

文章编号: 0253-2239(2006)08-1140-5

# 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响

米 剑<sup>1</sup> 张春熹<sup>2</sup> 李 铮<sup>1</sup> 郭占军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京航空航天大学电子工程学院, 北京 100083  
<sup>2</sup> 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 从光纤陀螺光学系统缺陷角度,研究了由于光纤陀螺保偏光纤融接误差及光学器件的不完善引起的偏光干涉效应,理论分析并实验研究了偏光干涉效应对传输光谱的影响及其对光纤陀螺性能的影响。研究表明,在当前的技术条件下,偏光干涉效应对光纤陀螺的标度因数影响可以忽略,偏光干涉不影响一般意义下的光源相干长度,但是却导致光源相干特性的变化,反应在相干图上出现了多个干涉衬比度峰值,这会降低宽谱光源的短相干长度特性给光纤陀螺带来的好处,由此也说明不能仅由相干长度这一个参量描述光源的相干特性。

**关键词:** 导波光学; 光纤陀螺; 偏光干涉; 光谱; 保偏光纤

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## Effect of Polarization Interference on Fiber Optic Gyro Performance

Mi Jian<sup>1</sup> Zhang Chunxi<sup>2</sup> Li Zheng<sup>1</sup> Wu Zhanjun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083  
<sup>2</sup> School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract:** From the point of view of optic system limitation of fiber optic gyro, the phenomena of polarization interference which suffered from the fusion error of polarization maintaining fiber and unperfect optical element is studied. Also the effect of polarization interference on transmission spectra of light source and consequently on performance of the fiber optic gyro is discussed theoretically and experimentally. Under present technical condition, it is showed that the polarization interference does not affect the scale factor of fiber optic gyro. Although the polarization interference does not change the general coherent length of light source, it affects the interference characteristic of light source that there appear more than one fringes on the interference pattern. The additional interference fringes will shorten the short coherent length of wide band light source and benefit the fiber optic gyro. So it is improper not to describe the coherent characteristic of light source just by its coherent length.

**Key words:** guided-wave optics; fiber optic gyro; polarization interference; spectrum; polarization maintaining fiber

## 1 引 言

干涉型光纤陀螺 (Interferometric fiber optic gyro, IFOG) 作为陀螺的一种,相对于其他陀螺,有其特有的优点,性价比高,应用灵活,可靠耐用,是近年来国内外陀螺领域发展迅速应用广泛的产品。在惯性导航领域,国外已经有干涉型光纤陀螺的产品应用,与传统陀螺展开竞争,国外的高精度干涉型光纤陀螺已经有零漂小于  $0.0003^\circ/\text{h}$  的产品问世<sup>[1]</sup>。而在国内,高精度光纤陀螺仍处于研究阶段。

干涉型光纤陀螺的精度受很多因素影响,其主要指标“随机游走系数”受噪声限制,而光路噪声是

主要的噪声来源,有众多的文献对光纤陀螺的光路噪声问题进行了讨论<sup>[2~5]</sup>。有关抑制这些噪声的技术及解决方法也相当成熟,国外采用宽谱光源、保偏光纤环、集成波导调制器、进行电磁屏蔽和温度控制、强度噪声抵消等技术的闭环干涉型光纤陀螺,其精度已经达到惯性导航要求,并已经进入工程应用阶段。

在国内,受基础工业和技术水平限制,干涉型光纤陀螺中的各光学组件及工艺,都存在这样或那样的问题。作者在干涉型光纤陀螺研究过程中,发现光路缺陷导致的偏光干涉<sup>[6]</sup>现象会改变传输光谱的

作者简介: 米 剑(1974~),男,河北石家庄人,北京航空航天大学电子工程学院博士研究生,工程师,主要从事高精度光纤陀螺方面的研究。E-mail: mijian\_cn@sohu.com

收稿日期: 2005-11-16; 收到修改稿日期: 2006-02-13

形状,而对于干涉型光纤陀螺来说,光源的参量改变会直接导致干涉型光纤陀螺性能的变化。本文主要讨论干涉型光纤陀螺中偏光干涉对光源光谱的影响,以及其对干涉型光纤陀螺参量指标的影响,以明确这些光路缺陷是否有必要进行改进或消除。

## 2 偏光干涉及其对光谱影响的原理分析

干涉型光纤陀螺基本结构如图 1 所示,研究的对象仅限于保偏型干涉型光纤陀螺。目前干涉型光纤陀螺普遍采用宽谱光源,如超荧光光源(SFS)及超辐射光源(SLD)。有非偏振型和偏振型两种超荧光光源,非偏振型光源其偏振度相当小,约为0.2 dB左右,偏振型光源采用保偏掺铒光纤,光源内部集成起偏器,使得出射光为线偏振光。干涉型光纤陀螺传导光路(图 1 中 A 到 F 段)中的偏光干涉现象在采用偏振型超荧光光源及超辐射光源时非常明显,对于非偏振型超荧光光源,如果耦合器存在较大的偏振相关损耗,导致通过耦合器后的光有较大的偏振度,则会在光通过环路起偏器 F 后观察到偏光干涉现象。偏光干涉现象产生的必要条件是相干的两路偏振光通过同一偏振器合光,且他们的偏振角度均不与偏振器的起偏角度重合,即均存在不对准角。理想工艺条件下,保偏光纤偏振轴与偏振器件 F 不存在对准误差,不管输入的是何种偏振光或非偏振光,均不会出现偏光干涉现象。在光纤陀螺中,涉及到多段保偏光纤的对准融接,即涉及到多次偏振光的分光合光,偏光干涉现象更加复杂,此时可通过建立琼斯矩阵光路传输模型来描述整个偏光干涉产生的过程。

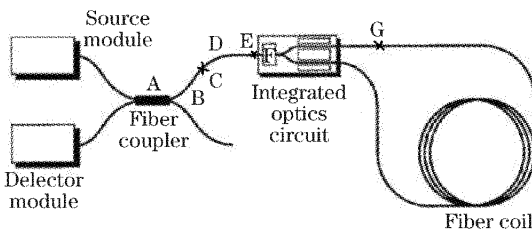


图 1 光纤陀螺光路结构示意图

Fig. 1 Scheme of interferometric fiber optic gyro structure

以图 1 为例,建立从光源到环 G 点处的光路传输琼斯矩阵模型,设光源光场为

$$\mathbf{I} = U \exp[j(2\pi c/\lambda + \phi)] \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $U$  为光场振幅,  $c$  为真空中光速,  $\lambda$  为光波长,  $\phi$  为光波初始相位,  $\theta$  的取值决定了光场的偏振态,此矩阵适用于描述偏振型超荧光光源及超辐射光源。这里并不在乎耦合器 A 的耦合模型,只关心它的起偏作用,忽略偏振串扰,其起偏作用是由于偏振相关损耗导致的,所以矩阵中只需要有有关的损耗即可,可用下式表示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} l_a & 0 \\ 0 & l_b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中  $l_a, l_b$  为与偏振有关的透射率。保偏光纤 B 和 D 做为导致偏光干涉的重要介质,其双折射特性是最重要的参量,忽略它们的偏振串扰,设光波长为  $\lambda$ ,它们的传输矩阵可以简化为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \exp(j2\pi n_e L_B/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(j2\pi n_o L_B/\lambda) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \exp(j2\pi n_e L_D/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(j2\pi n_o L_D/\lambda) \end{bmatrix},$$

此处假设两段保偏光纤为同类光纤,  $n_e, n_o$  分别为其快慢轴的折射率,  $L_B, L_D$  分别为两段光纤的长度。光纤融接点 C、E 处的偏振轴对不准是干涉型光纤陀螺中常见的缺陷,忽略融接点处的损耗,其传输矩阵为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix},$$

其中  $\alpha, \beta$  为融接角度误差。图 1 中的 F 为集成光波导<sup>[7]</sup> 件中的起偏器,这里只关心它的起偏功能, F 的传输矩阵为起偏器矩阵:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中  $\epsilon$  为起偏器的偏振消光比。

则通过环路起偏器后 G 处的光场为

$$\mathbf{G} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{I} =$$

$$U \exp[j(2\pi c/\lambda + \phi)] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j2\pi n_e L_D/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(j2\pi n_o L_D/\lambda) \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j2\pi n_e L_B/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(j2\pi n_o L_B/\lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_a & 0 \\ 0 & l_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

此处并不讨论起偏器 F 的消光作用,假设  $\epsilon = 0$ , 则

$$G = U \exp[j(2\pi c/\lambda + \phi)] \times \left[ \begin{array}{c} \cos \beta \exp(j2\pi n_e L_D/\lambda) [\cos \alpha \exp(j2\pi n_e L_B/\lambda) \cos \theta l_a + \sin \alpha \exp(j2\pi n_o L_B/\lambda) \sin \theta l_b] + \\ \sin \beta \exp(j2\pi n_o L_D/\lambda) [\sin \alpha \exp(j2\pi n_e L_B/\lambda) \cos \theta l_a + \cos \alpha \exp(j2\pi n_o L_B/\lambda) \sin \theta l_b] \end{array} \right], \quad (7)$$

G 点处的光强度  $I$  为光场的共轭积, 设光源两垂直偏振方向上场强相同, 即  $\theta = 45^\circ$ , 此时在公式中可以用耦合器的偏振相关损耗来弥补光源的偏振参量, 通过化简, 得 G 点光强度  $I$  为

$$I = G \cdot G^* = \frac{A^2}{2} \{ \cos \beta \sin \beta \{ \cos \alpha \sin \alpha \cos(L_D/P_\lambda) (l_a^2 + l_b^2) + l_a l_b \{ \cos^2 \alpha \cos[(L_D + L_B)/P_\lambda] + \sin^2 \alpha \cos[(L_D - L_B)/P_\lambda] \} \} + l_a^2 (\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta) + l_b^2 (\sin^2 \alpha \cos^2 \beta + \cos^2 \alpha \sin^2 \beta) + 2l_a l_b \sin \alpha \cos \alpha \cos(L_B/P_\lambda) \}, \quad (8)$$

其中  $P_\lambda = \lambda/(n_e - n_o)$  为保偏光纤的拍长. 从(8)式 中可以看出, 最终的光场强度是光纤融接角、保偏光 纤拍长、尾纤长度、耦合器偏振相关损耗的函数, 这 些参量在干涉型光纤陀螺光路做好后基本都是固定 的, 但是可能会随外界环境变化而有变化, 从而导致 光强变化, 造成干涉型光纤陀螺参量的漂移.

设光源为 1310 nm 波长的超辐射光源, 输出为 椭圆偏振光,  $l_a = 1, l_b = 1$ , 假设保偏光纤在 1310 nm 处的拍长为 3 mm, 尾纤长度均为 1.5 m, 光 纤融接不对准角均为  $2^\circ$ , 设光源谱宽为 100 nm, 从 1250 nm 到 1350 nm, 且为直线型均匀功率密度谱, 即设所有波长处的振幅  $A$  均为 1, 利用上式计算的 传输后光谱如图 2, 光谱出现周期性波动, 这就是偏 光干涉效应造成的, 具体的说, 是不同波长的光在 D 段光纤内快慢轴传输的光程差不同, 在 F 处进行合 光时发生干涉, 不同的光程差导致不同的干涉点. 这种现象造成的光谱形状变化受光源偏振度、耦合 器偏振相关损耗、尾纤长度、光纤融接角的综合影 响, 而这些参量在制作干涉型光纤陀螺时并不能精 确掌握, 所以通过集成器件后的光谱形状不存在重 复性和可预见性, 只能通过实验测得.

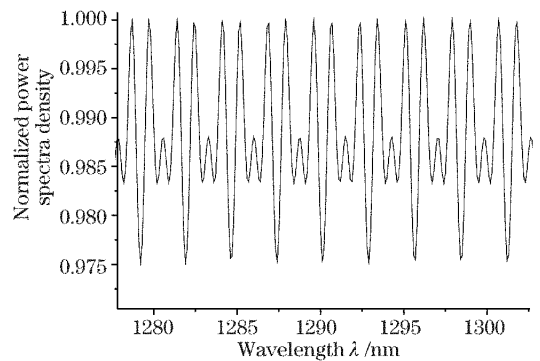


图 2 直线型均匀光谱发生偏光干涉后的谱形仿真结果  
Fig. 2 Simulation of polarization interference with linear spectrum

### 3 实验及分析

针对超辐射光源及超荧光光源进行了实验, 初 始发射光谱如图 3 中 A 所示, 经过图 1 所示的干涉 型光纤陀螺传导光路后, 测试 G 点的光谱, 如图 3 中 B 所示, 此时干涉型光纤陀螺光路为正常工艺状 态, 光谱存在微小的波动起伏, 即在正常光路工艺状 态下, 存在一定的偏光干涉. 人为制造大的光路缺

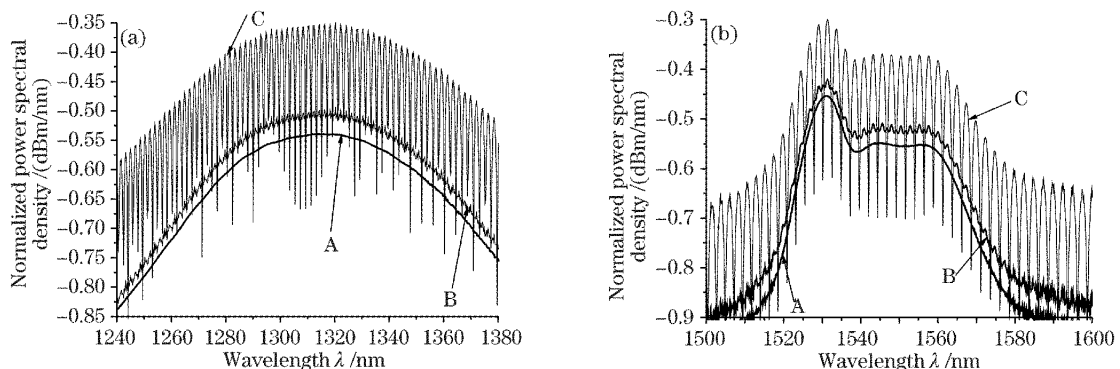


图 3 偏光干涉对光谱形状的影响. (a) 超辐射光源, (b) 超荧光光源

Fig. 3 Effect of polarization interference on spectrum. (a) Superluminescent diode source, (b) superfluorescent source

陷,改变光纤融接角度,获得了图 3 中 C 形状的光谱。光源的中心波长变化会直接导致干涉型光纤陀螺标度因子的变化,同时,光源的宽光谱特性是对降低干涉型光纤陀螺噪声最为重要的指标,从图 3 中看出,光路缺陷导致的光谱变化非常明显,必须研究这种变化是否导致中心波长及谱宽的变化。采用 Agilent86142B 光谱仪对变化前后的光谱进行了采样和计算,超辐射光源中心波长的变化和谱宽的变化见表 1,超荧光光源中心波长的变化和谱宽的变化见表 2。

表 1 图 3(a)超辐射光源偏光干涉前后参量比较

Table 1 Parameters of super luminescent light source in Fig. 3(a)

	Mean wavelength /nm	Spectral width /nm
A	1306.72975	45.73951
B	1306.73011	45.74099
C	1306.73126	45.73878

表 2 图 3(b)超荧光光源偏光干涉前后参量比较

Table 2 Parameters of superfluorescent source in Fig. 3(b)

	Mean wavelength /nm	Spectral width /nm
A	1541.02045	30.37428
B	1541.02072	30.37516
C	1541.02436	30.37879

在偏光干涉最明显的时候(C 情况),超辐射光源中心波长与原光谱中心波长相比,变化 0.0015 nm,谱宽变化小于 0.0017 nm。超荧光光源中心波长的相对变化为 0.004 nm,谱宽变化小于 0.005 nm。而这两种光源本身的常温中心波长稳定性和谱宽稳定性就远比这些变化大,可见,如果仅从中心波长和谱宽这两个基本指标来看,以目前的器件技术条件,即便是达到最大的偏光干涉,即光路融接对准角误差

为 45°,其对光谱中心波长和谱宽的影响也可以忽略,从而对光纤陀螺性能没有影响,事实并非如此。

首先,如果对偏光干涉前后的光谱进行分析比较,可以看出,不管是超辐射光源还是超荧光光源,其偏光干涉后的光谱相当于原始光谱叠加了一个类周期函数,所以传输后光谱的中心波长相当于原光谱的中心波长与某段周期函数的中心值相加,而周期函数频率越高,在一定范围内其中心值与其幅度、初始相位和频率的关系就越小,以上实验获得的光谱,正是因为其高频率的波动,使得中心波长值变化很小,由(8)式可知,波动的频率与光纤拍长,光纤长度有关,实验所用的光纤长度和拍长保证了波动的高频率,如果光纤拍长或光纤长度发生大的变化,会改变波动的频率,当频率很低时,偏光干涉现象会大大影响传输光的中心波长和谱宽,从而影响光纤陀螺的性能。

其次,从前面计算来看,偏光干涉由于不影响光源谱宽,从而不影响光源的相干特性,但事实并非如此。一般来说,可由公式  $L_c = \lambda^2 / (\Delta\lambda)$  来计算图 3(b)中光谱的相干长度<sup>[8]</sup>,计算结果为 78  $\mu\text{m}$ ,此公式仅采用了波长和谱宽两个参量,计算出来的相干长度只是普通意义下的数值,在光纤陀螺中,我们不仅关心普通意义下的光源相干长度,而且关心光源的所有相干特性,光源的具体相干特性可由相干图来描述,而相干图可通过白光干涉仪测量,也可以通过对光源光谱进行傅里叶变换计算来获得,实践表明,两者获得的相干图相同。对图 3(b)中三种光谱做傅里叶变换,结果如图 4 所示,为了清晰起见,将三组曲线以纵坐标为参考拉开一定的距离,取 200  $\mu\text{m}$  内的干涉衬比度来比较[图 4(a)],三者在 200  $\mu\text{m}$  内的干涉衬比度完全相同,这与用公式计算得到的

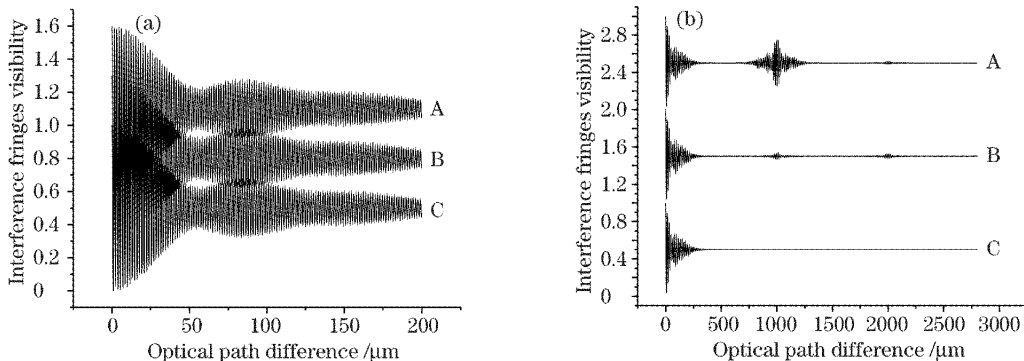


图 4 图 3(b)中三种光谱的干涉衬比度比较。(a) 相干长度内,(b) 出现第三干涉衬比度峰值

Fig. 4 Comparison of interference fringes visibility of three kinds of spectrum in Fig. 3(b). (a) Within coherent length, (b) the appearance of the third interference fringe

结果一样,即同样的中心波长和谱宽有同样的相干长度,到此似乎可以说明偏光干涉并不影响光源的相干特性,但是随着光程差的增加,会发现如图 4(b)的现象,即图 3(b)中不同的光谱会在一定的干涉距离上出现不同的干涉衬比度,在极限情况下即图 4(b)C 情况下,1000  $\mu\text{m}$  处第二个干涉衬比度峰值甚至可以达到相干长度内的峰值量级,即便是只存在轻微偏光干涉情况下,即图 4(b)B 的情况时,1000  $\mu\text{m}$  及 2000  $\mu\text{m}$  处也出现了明显的干涉衬比度。

偏光干涉造成的干涉衬比度第二甚至第三峰值的出现,直接影响到了干涉型光纤陀螺的随机游走系数。例如,图 4 中的第二峰值出现在 1000  $\mu\text{m}$  处,则所有反射、散射、偏振串扰光与主光束或其他非互易光的光程差处于 1000  $\mu\text{m}$  附近的,都会与主光束或其他光产生干涉叠加,使得本来应该由宽光谱光源获得的良好效果大打折扣。外界环境导致的干涉型光纤陀螺传导光路中的拍长变化、光纤长度变化、光源偏振态的变化、耦合器的偏振相关损耗变化,都会导致偏光干涉后光谱的变化,从而改变附加的干涉衬比度峰值的位置和大小,使得干涉型光纤陀螺信号出现相应的噪声。

## 4 结 论

由干涉型光纤陀螺光路缺陷着手,讨论了干涉型光纤陀螺中偏光干涉产生的原理及其必备条件,通过实验及计算,发现在目前的技术条件下,偏光干涉造成的光谱变化不影响光谱中心波长的稳定,从而不影响光纤陀螺的标度稳定性。

由于偏光干涉对光源谱宽的影响可以完全忽略,如果仅用相干长度公式  $L_c = \lambda^2 / \Delta\lambda$  来判断的话,

对光源相干特性没有影响,但是,由白光干涉仪测量或通过傅里叶变换可知,偏光干涉会造成光源干涉图中第二甚至第三干涉衬比度峰值的出现,从而改变光源的相干特性,导致光路噪声的增加,直接影响干涉型光纤陀螺的随机游走系数。由此可知,仅用相干长度一个参量描述光源的相干特性是不全面的,在干涉型光纤陀螺光路制作过程中,应尽量避免或减小传导光路中的偏光干涉现象。

## 参 考 文 献

- 1 S. J. Sanders, L. K. Strandjord, D. Mead. Fiber optic gyro technology trends—a Honeywell perspective[C]. *OFS*, 2002, 1: 5~8
- 2 Christian Seidel, Gert F. Trommer. Modeling of bias errors in fiber-optic gyroscopes with new simulation tool[C]. *Proc. SPIE*, 2004, 5451: 114~123
- 3 James M. Mackintosh, Brian Culshaw. Analysis and observation of coupling ratio dependence of Rayleigh backscattering noise in a fiber optic gyroscope[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(9): 1323~1328
- 4 Kjell Krakenes, Kjell Bløtekjaer. Effect of laser phase noise in Sagnac interferometers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, 11(4): 643~653
- 5 Herve Lefevre. *The Fiber Optic Gyroscope* [M]. Artech House, Inc., 1993
- 6 Shen Weimin, Zhang Yi, Jin Yongxing *et al.*. Theoretical and experimental study on the interference of convergent polarized light for a biaxial crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1558~1562 (in Chinese)  
沈为民,张 艺,金永兴等. 双轴晶体会聚偏光干涉的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1558~1562
- 7 Yuanhong Yang, Hongtao Yu. Digital measuring scheme for half-wave voltage of Y-tap multiple integrated optical circuit[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, 2(11): 640~642
- 8 Li Juntao, Zhu Jian, Wang Zixin *et al.*. Study of temporal and spatial coherence of light emitting diode[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, 32(1): 31~34 (in Chinese)  
李俊韬,朱 健,王自鑫等. 发光二极管的时间与空间相干性研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 31~34