f L_{m2}| > L_{dc} \\ |\Delta n_m L_m - \Delta n_f (L_{m1} + 2L_{m2})| > L_{dc} \end{cases}. \quad (11)$$

## 2.3 仿真研究

设  $L_{m1} = 2 \text{ m}$ ,  $L_{m2} = 2.2 \text{ m}$ ,  $L_m = 39.2 \text{ mm}$ ,  $\Psi = 1^\circ$ ,  $\theta_{m1} = 3^\circ$ ,  $\theta_{m2} = 5^\circ$ ,  $\Delta n_f = 5 \times 10^{-4}$ ,  $\Delta n_m = 0.075$ <sup>[10]</sup>,

根据上述参数对白光干涉仪输出光强与迈克尔孙干涉仪两臂之间光程差的关系进行仿真计算,并按零级条纹的幅度进行归一化,结果如图 2 所示,其中图 2(b)为相应的 dB 值。可以看到三个明显的干涉峰,其坐标分别为(1.1, -21.29)、(1.84, -25.7)和

(0.84, -35.18),分别对应表 1 中第 2、第 3 和第 7 项,相应的角度值分别为 4.93°、2.97°和 0.998°。因此,白光干涉仪输出干涉光强的峰值即反映了相位调制器输入、输出尾纤的偏振串音。

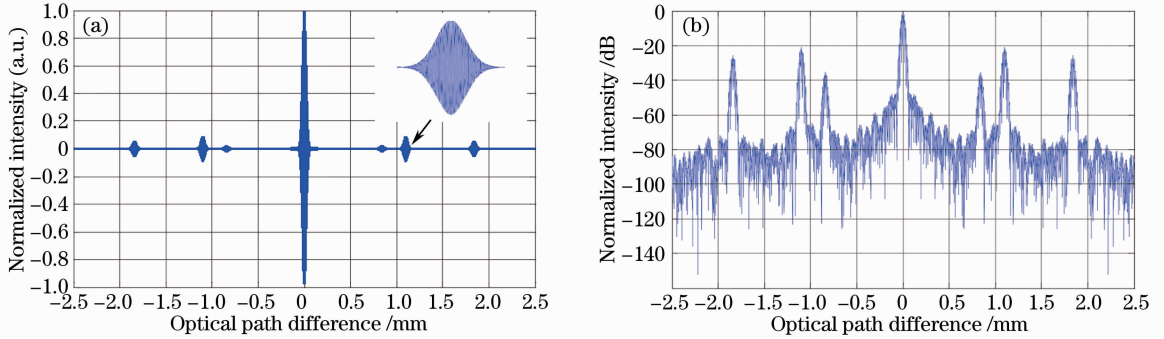


图 2 白光干涉仪输出干涉光强与光程差的关系

Fig. 2 Relationship between the interference intensity and optical path difference for white light interferometer

### 3 实验结果及分析

将待测集成光学相位调制器的输入尾纤与偏振器对接,调整偏振器的起偏角度,使相位调制器输出光的消光比最大,此时将输出尾纤与迈克尔孙干涉仪连接,根据尾纤和波导芯片的长度可以在干涉图中确定耦合点的位置,进而得到相应的偏振串音。常温下测试结果如图 3 所示,其中输入尾纤偏振串音为 -34.5 dB,输出尾纤串音为 -23.3 dB,相应的  $\theta_{m1} = 1.08^\circ$ ,  $\theta_{m2} = 3.91^\circ$ , 偏振器与相位调制器输入尾纤的对轴角度为  $1.05^\circ$ 。

膨胀系数、弹性模量及泊松比等众多参数不同,会在耦合点处产生很大的应力作用<sup>[11,12]</sup>,尤其是耦合胶对保偏尾纤的应力作用,相位调制器的尾纤偏振串音随之改变。将相位调制器置于高低温实验箱内,测试不同温度下的尾纤偏振串音,测试结果如图 4 所示。在  $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  范围内,相位调制器尾纤偏振串音随温度的升高而减小,输入尾纤偏振串音的极值分别为 -27.9 dB 和 -38.1 dB,输出尾纤偏振串音的极值分别为 -18.9 dB 和 -25.2 dB。

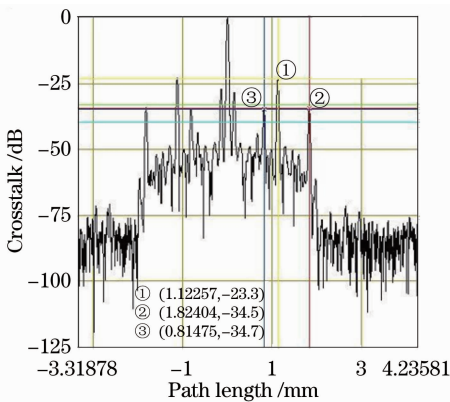


图 3 常温下相位调制器尾纤偏振串音的测试结果

Fig. 3 Test results for pigtail polarization crosstalk of the phase modulator at room temperature

集成光学相位调制器的尾纤耦合通常采用保偏光纤与波导芯片端面直接粘接的耦合方式,当环境温度变化时,由于耦合点处各种材料(LiNbO<sub>3</sub> 晶体、尾纤固定陪片、保偏尾纤及耦合胶)的比热容、热

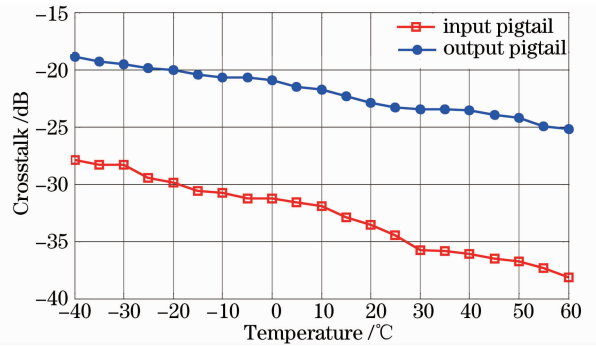


图 4 相位调制器尾纤偏振串音随温度的变化曲线

Fig. 4 Relationship between pigtail polarization crosstalk and temperature

### 4 结 论

基于白光干涉原理提出了一种钛扩散 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学相位调制器尾纤偏振串音的测量方法,确定了白光干涉仪输出信号中各干涉峰的峰值与相位调制器尾纤偏振串音的对应关系,通过实验验证,该方法能够实现钛扩散 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器尾纤偏振

串音的测量。同时,也可利用该方法来指导相位调制器的尾纤的高精度耦合,在线监测对轴误差。以该测试平台为基础,可以对相位调制器尾纤偏振串音随温度变化引起的光纤电流互感器测量误差的机理进行准确的分析,相关的研究和实验工作将后续论文中进行讨论。

### 参 考 文 献

- 1 J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. De Carvalho. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1996, **11**(1): 116~121
- 2 S. Wildermuth, K. Bohnert, H. Brändle. Interrogation of a birefringent fiber sensor by nonreciprocal phase modulation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(18): 1388~1390
- 3 Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao *et al.*. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **29**(30): 42~46  
张朝阳,张春熹,王夏霄等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. *中国电机工程学报*, 2009, **29**(30): 42~46
- 4 Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng *et al.*. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, **40**(2): 0205002  
王夏霄,张猛,李传生等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. *中国激光*, 2013, **40**(2): 0205002
- 5 Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang *et al.*. Study of polarization errors of all fiber optical current transformers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 320~323  
王夏霄,张春熹,张朝阳等. 全光纤电流互感器的偏振误差研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 320~323
- 6 Tang Feng. Measurement of Polarization Coupling in Polarization-Maintaining Fiber Using White Light Interferometry and Its Applications[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 31~41  
唐锋. 白光干涉法保偏光纤偏振耦合测试及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2005. 31~41
- 7 Lin Huizu, Yao Qiong, Hu Yongming. Testing system of fiber polarization coupling based on polarization maintaining structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1794~1799  
林惠祖,姚琼,胡永明. 全保偏结构的光纤偏振耦合测试系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1794~1799
- 8 Guo Zhenwu, Zhang Hongxia, Jia Dagong *et al.*. Measurement of polarization coupling and analysis of vibration disturbance signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805009  
郭振武,张红霞,贾大功等. 偏振耦合测试及其振动干扰信号分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805009
- 9 Zhao Chengjuan, Yang Yuanhong, Zhang Chunxi. Simulation research for coherence characteristics of broad-band source[J]. *Chinese J. Spectroscopy Laboratory*, 2005, **22**(2): 268~272  
赵承娟,杨远洪,张春熹. 宽谱光源光谱相干度的仿真研究[J]. *光谱实验室*, 2005, **22**(2): 268~272
- 10 H. C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Zhang Guicai, Wang Wei Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2002  
H. C. Lefevre. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才,王巍译. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 11 Liu Yin, Qiao Haiyan, Huang Jian *et al.*. Coupling technology of Y-waveguide integrated optical devices [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, **31**(2): 245~252  
刘隐,乔海燕,黄健等. Y波导集成光学器件的耦合技术[J]. *半导体光电*, 2010, **31**(2): 245~252
- 12 Liu Fumin, Huang Tao, Li Ruilong *et al.*. Effects of external stress applied to PM fiber-pigtail on extinction ratio of a Y-branch multi-functional integrated optical device [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1636~1640  
刘福民,黄韬,李瑞龙等. 外应力对Y波导器件尾纤消光比的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1636~1640

栏目编辑:何卓铭