

文章编号: 1002-2082(2008)05-00772-05

# 半外腔微片Nd:YAG正交偏振激光器及其在精密测角中的应用

任成, 谈宜东, 张书练

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京100084)

**摘要:** 设计了一种半外腔微片Nd:YAG正交偏振双频激光器。把2个1/4波片置于激光谐振腔内,一个静止,一个作360°旋转,旋转引起2个1/4波片快轴之间的角度变化被激光器转化成激光2个频率之差的变化,从而输出可调谐的双频激光。采用琼斯矩阵对光在腔内的本征模进行分析,给出了双频频差的理论解释。讨论了一种体积小、分辨率高和可整周测量的新型Nd:YAG激光测角仪的潜在前景。

**关键词:** 微片激光器; 正交双频激光器; 测角

中图分类号: TN248.2

文献标志码: A

## Semi-external cavity Nd:YAG microchip laser with orthogonal linear polarized dual-frequency output and its application in precision angle measurement

REN Cheng, TAN Yi-dong, ZHANG Shu-lian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The Nd:YAG microchip laser with orthogonal linear polarized dual-frequency output was designed. Two quarter-wave plates in which one is static, another rotates around in 360°, are set in the laser cavity. The intra-cavity variable birefringence caused by relative rotation of two wave plates in laser cavity results in changeable frequency difference of dual frequency. Thus, the output of the tunable dual-frequency laser is realized. The eigen-mode of laser in the cavity was analyzed with Jones matrix. The theoretical description for the frequency diversity of dual-frequency is presented. The potential laser goniometer with small volume, high resolution and ability of precision 360° measurement is discussed.

**Key words:** microchip laser; orthogonal dual-frequency laser; angle measurement

## 引言

正交偏振双频激光器是精密测量、外差干涉测长中应用广泛的重要器件,目前双频激光器主要分为2类:一类是传统的基于纵向塞曼效应的塞曼激光器,其频差一般小于3 MHz;另一类是清华大学精

仪器系张书练课题组所研制的2类正交偏振双频激光器:双折射双频激光器<sup>[1]</sup>和塞曼-双折射双频激光器<sup>[2]</sup>,其输出频差分别为40 MHz以上及(3~40)MHz。这些双频激光器大多是基于He-Ne激光器,并在如位移测量、波片相位测量和角度测量<sup>[3-5]</sup>

收稿日期:2008-03-14; 修回日期:2008-04-17

基金项目:国家自然科学基金(041301025)资助课题。

作者简介:任成(1984—),男,湖北浠水人,清华大学精密仪器系博士研究生,主要从事光学仪器方面的研究工作。

E-mail: ren-c06@mails.tsinghua.edu.cn

等多个领域得到广泛运用。

与He-Ne激光器相比,Nd:YAG激光器的增益带宽非常大,易于实现大频差,近年来的研究热点使二极管泵浦微片激光器兼有体积小、结构紧凑、稳定性好等优点<sup>[6-7]</sup>。研究表明:Nd:YAG激光器的频差稳定度比He-Ne激光器高出2个数量级<sup>[8]</sup>。本文设计了一种半外腔微片Nd:YAG正交偏振双频激光器,把2个1/4波片置于激光谐振腔内,一个静止,一个作360°旋转,旋转引起2个1/4波片快轴之间的角度变化被激光器转化成激光2个频率之差的变化,从而输出可调谐的双频激光。采用琼斯矩阵对光在腔内的本征模进行分析,给出了双频频差的理论解释。讨论了一种体积小、分辨率高、可整周测量的新型Nd:YAG激光测角仪的潜在前景。

## 1 工作原理

如图1所示,在半外腔微片Nd:YAG激光器中放入2个1/4波片 $W_1$ 和 $W_2$ ,以光束方向为 $z$ 轴建立坐标系。取 $W_1$ 的快轴与 $x$ 轴夹角为 $\alpha$ , $W_2$ 的快轴与 $x$ 轴的夹角为 $\beta$ 。用琼斯矩阵表示纵模在腔内的相位延迟和偏振态。

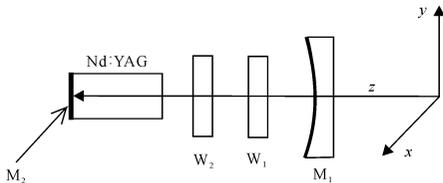


图1 双波片Nd:YAG激光器的输出双频

( $W_1, W_2$ 为2个1/4波片,其中一个以 $z$ 为轴作360°旋转)

Fig. 1 Dual-frequency output of the Nd:YAG laser with two quarter-wave plates ( $W_1, W_2$  are two quarter-wave places, among which  $W_1$  can rotate around axis  $Z$  in 360°)

1/4波片的琼斯矩阵为

$$M_{(\alpha)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & i \sin \alpha \\ i \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{(\beta)} = \begin{bmatrix} \cos \beta & i \sin \beta \\ i \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了简化后面的分析过程,设波片 $W_2$ 的快轴和坐标系的 $x$ 轴重合,即取 $\beta=0$ ,这样,2波片 $W_1$ 和 $W_2$ 的快轴转角( $\alpha-\beta$ )即转动波片 $W_1$ 和 $x$ 轴的夹角 $\alpha$ 。于是,(2)式可改写为

$$M_{(\beta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \quad (3)$$

平面反射镜琼斯矩阵:

$$M_{(m)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

光在腔内往返一周后的偏振态可以由琼斯矩阵描述如下:

$$M = M_{(m)} M_{(\alpha)} M_{(\beta)} M_{(m)} M_{(\beta)} M_{(\alpha)} = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha + i \sin^2 2\alpha & -i \cos 2\alpha \sin 2\alpha \\ -i \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \cos 2\alpha - i \sin^2 2\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

由激光原理可知,光在谐振腔内往返一周,实现自再现,即:

$$M_{(\alpha,\beta)} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解(6)式,得2个本征值:

$$\lambda_1 = \cos 2\alpha + i \sin 2\alpha = \exp[2\alpha i] \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \cos 2\alpha - i \sin 2\alpha = \exp[-2\alpha i]$$

对应的2个本征态为

$$E_1 = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha + 1 \end{bmatrix}, E_2 = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha - 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由上述可以看出,插入2个1/4波片的激光谐振腔,在腔镜和1/4波片之间存在2个正交线偏振光,而且偏振光的偏振面随着 $W_1$ 和 $x$ 轴的夹角变化而改变。

由(8)式得到激光腔内的2个正交偏振光的相位差:

$$\delta = 2\alpha - (-2\alpha) = 4\alpha$$

考虑到 $\alpha=0$ (即快轴和快轴重合),对应频差最大,因此,上式可改写为

$$\delta = |2\alpha - (2\pi - 2\alpha)| = 2\pi - 4\alpha \quad (9)$$

式中 $\alpha$ 是波片 $W_1$ 转动过程中其快轴和 $x$ 轴所夹的锐角。

(9)式是激光束在谐振腔中往返一周(双程)波片引入的2个正交偏振光的相位差,在驻波激光器中,单程相位差为

$$\delta = \pi - 2\alpha \quad (10)$$

频率分裂量 $\Delta\nu$ 和单程位相差 $\delta$ 有如下关系:

$$\Delta\nu = \frac{c}{L} \frac{\delta}{2\pi} \quad (11)$$

将(10)式代入(11)式,得:

$$\Delta\nu = \frac{\pi - 2\alpha}{\pi} \Delta \quad (12)$$

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta} = 1 - \frac{2\alpha}{\pi}$$

式中; $\Delta$ 代表纵模间隔的大小; $\Delta\nu$ 表示频率分裂量的大小。由(12)式可知,2波片 $W_1$ 和 $W_2$ 的快轴所夹锐角和频率分裂量成线性关系。频差在0至一个纵模间隔之间可调。

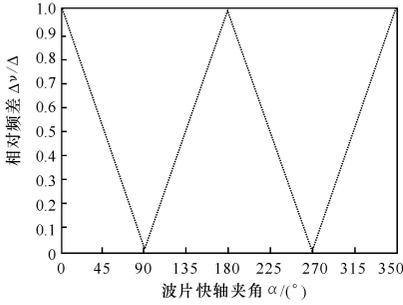
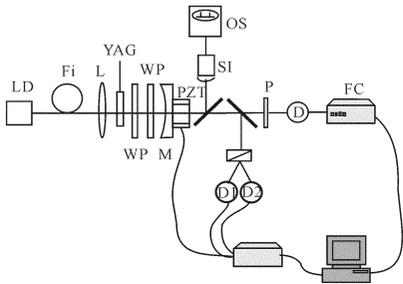


图2 波片快轴夹角和频率分裂量关系

Fig. 2 Frequency difference versus angle between fast axes of  $W_1$ ,  $W_2$

## 2 系统构建

构建图3所示的一套LD泵浦微片Nd:YAG正交偏振激光器。Nd:YAG晶体厚2mm,直径5mm, $Nd^{3+}$ 参杂量1.1at%。晶体左端面镀 $1.064\mu m$ 全反射膜,  $0.808\mu m$ 减反射膜,右端面镀 $1.064\mu m$ 高透膜,透过率为99.9%;用光纤耦合808nm半导体激光器LD作为泵浦源,由自聚焦



LD:808nm 半导体激光器;Fi:传导光纤;L:自聚焦透镜;YAG:Nd:YAG激光晶体;WP:静止1/4波片和旋转1/4波片;M:腔镜;PZT:压电陶瓷;SI:扫描干涉仪;OS:示波器;P:偏振片;D,D1,D2:光电探测器;FC:频率计

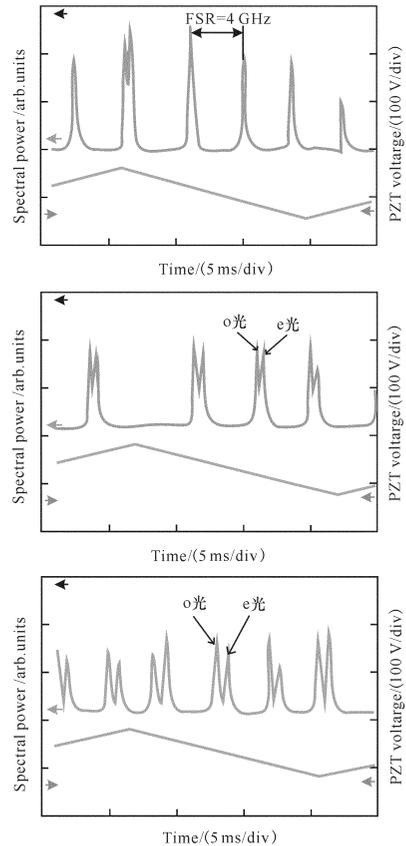
图3 LD泵浦微片Nd:YAG正交激光器测角实验装置图

Fig. 3 Experimental angle measurement set-up based on LD pumped microchip Nd:YAG with orthogonal linear polarized dual-frequency output

透镜L将泵浦光注入晶体,使系统结构进一步减小,同时使晶体远离热源,增加系统稳定性。谐振腔长约50mm,它由Nd:YAG泵浦面和凹面镜M构成,M镀有 $1.064\mu m$ 高反膜,反射率为98.8%。采用半外腔形式(腔内置2片1/4波片,一片固定,一片可绕光轴 $360^\circ$ 旋转)调节泵浦光使系统运行在单模状态。将输出光分束,一路采用扫描干涉仪SI(FSR=4GHz)和示波器观察,一路用偏振片P合光,送入频率计测量其频差。

## 3 实验结果

用扫描仪扫描输出光。固定 $WP_1$ ,旋转 $WP_2$ ,输出正交偏振双频激光,两模频差随 $WP_2$ 主轴的变化而变化。图4记录了实验测得的两模频差与两 $\lambda/4$ 波片夹角 $\alpha$ 的关系。用示波器观察,上曲线是扫描干涉仪输出频谱信号,下曲线是扫描干涉仪三角波扫描电压信号。由图4可见,频差随 $\alpha$ 的增大而线性增大。



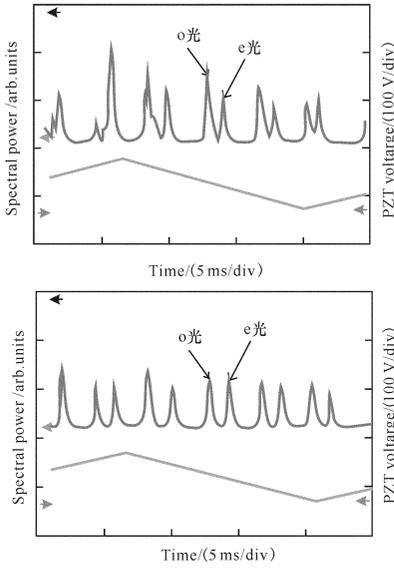


图4 频差随两 $\lambda/4$ 波片夹角的增大而线性增大

Fig. 4 Linear increase of frequency difference with increase of angle  $\alpha$  between fast axes of two quarter-wave plates

由于在初始位置处,旋转波片WP2快轴和固定波片WP1慢轴重合,初始夹角 $90^\circ$ ,频差公式与

(12)式略有不同,应为 $\frac{\Delta\nu}{\Delta} = \frac{2\alpha}{\pi}$ , $\alpha$ 为旋转角。

在 $\alpha=0^\circ$ 时,由于旋转波片WP2快轴和固定波片WP1慢轴重合,此时两模无频差,不发生分裂,输出单模,示波器上两峰之间是扫描干涉仪的自由光谱区,约为4 GHz。当开始旋转其中一个波片时,即 $\alpha$ 逐渐增大时,开始出现频率分裂,单纵模分裂为o光和e光(此处指两光偏振方向垂直),并且分裂量逐渐增大。当 $\alpha=90^\circ$ 时,两波片快慢轴方向一致,频差最大,达到一个纵模间隔,约为3 GHz。图4是频差随两 $\lambda/4$ 波片夹角 $\alpha$ 的变化图,对应 $\alpha$ 分别为 $0^\circ$ , $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ ,与理论计算结果符合得较好。

由于频差 $\Delta\nu$ 与两波片夹角 $\alpha$ 的严格线性对应,可制作一套精密测角装置。只要测出频率差,便可知旋转角度。频差使用频率计测量,不仅方便,而且精度很高。测角灵敏度可由下式给出:

$$K = \frac{\Delta\nu}{\varphi} = \frac{3 \text{ GHz}}{90^\circ \times 3600} = 9.3 \text{ kHz/s} \quad (13)$$

由(13)式可以看出,角度改变1 s,输出频差改变9.3 kHz,这个量是可测的。而Nd:YAG激光器的

频差稳定度能达到 $\frac{\delta(\Delta\nu)}{\Delta} = 10^{-6}$ ,只有氦氖激光器的1%左右<sup>[8-10]</sup>。在本实验装置中,腔长为50 mm,纵模间隔 $\Delta=3$  GHz,即频差不确定度 $\delta(\Delta\nu)$ 只有3 kHz左右,因此本实验装置的潜在灵敏度为0.3",此值还可通过缩短腔长得到进一步提高。

测角系统的核心部件光学测头部分包括准聚焦透镜L,Nd:YAG晶体,静止 $1/4$ 波片,随测量轴旋转的 $1/4$ 波片和腔镜。这些都可以设计得很小(如 $\varphi 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ),Nd:YAG激光器谐振腔长可以做得很短,因此,光学测头可以做得很小(长度几个厘米,直径十几毫米)。这样,测角仪体积就非常小(实际上还可以更小),便于和被测体甚至MEMS系统装配在一起,以便随身携带。而且光学测头部分是全光结构,没有电子元件,具有很强的抗干扰能力。进一步提高Nd:YAG激光器的功率稳定性和频差的稳定度,可使测量分辨率和精度达到角秒甚至更高的精度。

## 4 结论

角度测量是计量科学技术的重要组成部分,广泛地应用于机械、光学、航空、航天、航海等各个领域。测角技术中研究最早的机械式和电磁式测角技术,设备体积大。光学测角方法由于具有非接触、高准确度和高灵敏度的特点而倍受人们的重视,但大都应用于小角度的精密测量中。近20年来,伴随着MEMS的出现及取得的巨大进展,"微型"已成为科学技术研究的热点。但至今还没有发现有关研究体积"微"、范围大测角技术的报道。

本文提出的原理是使用Nd:YAG激光双频技术,利用微片激光器腔内相对旋转的2个 $1/4$ 波片快轴之间的角度变化被激光器转化成激光2个频率之差的变化,从而输出可调谐的双频激光。采用琼斯矩阵给出了双频频差的理论解释。测出频率差便可知旋转角度,因此可以在此基础上构建一套体积小、分辨率高、可整周测量的新型"纽扣"式激光测角仪。

参考文献:

- [1] ZHANG Shu-lian, JIN Guo-fan. Birefringent tuning double frequency He-Ne laser[J]. App. Opt., 1990, 29(9):1265-1267.
- [2] JIN Y Y, ZHANG S L, LI Y. Zeeman-birefringence

He-Ne dual frequency lasers[J]. Chin. Phys. Lett., 2001,18(4):533-535.

[3] 崔柳,张书练. 双频氦氖激光回馈位移测量系统的实验与应用研究[J]. 应用光学, 2007,28(3):328-331.

CUI Liu, ZHANG Shu-lian. Feedback displacement measurement system using dual-frequency He-Ne laser[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 328-331. (in Chinese)

[4] ZONG Xiao-bin, LIU Wei-xin, ZHANG Shu-lian. Measurement of retardations of arbitrary wave plates by laser frequency splitting [J]. Optical Engineering, 2006,45(3):033602.

[5] ZHANG S L, LI K L, REN M. Investigation of high-resolution angle sensing with laser mode-split technology[J]. Applied Optics,1995,34(12):1967-1970.

[6] ZAYHOWSKI J J, MOORADIAN A. Singlefrequency microchip Nd : YAG lasers [J]. Opt. Lett., 1989,14(1):24-26.

[7] ZAYHOWSKI J J. Microchip lasers [J]. Optical Materials, 1999,11(2):255-267.

[8] HOLZAPFEL W, FINNEMANN M. High-resolution force sensing by a diode-pumped Nd : YAG laser[J]. Optics Lett., 1993,18(23):2062-2064.

[9] WOLFGANG H, STEPHAN N R. High-resolution, very broadband force measurements by solid-state laser transducers[J]. Measurement, 2000,28(4):277-291.

[10] HOLZAPFEL W, SETTGAST W. Force to frequency conversion by intracavity photoelastic modulation[J]. Appl. Optics, 1989,28(21):4585-4594.