

# 光纤陀螺用超辐射发光二极管启动偏振特性及其影响研究

高洋洋<sup>1</sup> 周卫宁<sup>1</sup> 雷莉莉<sup>2</sup> 王夏霄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

<sup>2</sup>中国航天科工集团第四研究院红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000

**摘要** 超辐射发光二极管(SLD)光源启动过程中偏振度的不稳定变化影响光纤陀螺性能, 严重地制约了光纤陀螺快启动的研究进展。理论分析了TE模和TM模的偏振特性及其影响因素, 得出了SLD偏振度随驱动电流增加而增大、随温度升高而降低等结论, 设计了高速采集方案对SLD启动时偏振度、驱动电流、管芯温度的变化规律进行测试, 测试得到驱动电流的上升时间约0.3 s, 温度稳定时间为3 s, 稳定时的偏振度约为4.3%, 并分析了SLD启动时偏振特性对光纤陀螺偏振误差的影响。

**关键词** 光学器件; SLD; 启动; 偏振度; 光纤陀螺; 偏振误差

中图分类号 TN31218

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112302

## Research on Polarization Characteristic of SLD Start-up Used in Fiber Optic Gyroscope and Its Effect

Gao Yangyang<sup>1</sup> Zhou Weining<sup>1</sup> Lei Lili<sup>2</sup> Wang Xiaoxiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>2</sup>Hongfeng Control CO, LTD of the Fourth Research Institute, China Aerospace Science & Industry Corp, Xiaogan, Hubei 432000, China

**Abstract** The instability of polarization degree influences the performance of fiber optic gyro in SLD start-up process, which severely restricted the research on quick start of fiber optic gyro. It is analyzed that the polarization characteristics of TE mode, TM mode and influencing factors theoretically, it is concluded that the degree of polarization increases with the increase of drive current and reduces with increase of temperature, a high-speed data acquisition scheme is designed to test the changes of polarization degree, drive current and temperature of chip in SLD start-up process, it has been obtained that the rise time of drive current is about 0.3 s, the stability time of temperature is about 3 s and the polarization degree of SLD is about 4.3%, and the effect of polarization characteristics on polarization error of fiber optic gyro has been analysed when SLD starts up.

**Key words** optical devices; SLD; start-up; degree of polarization; fiber optic gyro; polarization error

**OCIS codes** 230.3670; 230.5440; 140.6630

## 1 引言

光纤陀螺因具有体积小、结构简单、精度高、动态范围大等优点而广泛应用<sup>[1]</sup>, 目前军事和导航等领域对光纤陀螺的快启动要求越来越苛刻<sup>[2]</sup>。超辐射发光二极管(SLD)因具有宽光谱、高功率等特性, 是光纤陀螺的理想光源<sup>[3]</sup>, 同时应用于光相干层析技术和光纤电流互感器中<sup>[4-5]</sup>。由于SLD光源是光纤陀螺光学元件中唯一的功率有源器件, 其启动速度是最慢的<sup>[6]</sup>, SLD启动过程中的输出特性是由管芯的驱动电流和温度共同影响的, 驱动电流的上升时间由驱动电路的RC积分时间决定, 管芯发光所产生的热量导致温度升高, 在温控系统的作用下, 需要一定的时间达到热平衡, 所以光源启动时偏振度发生不稳定变化。偏振度的不稳定

收稿日期: 2015-05-26; 收到修改稿日期: 2015-06-29; 网络出版日期: 2015-09-24

作者简介: 高洋洋(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤陀螺光源方面的研究。E-mail: yangyanggao136@163.com

导师简介: 周卫宁(1957—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学惯性系统方面的研究。

E-mail: zhou5777@yahoo.com.cn

会影响光纤陀螺的输出,主要表现在引起的相对强度噪声和相位偏置的漂移<sup>[7-8]</sup>,而偏振度变化导致的偏振误差会影响光纤陀螺的零偏稳定性<sup>[9]</sup>。本文将对SLD偏振特性机理进行分析并对其启动时偏振度的变化情况进行测试,得到SLD启动时偏振度的变化以及对光纤陀螺偏振误差的影响,为光纤陀螺快启动的研究提供了理论依据和数据支持。

## 2 SLD 发光机理及其组件结构

SLD基于电驱动PN结复合发光原理,在电流注入条件下,来自P层的空穴和来自N层的电子(统称为载流子)在有源层复合发光,在宽光谱范围内产生光的自发辐射放大,峰值波长和强度取决于激活介质的组成和注入电流的大小。SLD组件结构如图1所示,SLD组件由SLD芯片、半导体制冷器、热沉、热敏电阻、尾纤等部分组成。

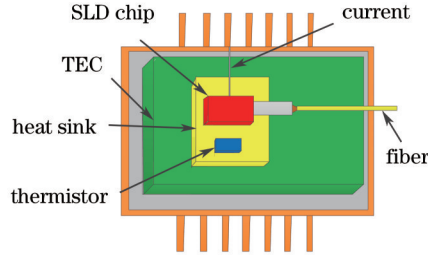


图1 SLD组件结构示意图

Fig.1 Diagram of SLD component

为了稳定光源的功率、光谱、偏振态等参数,提高器件的可靠性,SLD光发芯片安装热沉上,热沉的温度由半导体制冷器(TEC)控制,SLD管芯由恒流源驱动,用热敏电阻对热沉温度进行采集,经PID温控电路处理后,通过改变通过半导体致冷器的电流大小,实现对管芯温度的稳定控制。

## 3 SLD 偏振特性分析

SLD是半导体材料导带中的电子与价带中空穴复合发光的超辐射发光器件,价带是由重空穴带(HH)、轻空穴带(LH)、分裂带(SO)组成,导带电子与重空穴之间的复合产生TE模辐射发光,电子与轻空穴之间的复合产生TM模辐射发光,SLD辐射发光偏振情况如图2所示。

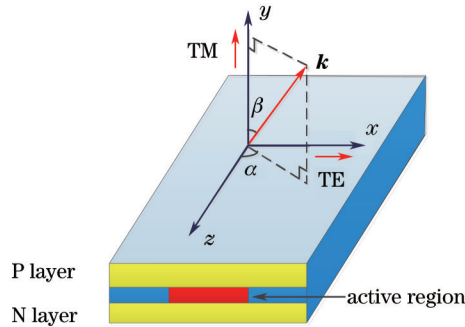


图2 SLD辐射发光偏振特性

Fig.2 Polarization characteristics of SLD

波矢量  $\mathbf{k}$  与  $z$  轴、 $y$  轴分别呈  $\alpha$ 、 $\beta$  角,另外,极化矩阵元  $\mathbf{M}_p$  在与  $z$  轴夹角  $\alpha$  的平面内,并与波矢量  $\mathbf{k}$  垂直,极化矩阵元  $\mathbf{M}_p$  在三轴上投影为<sup>[10]</sup>

$$\langle b | M_x | a \rangle = M_{ij} (\cos \beta \sin \alpha \pm j \cos \alpha), \quad (1)$$

$$\langle b | M_y | a \rangle = -M_{ii} \sin \beta, \quad (2)$$

$$\langle b | M_z | a \rangle = -M_{ii} (-\cos \beta \cos \alpha \pm j \sin \alpha). \quad (3)$$

量子阱材料中,TE模的跃迁矩阵元  $|M_{TE}|^2$  由(1)式中的  $|\langle b | \mathbf{M}_x | a \rangle|^2$  计算可得:

$$|M_{TE}|^2 = \frac{|M_{if}|^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cos^2 \beta \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) d\alpha = \frac{|M_{if}|^2}{2} (1 + \cos^2 \beta). \quad (4)$$

TM模的跃迁矩阵元  $|M_{TM}|^2$  由(2)式中的  $|\langle b|M_y|a \rangle|^2$  计算可得:

$$|M_{TM}|^2 = \frac{|M_{if}|^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \beta d\alpha = |M_{if}|^2 \sin^2 \beta. \quad (5)$$

TE、TM模的材料增益公式<sup>[11]</sup>:

$$g_{TE} = \int A_0 \rho_r(h\nu) |M_{TE}|^2 L(E_{cv}) [f_1(E) + f_2(E - h\nu) - 1] dE, \quad (6)$$

$$g_{TM} = \int A_0 \rho_r(h\nu) |M_{TM}|^2 L(E_{cv}) [f_1(E) + f_2(E - h\nu) - 1] dE, \quad (7)$$

式中  $A_0$  是受激复合参数,  $\rho_r(h\nu)$  是振子状态密度分布,  $L(E_{cv})$  是线性型函数,  $f_1$ 、 $f_2$  是导带和价带的费米能级占有概率函数。

在一定的载流子浓度作用下, TE、TM模的材料增益关系如图3所示, 可以看出, 在有效光谱范围内, 由于TE模的跃迁矩阵元比TM模跃迁矩阵元大得多, 所以TE模的增益高于TM模。

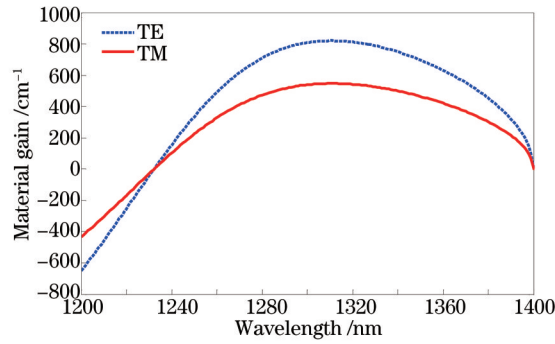


图3 TE、TM模的材料增益曲线

Fig.3 Material gain of TE and TM mode

在光源的有源区, 影响偏振度的主要原因是两种正交偏振模式的光场限制因子不同, TE模的电场分量垂直于有源层生长方向, 通常占主导地位, 而TM模的电场方向平行于有源层生长方向, 其中, 光场限制因子的不同主要是由于注入区尺寸存在明显差异导致的, 其厚度为  $0.1 \mu\text{m}$  量级, 宽度为  $1 \mu\text{m}$  量级。

忽略注入区内由载流子扩散引起载流子分布不均的情况下, 光源的模式增益为

$$g_k = \Gamma_k g - \alpha_k, \quad (8)$$

式中  $g$  是材料增益, 下标  $k$  表示 TE 模或 TM 模, 模式  $k$  的光场限制因子定义为<sup>[12]</sup>

$$\Gamma_k = \frac{\iint n(x, y) |E_k(x, y)|^2 dx dy}{\sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} P_k}, \quad (9)$$

式中  $n(x, y)$  是折射率,  $E_k(x, y)$  是波导层模场,  $P_k$  是模式  $k$  的总功率,  $\varepsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空中介电常数和磁导率, 积分区域在注入区内。

模式损耗定义为<sup>[13]</sup>

$$\alpha_k = \frac{\iint \alpha(x, y) n(x, y) |E_k(x, y)|^2 dx dy}{\sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} P_k}, \quad (10)$$

式中  $\alpha(x, y)$  是材料损耗, 积分区域在注入区外部。

TE模和TM模的输出功率为

$$P_k = P_0 \cdot \exp(\Gamma_k g - \alpha_k) L, \quad (11)$$

所以, TE模和TM模的输出功率的比值为

$$P_{TE} / P_{TM} = \exp(\Delta \Gamma_k g - \Delta \alpha_k) L, \quad (12)$$

式中  $\Delta \Gamma = \Gamma_{TE} - \Gamma_{TM}$ ,  $\Delta \alpha = \alpha_{TE} - \alpha_{TM}$ , SLD的偏振度与  $\Delta \Gamma$  和  $\Delta \alpha$  有关。其中, TE模的材料增益比TM模材料增

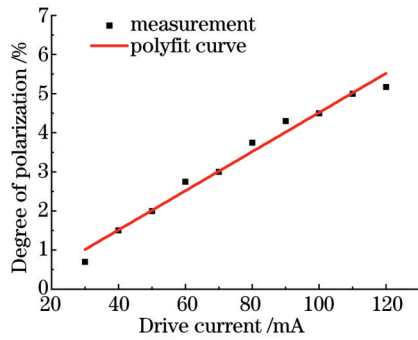


图4 偏振度与驱动电流的变化关系曲线

Fig.4 Relationship between degree of polarization and drive current

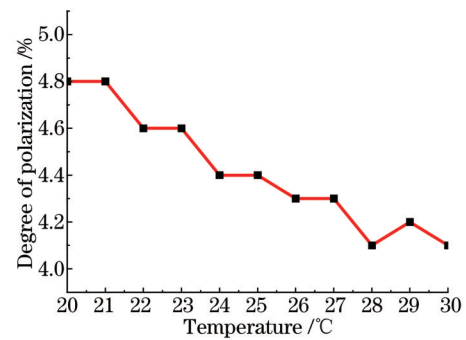


图5 偏振度与温度的变化关系曲线

Fig.5 Relationship between degree of polarization and temperature

益大,采用偏振度测试仪测得偏振度随驱动电流的变化关系如图4所示,偏振度与驱动电流呈线性增加关系。

当SLD由于热效应而导致温度发生变化时,由于结温变化在结区产生热膨胀,导致半导体材料的折射率和费米能级发生变化,从而引起TE模和TM模的光场限制因子和材料增益产生差异,所以SLD输出光的偏振度同时受SLD管芯的温度影响,其中偏振度随温度的变化关系如图5所示,偏振度随温度的升高而减小。

#### 4 SLD启动时偏振度测试结果及影响

本文对光纤陀螺用波长为1310 nm的SLD的启动偏振特性进行了测试,其中,SLD额定驱动电流为100 mA,额定功率为0.272 mW,SLD光源由北航研制的光源板进行驱动,其中,光源板提供100 mA的恒流源,采集光源温度的电桥电路,TEC所需的制冷电流,SLD的尾纤为保偏光纤。通常,偏振态测量是通过测量偏振斯托克斯矢量实现的<sup>[14]</sup>,而本文假设SLD发出的光圆偏振分量极小,并将45°线偏振分量投影到x、y轴方向上,将偏振器的透光轴与x方向分别呈0°和90°与光源连接,对两次SLD启动时透过偏振器的光强进行采集,可以得到SLD启动时 $P_{TE}$ 、 $P_{TM}$ 的变化情况。

输出的光信号由PIN光电二极管转化为电信号,经放大、滤波电路处理后,用HS4高速数据采集卡对电压信号进行采集,采集的电压信号与光强为线性关系,采集卡采用超前触发方式,即在SLD上电之前开始采集,通过对比上电前后数据变化趋势的不同确定启动的零时间,为保证两次测试环境相同,将光源放入温箱中进行测试,温箱温度设定为恒定25 °C,保温30 min,同时通过串联电阻的方式,对驱动电流以及光源内部另一闲置热敏电阻阻值进行采集。对采集的数据进行归一化处理得到SLD启动时TE、TM模功率以及驱动电流、管芯温度变化情况如图6、7所示。其中,通过光功率计对熔接前后两次功率测量可得:当偏振器与x方向分别呈0°、90°角熔接时,损耗分别为2.2 dB和3.3 dB,图5是排除损耗影响的测量结果。

从图6、7中可以看出,TE模的输出功率高于TM模,驱动电流的上升时间约为0.3 s,管芯温度呈衰减震荡趋势变化,稳定时间约为3 s。通常情况下,SLD发出低偏振度的光,其中,SLD偏振度 $d$ 表示为<sup>[15]</sup>

$$d = \frac{P_{TE} - P_{TM}}{P_{TE} + P_{TM}} \times 100\% . \quad (13)$$

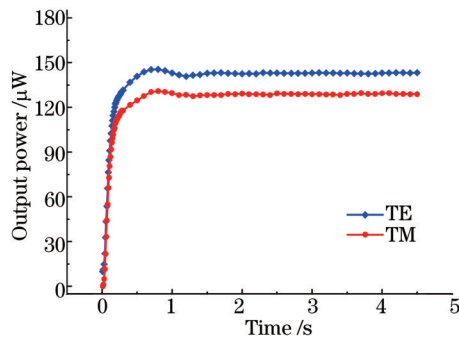


图6 TE、TM模启动功率对比曲线图

Fig.6 Start-up output power curve comparison between TE and TM

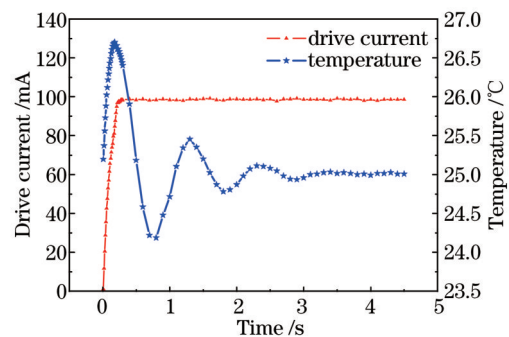


图7 驱动电流和管芯温度启动变化曲线

Fig.7 Start-up curve of drive current and temperature

根据TE、TM模的测量结果,SLD在上电之后在各个时刻的偏振度如表1所示,偏振度的变化趋势与管芯温度变化趋势相仿,稳定时的偏振度约为4.3%。

表1 SLD启动时偏振度测试结果

Table 1 Test results of degree of polarization when SLD starts up

Time of start-up /s	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
Degree of polarization /%	3.11	4.02	4.35	5.16	4.12	4.53	4.26	4.49	4.34	4.31	4.32	4.33

光纤陀螺采用的SLD光源辐射的是部分偏振光,其偏振度的影响不容忽视,另外,由于偏振器的消光比是有限的,SLD辐射光波的垂直分量通过偏振器的非透射轴后进入传感线圈,由于偏振旋转和偏振交叉耦合作用,一部分垂直分量耦合到水平分量中,并与主波干涉,产生偏振误差,其中单模光纤陀螺的偏振误差为<sup>[16]</sup>

$$\phi_{\text{error}} \approx \sqrt{(1-d)/(1+d)} \cdot \varepsilon \cdot \tan \theta \cdot \gamma(\Delta L), \quad (14)$$

式中 $\varepsilon$ 是偏振器的振幅消光系数, $\theta$ 是Lyot消偏器两段保偏光纤主轴夹角, $\gamma(\Delta L)$ 是相干函数包络,取典型值 $\varepsilon = 10^{-3}$ , $\theta = 45^\circ$ , $\gamma = 0.1$ ,有SLD启动时的偏振特性对光纤陀螺偏振误差的影响如图8所示,陀螺启动时的零偏稳定性将会受很大影响。所以,控制SLD启动时偏振度变化对光纤陀螺快启动是必要的。

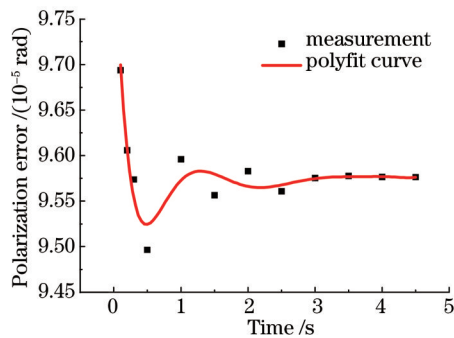


图8 SLD启动时偏振度对陀螺偏振误差影响

Fig.8 Effect on polarization error of fiber optic gyro when SLD starts up

## 5 结 论

通过理论分析光纤陀螺用SLD偏振特性的影响因素,对SLD启动过程中的偏振度、驱动电流、管芯温度进行了测试,得到了SLD启动过程中的偏振度变化规律及其对光纤陀螺性能的影响,对光纤陀螺的快启动研究具有重大的理论和实际意义。

## 参 考 文 献

- Lloyd S W, Fan S H. Experimental observation of low noise and low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(13): 2079-2085.
- Li Cuihua, Wang Wei, Zhang Junjie. FOG quick start-up at low temperature[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(2): 237-240.  
李翠华, 王 巍, 张俊杰. 光纤陀螺低温快速启动技术[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(2): 237-240.
- Burns W K, Chen C, Moeller R P. Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources[J]. J Lightwave Technol, 1983, 1(1): 98-105.
- Shang Huaiying, Huo Li, Wu Yuanpeng, *et al.*. Optical coherence imaging system based on a polarization-dependent semiconductor optical amplifier-enabled swept laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1102002.  
尚怀赢, 霍 力, 吴远鹏, 等. 单偏振半导体光放大器扫频光相干成像系统[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102002.
- Li Chuansheng, Zhang Chaoyang, Sun Haijiang, *et al.*. Effect of polarization crosstalk of polarization-maintaining delay optical fiber coil on the fiber-optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105008.  
李传生, 张朝阳, 孙海江, 等. 保偏延迟光纤环偏振串音对光纤电流互感器的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105008.
- Zhang Weixu. Fiber Optic Gyro and Its Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.  
张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- Zhang Chen, Yi Xiaosu, Yang Yanming, *et al.*. Effects of degree of polarization of SLD on the performance of fiber optic

- gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 509–514.
- 张晨, 伊小素, 杨艳明, 等. 超辐射发光二极管偏振度对光纤陀螺性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 509–514.
- 8 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.
- 9 Li Zizhong, Li Zhihong, Li Guohua. Analysis of depolarized fiber optical gyro's polarization crosstalk error and experimental research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060604.
- 李子忠, 李志宏, 李果华. 消偏光纤陀螺偏振串扰误差分析及实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060604.
- 10 Minoru Yamada. *Theory of Semiconductor Lasers*[M]. Atlanta: Springer Series in Optical Sciences, 2014: 212.
- 11 Parvin Navaeipour, Asghar Asgari. Numerical analysis of AlGaAs/GaAs multi-quantum well superluminescent diodes [J]. *Physica E*, 2014, 63: 272–275.
- 12 Dmitry Labukhin, Xun Li. Polarization insensitive asymmetric ridge waveguide design for semiconductor optical amplifiers and superluminescent light-emitting diodes[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2006, 42(6): 1137–1143.
- 13 G P Agrawal, N K Dutta. *Long Wavelength Semiconductor Lasers*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
- 14 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408006.
- 汤飞龙, 李中梁, 步扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408006.
- 15 Liu Ke, Song Aimin, Tian Kun, *et al.*. Quantum well superluminescent diodes with high power and low polarization degree[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(6): 949–953.
- 刘科, 宋爱民, 田坤, 等. 一种大功率低偏振量子阱超辐射发光二极管[J]. *半导体光电*, 2013, 34(6): 949–953.
- 16 Zhang Guicai. *The Principles and Technologies of Fiber Optic Gyroscope*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- 张桂才. *光纤陀螺原理与技术*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

栏目编辑: 何卓铭