

Y 分支光学调制器半波电压与波长和温度相关性研究

杨福铃¹ 杨远洪¹ 韩宗虎² 曹耀辉²

¹北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

²中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 建立了 Y 分支光学调制器半波电压与工作波长和温度的数学模型, 其半波电压随工作波长增加而增加、随温度增加而减小。设计实现了一种基于 4 阶波调制 Sagnac 干涉仪的半波电压自动测试系统, 实现了半波电压的在线连续测量, 相对测量精度达到 8.5×10^{-6} 。用可调激光器光源, 改变工作波长和环境温度, 分别进行了 1310 nm 和 1550 nm 波段 Y 分支光学调制器半波电压的实际测量, 通过实验测试确定了半波电压与波长和温度的相关性。结果表明, 半波电压在这两个测试波段内与波长和温度均呈线性关系, 波长相关系数为正, 分别约为 3.61×10^{-3} V/nm 和 9.54×10^{-3} V/nm; 温度相关系数为负, 分别约为 -1.76×10^{-3} V/°C 和 -2.00×10^{-3} V/°C。实验结果验证了理论模型的正确性。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; Y 分支光学调制器; 半波电压; 波长; 温度

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0606002

Correlation of Wavelength and Temperature with the Half-Wave Voltage for Y Branch Optical Modulator

Yang Fuling¹ Yang Yuanhong¹ Han Zonghu² Cao Yaohui²

¹National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

²Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Models of the Y branch optical modulator's half-wave voltage with wavelength and temperature are established. The half-wave voltage increases with wavelength increasing and temperature decreasing. A half-wave voltage automatic test system based on Sagnac interferometer modulated with four steps waveform is designed and it can measure half-wave voltage continuously on line. Relative measuring accuracy reaches 8.5×10^{-6} . By changing working wavelength and temperature, the actual measurement of Y branch's half-wave voltages in 1310 nm and 1550 nm band is realized by using a tunable laser as the light source. The results show that the half-wave voltage is linear with the temperature and the wavelength in the two test bands. The wavelength correlation coefficients are 3.61×10^{-3} V/nm and 9.54×10^{-3} V/nm, respectively, and the temperature correlation coefficients are -1.76×10^{-3} V/°C and -2.00×10^{-3} V/°C, respectively. The experimental results verify the correctness of theoretical model.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; Y branch optical modulator; half-wave voltage; wavelength; temperature

OCIS codes 060.2800; 060.2340; 130.3120; 250.7360

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-01-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040815)、航空科学基金(20140851012)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 杨福铃(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: lingling4635@126.com

导师简介: 杨远洪(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术及激光技术方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

随着光纤通信技术和光纤传感技术的迅猛发展,对光纤陀螺(FOG)的研究逐渐向着具体化、细节化发展^[1-3]。Y分支光学调制器(以下简称Y波导)是闭环光纤陀螺中的重要元件之一,其半波电压的稳定性直接影响光纤陀螺标度因数的稳定性^[4-6]。光波长和工作温度是影响Y波导半波电压稳定性的主要因素,特别在空间环境中,会受到辐射和温度变化的双重影响,其中辐射会使光源波长发生较大变化,准确地测定并确定半波电压的波长和温度相关性是实现Y波导半波电压精确补偿和控制的基础,对进一步提高光纤陀螺标度因数稳定性和Y波导器件的性能具有重要的价值。半波电压的典型测量方法为迈克耳孙干涉仪法和Sagnac干涉仪法,基本都为开环的测试方法^[7-9],其测量精度受光源的稳定性、光路损耗等因素限制。这类测量方法能够满足大部分中低精度应用系统的需求,但在高精度光纤陀螺中,需要更高的测量精度,以获得更高的性能。

针对以上问题,本文在已有的相关研究的基础上,建立了Y波导半波电压随波长、温度变化的数学模型。设计实现了一种基于4阶波调制Sagnac干涉仪的半波电压自动测试系统,实现了半波电压的在线连续高精度测量。基于该系统,采用可调激光器光源,改变工作波长和环境温度,进行了深入细致的实验研究,准确获得了Y波导在1310 nm和1550 nm波段半波电压与波长、温度的变化规律,验证了理论模型,为Y波导集成光学器件的参数优化和在实际应用中半波电压的控制补偿提供了理论和实验基础。

2 Y波导半波电压的波长、温度相关性模型

Y波导半波电压定义为相位调制器输出光相位变化 π 时所需的调制电压变化量,可表示为^[10-11]

$$V_{\pi} = \frac{\lambda G}{n_e^3(\lambda, T) \gamma_{33}(\lambda, T) \Gamma(\lambda) L}, \quad (1)$$

式中 λ 为光波长, T 为工作温度, G 为电极间距, L 为电极长度, n_e 和 γ_{33} 分别为LiNbO₃晶体的非寻常光折射率和电光系数, Γ 为电光重叠积分因子, n_e 、 γ_{33} 和 Γ 与工作波长、温度相关。LiNbO₃晶体的典型光学常数 n_e 和 γ_{33} 与波长关系可用如下模型描述^[12-13]

$$n_e = \left(\frac{2.9804\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02047} + \frac{0.5981\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0666} + \frac{8.9543\lambda^2}{\lambda^2 - 416.08} + 1 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\gamma_{33} = 27.04426 + \frac{7.50588}{\lambda^2 + 3.90008} + \frac{0.75161}{\lambda^2 - 0.05138}, \quad (3)$$

式中波长 λ 的单位均为 μm 。通过计算,并将波长 λ 的单位转换为nm,可得到在波长为1270~1350 nm范围内, n_e 和 γ_{33} 与波长的关系,如图1、2所示。通过最小二乘拟合,可看出它们呈很好的线性关系(拟合 R^2 参数均为0.9998),表示为

$$n_e = -3.5180 \times 10^{-5} \lambda + 2.1912, \quad (4)$$

$$\gamma_{33} = -1.3349 \times 10^{-3} \lambda + 30.5815. \quad (5)$$

研究表明,在波长为1270~1350 nm范围内,电光重叠积分因子 Γ 与工作波长的关系为^[11]

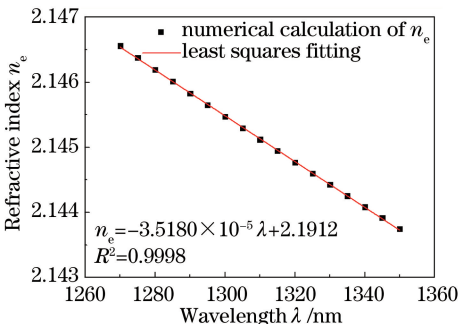


图1 折射率与波长关系

Fig. 1 Relationship between n_e and λ

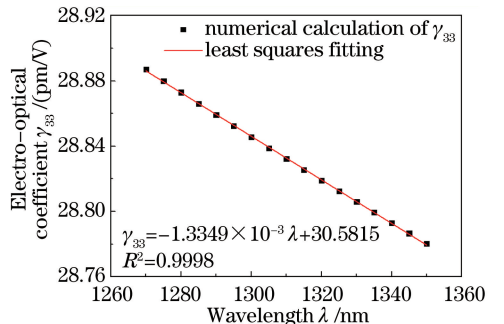


图2 电光系数与波长关系

Fig. 2 Relationship between γ_{33} and λ

$$\Gamma = -2.7797 \times 10^{-5} \lambda + 0.63723, \quad (6)$$

取 $G = 6 \mu\text{m}$ 、 $L = 10 \text{ mm}$ ^[14], 将(4)~(6)式代入(1)式可得到半波电压与波长的典型关系为

$$V_{\pi} = 0.6\lambda / [(-3.5180 \times 10^{-5} \lambda + 2.1912)^3 \times (-1.3349 \times 10^{-3} \lambda + 30.5815) \times (-2.7797 \times 10^{-5} \lambda + 0.63723)]^{-1}. \quad (7)$$

根据(7)式计算得到的 V_{π} 与 λ 的拟合表达式为

$$V_{\pi}(\lambda) = 0.00416\lambda - 0.8568. \quad (8)$$

(8)式表明在 1270~1350 nm 工作波长范围内, Y 波导半波电压与波长为线性关系, 半波电压随着波长的增大而增大, 相关系数约为 0.00416 V/nm。

采用同样的分析计算方法, 在 1490~1590 nm 工作波长范围内, 半波电压可表示为

$$V_{\pi} = 0.00482\lambda - 1.8313. \quad (9)$$

(9)式表明在 1490~1590 nm 工作波长范围内, Y 波导半波电压与波长也为线性关系, 半波电压随着波长的增大而增大, 相关系数约为 0.00482 V/nm。

由(8)和(9)式可知, 在 1310 nm 和 1550 nm 波段, Y 波导半波电压可以表示为

$$V_{\pi} = k_{\lambda}\lambda + b_{\lambda}, \quad (10)$$

Y 波导半波电压与波长均呈线性关系, 随着波长的增大, Y 波导半波电压增大。

由于 Y 波导电光系数 γ_{33} 、非寻常光折射率 n_e 、调制电极的长度 L 及间距 G 等与温度相关, Y 波导半波电压呈现明显的温度相关性。相关的研究表明, 在光纤陀螺的典型工作温度范围($-40 \sim +70 \text{ }^{\circ}\text{C}$)内, Y 波导半波电压与温度呈线性关系^[15-17], 但相关系数为负, 即随温度的升高, 半波电压会降低, 其数学模型描述为

$$V_{\pi} = k_T T + b_T. \quad (11)$$

前期的研究表明半波电压的温度相关性一般优于 $-700 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ^[16]。

3 Y 波导半波电压的波长、温度特性实验测试

3.1 基于 4 阶波调制 Sagnac 干涉仪的半波电压测试方法

在进行实验研究时, 采用了一种基于 4 阶波调制的半波电压测试方法^[18], 测试装置框图如图 3 所示: 由 Y 波导(GC13YC2010)、光源(tunable LD ECL-210)、耦合器(DWBC-2×2-1310/1550)、探测器(PIN-FET, GD45215J-404BL-XB2)、光纤环(BH-29)、数字信号处理模块和计算机组成, 形成典型的 Sagnac 干涉仪光路(或称闭环光纤陀螺光路)。4 阶调制波形、相位变化和干涉仪输出波形如图 4 所示, 其中 4 阶波形为周期为 4τ (τ 为光在 Sagnac 环中传输一周的时间)、阶梯宽度为 τ 、阶梯高度相等的数字阶梯波, 仅当阶梯波的复位电压对应相位调制为 2π 时, 输出信号中复位时间段电压 V_1 将与其他时间段电压 V_2 相等, 此时 2 个阶梯高度对应调制电压值为半波电压。以探测器输出波形上 $0 \sim \tau$ 区间的电平 V_1 和 $\tau \sim 4\tau$ 区间的电平 V_2 的差作为判据, 当 $V_1 - V_2 \neq 0$ 时, 调整阶梯高度 V_{step} , 使 $V_1 - V_2 = 0$, 将此时的阶梯高度乘以 2 即为半波电压值($V_{\pi} = 2V_{\text{step}}$)。由于采用了闭环测试技术和 4 阶波调制, 在 $V_1 - V_2 = 0$ 时, 实际的电压值为正弦波形上相位相差 2π 的点的电压值, 光路的损耗、Sagnac 相移、环境温度变化等引入的小量相位波动对测量均无影响, 系

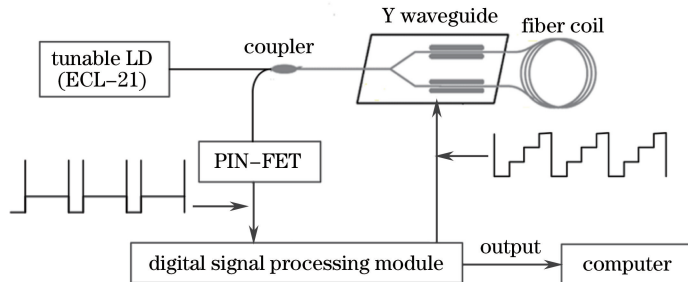


图 3 半波电压测试原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the half-wave voltage measurement

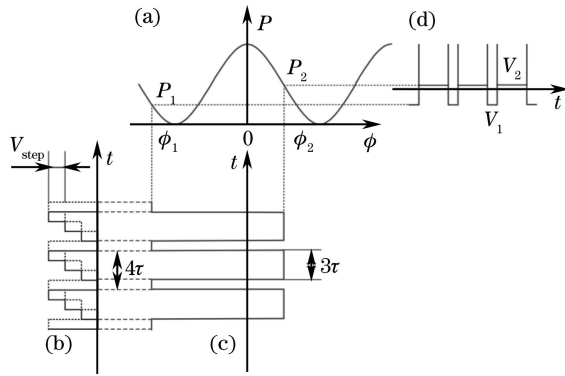


图 4 半波电压测量波形

Fig. 4 Waveform of half-wave voltage measurement

统抗干扰能力强、测量精度高。

基于上述原理,搭建了图 3 所示的实验系统,其中可调谐激光器采用 Santec 公司的 ECL-210;耦合器采用广州奥鑫通讯设备有限公司的单模双窗口耦合器,工作波长为 $1310\text{ nm} \pm 40\text{ nm}/1550\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$;Y 波导采用中国电子科技集团公司第四十四研究所(中电 44 所)的 GC13YC2010 型 Y 波导,工作波长为 $1310\text{ nm} \pm 25\text{ nm}$,标称半波电压为 3.768 V 。为了实现 4 阶波测试,编写了专用的调整测试软件,形成了 Y 波导半波电压自动测试系统。软件流程和测试装置照片如图 5 和图 6 所示,图 7 为实测的探测器输出信号

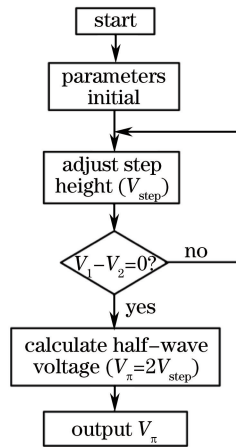


图 5 测试流程图

Fig. 5 Flow diagram of measurement

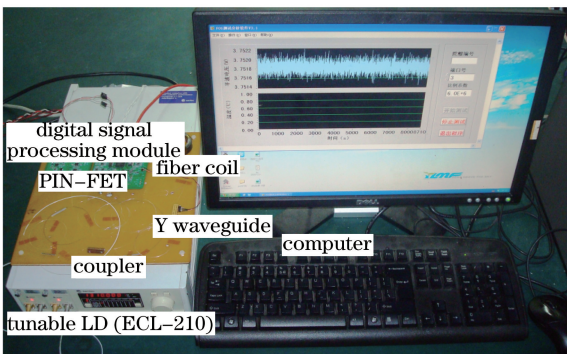


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental setup

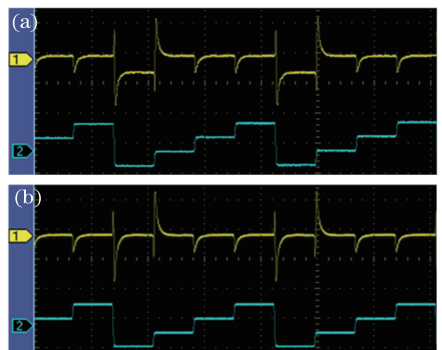


图 7 探测器与 Y 波导信号。

(a) $V_1 \neq V_2$; (b) $V_1 = V_2$

Fig. 7 Signals of PIN-FET and Y waveguide.

(a) $V_1 \neq V_2$; (b) $V_1 = V_2$

典型曲线。为了检验测试系统的精度,将 Y 波导单独放入恒温箱中,设定温度为 30 °C (温度稳定性约为 0.5 °C),将可调谐激光器的波长设定为 1310 nm (3 dB带宽约为 0.02 nm),对 Y 波导的半波电压进行了长时间测试,采样间隔为 1 s,测试时间为 1 h。测试结果如图 8 所示,半波电压均值为 3.7518 V,标准差为 32 μ V(1σ , 10 s),相对测量精度为 8.5×10^{-6} 。

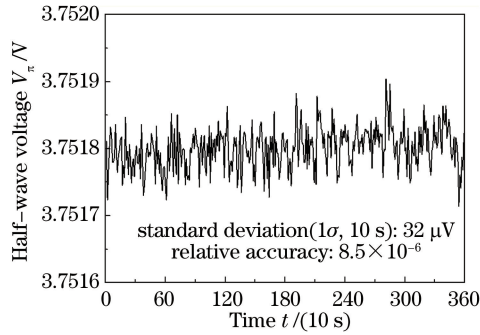


图 8 半波电压 10 s 平均的测试结果

Fig. 8 Test result of half-wave voltage (10 s average)

3.2 Y 波导半波电压的波长、温度相关性实验研究

为了得到不同温度下 Y 波导半波电压的波长特性,采用可调谐激光器(ECL-210)光源,ECL-210 在 1310 nm 波段的调谐范围为 80 nm(1270~1350 nm),在 1550 nm 波段的调谐范围为 100 nm(1490~1590 nm),线宽小于 0.02 nm,可认为是单波长测试。实验时,将 Y 波导单独放入恒温箱中,设定恒温箱的温度范围为: -40~+70 °C,温度间隔为 10 °C。当温度达到稳定时,改变可调谐激光器的波长,测量半波电压,采样间隔 1 s,测试时间为 30 min,取平均值为设定温度和波长的半波电压值。在实验中设置波长范围为 1270~1350 nm 和 1490~1590 nm,波长间隔为 5 nm。

在 1270~1350 nm 波长范围内,采用中电 44 所生产的 GC13YC2010 型 Y 波导进行测试,Y 波导的工作波长为 1310 nm,标称半波电压为 3.768 V。温度、波长与 Y 波导半波电压测试结果的关系如图 9 所示,线性拟合结果如表 1 所示。由表 1 可知,在每个固定温度点下,1310 nm 波段的 Y 波导半波电压与波长呈线性关系($R^2 > 0.9994$),半波电压随波长的增加而增加,半波电压的波长系数 k_λ 的均值为 3.61×10^{-3} V/nm,标准差为 2.006×10^{-5} V/nm。

表 1 1310 nm 波段的线性拟合结果

Table 1 Linear fitting results of 1310 nm band

Temperature / °C	k_λ / (V/nm)	b_λ / V	R^2
-40	0.00357	-0.8006	0.9997
-30	0.00363	-0.8972	0.9998
-20	0.00359	-0.8671	0.9996
-10	0.00363	-0.9385	0.9998
0	0.00358	-0.8825	0.9994
10	0.00360	-0.9233	0.9994
20	0.00362	-0.9628	0.9994
30	0.00361	-0.9719	0.9997
40	0.00362	-0.9999	0.9998
50	0.00363	-1.0315	0.9996
60	0.00361	-1.0309	0.9994
70	0.00360	-1.0442	0.9997

在 1490~1590 nm 波长范围内,采用北京世维通科技发展有限公司生产的 PMD1555-KLK 型 Y 波导进行测试,Y 波导的工作波长为 1550 nm,标称半波电压为 5.231 V。不同温度下 Y 波导半波电压测试结果如图 10 所示,实验结果表明,在固定温度点下,1550 nm 波段的 Y 波导半波电压与波长呈线性关系($R^2 \geq 0.9992$),半波电压随波长的增加而增加,半波电压的波长系数的均值为 9.54×10^{-3} V/nm,标准差为 2.015×10^{-5} V/nm。

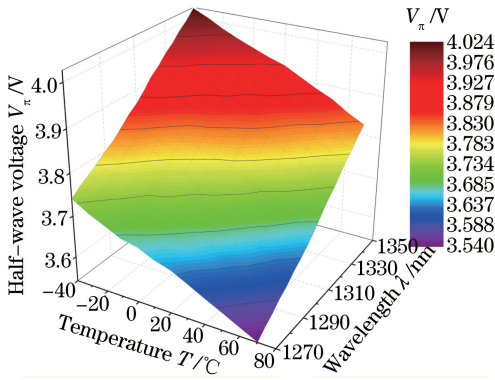


图 9 不同温度下 Y 波导半波电压与波长关系 (1310 nm 波段)

Fig. 9 Relationship of V_{π} and λ at different temperatures (1310 nm band)

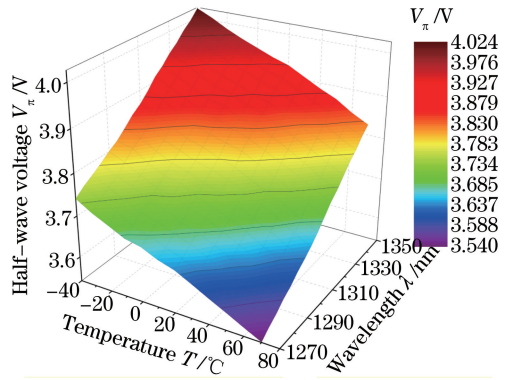


图 10 不同温度下 Y 波导半波电压与波长关系 (1550 nm 波段)

Fig. 10 Relationship of V_{π} and λ at different temperatures (1550 nm band)

利用图 9 和 10 的实验数据,可以得到不同波长下 Y 波导半波电压的温度特性。实验结果表明,当波长固定不变时,Y 波导半波电压与温度近似为线性关系($R^2 \geq 0.9993$),半波电压随温度的增加而减小。1310 nm 和 1550 nm 波段的半波电压温度系数均值分别为 -1.76×10^{-3} V/°C 和 -2.00×10^{-3} V/°C,标准差分别为 1.225×10^{-5} V/°C 和 3.289×10^{-5} V/°C;半波电压温度相关性分别约为 -472×10^{-6} /°C 和 -383×10^{-6} /°C。

综上所述,实验结果与理论模型相符,进一步验证了前面提出的半波电压的波长和温度相关性模型的正确性。

4 结 论

建立了 Y 波导半波电压与工作波长和温度的数学模型,半波电压与工作波长、温度均呈线性规律。该设计实现了基于 4 阶波调制 Sagnac 干涉仪的 Y 波导半波电压测量方法,实现了 Y 波导半波电压的高精度全自动在线测量。该方法容易实现,抗干扰能力强,测量精度高。实际测试表明,相对测量精度达到 8.5×10^{-6} 。采用可调激光器做光源,分别接入典型的 1310 nm 和 1550 nm 波段 Y 波导器件,对其半波电压及其波长、温度相关性进行了精细测量和分析。结果表明,Y 波导半波电压在这两个测试波段内与波长和环境温度均呈现很好的线性关系,波长相关系数为正,分别约为 3.61×10^{-3} V/nm 和 9.54×10^{-3} V/nm;温度相关系数为负,分别约为 -1.76×10^{-3} V/°C 和 -2.00×10^{-3} V/°C,实验结果验证了理论模型,为 Y 波导集成光学器件的参数优化和在实际应用中半波电压的精确建模和控制补偿提供了理论和技术基础。

参 考 文 献

- Liu Jun, Xiao Cheng, Pan Xin, *et al.*. Research on inhibiting radial magnetic sensitivity of fiber-optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0305005.
刘 军, 肖 程, 潘 欣, 等. 抑制光纤陀螺径向磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0305005.
- Suo Xinxin, Yang Yuanhong, Yang Mingwei, *et al.*. Relative intensity noise characteristic of broadband sources and its effect on performance of closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605009.
索鑫鑫, 杨远洪, 杨明伟, 等. 宽谱光源相对强度噪声及对闭环光纤陀螺影响研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605009.
- Wu Changxin, Yang Mingwei, Yang Yuanhong, *et al.*. Effect of fiber bend on interferometric fiber optical gyroscopes performance[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306005.
吴长莘, 杨明伟, 杨远洪, 等. 光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306005.
- Suchoski P G, Findakly T K, Leonberger F J. LiNbO₃ integrated optical components for fiber optic gyroscopes[C]. Integrated Optical Circuit Engineering VI, 1988, 993: 240-244.
- Chen Shitong, Cheng Jianhua, Gao Wei. A phase modulation method for improving the scale factor stability of fiber-optic gyroscope[C]. Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008, 978: 37-42.

- 6 Sun Feng, Wang Lihui, Wang Gang. Study on the drift of modulated phase in interference fiber optic gyroscope[J]. Journal of Computers, 2010, 5(3): 394-400.
- 7 Oikawa S, Kawanishi T, Izutsu M. Measurement of chirp parameters and halfwave voltages of Mach-Zehnder-Type optical modulators by using a small signal operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(5): 682-684.
- 8 Wu Yanji, Peng Yu, Huang Xianlin. Research on V measurement of Y waveguide used in FOG[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(4): 307-309.
吴衍记, 彭 昱, 黄显林. 光纤陀螺用 Y 波导半波电压的测试方法研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(4): 307-309.
- 9 Guo Minglei, Han Xinfeng, Zhang Maolian. Frequency doubling method for half-wave voltage measurement based on electro-optical modulation[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 105-109.
郭明磊, 韩新风, 章毛连. 电光调制晶体半波电压倍频测量方法的讨论[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 105-109.
- 10 Fujiwara T, Kawazoe T, Mori H. Temperature dependence of the half-wave voltage in Ti: LiNbO₃ waveguide devices at 0.83 μm [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1990, 29(12): 2229-2231.
- 11 Li Jinyang, Lu Danfeng, Qi Zhimei. Analyses of wavelength dependence of the electro-optic overlap integral factor for LiNbO₃ channel waveguides[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 077801.
李金洋, 逯丹凤, 祁志美. 铌酸锂波导电光重叠积分因子的波长依赖特性分析[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 077801.
- 12 Zelmon D E, Small D L, Jundt D. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. % magnesium oxide-doped lithium niobate[J]. J Opt Soc Am B, 1997, 14(12): 3319-3322.
- 13 Yonekura K, Jin L H, Takizawa K. Measurement of dispersion of effective electro-optic coefficients r_{13}^E and r_{33}^E of non-doped congruent LiNbO₃ crystal[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(7): 5503-5508.
- 14 Huang He. Design and manufacture of branch optic waveguide phase modulator for fiber optic gyroscope[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004: 20-28.
黄 禾. 光纤陀螺仪用集成光波导 Y 分支相位调制器的设计与制作[D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 20-28.
- 15 Li Xuyou, He Zhou, Zhang Chen, *et al.*. Research on modulation stability and compensation method of Y waveguide in fiber optic gyroscope[C]. The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009, 978: 316-321.
- 16 Mao Xianhui. Research on some key techniques of fiber optic ring interferometric sensor [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005: 40-43.
毛献辉. 环形干涉光纤传感器若干关键问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2005: 40-43.
- 17 Liu Ying, Li Yan, Ji Zhongxiao, *et al.*. Research on the half-wave voltage stability of Y waveguide in FOG[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 449-453.
刘 颖, 李 言, 姬忠校, 等. 光纤陀螺用 Y 波导半波电压稳定性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 449-453.
- 18 Yang Yuanhong, Yu Hongtao. Digital measuring scheme for half-wave voltage of Y-tap multiple integrated optical circuit [J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(11): 640-642.