

doi:10.3788/gzxb20184710.1014001

# 失谐扭转模腔双频 Nd : YAG 激光器

邢俊红,张讷洁,焦明星,刘芸

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院 精密仪器系,西安 710048)

**摘 要:**设计了一种端面泵浦扭转模腔双频 Nd : YAG 激光器系统,该激光器以偏振分光棱镜作为偏振元件,Nd : YAG 晶体的两端各放置一个四分之一波片,在垂直于腔轴的平面内旋转其中一个波片,输出连续可调谐双频激光,最大调谐范围为一个激光谐振腔纵模间隔.采用琼斯矩阵进行了理论分析,得出频率分裂量与波片转角成正比关系.实验研究了扭转模腔选模特性、纵模分裂特性和偏振特性.结果表明:两个四分之一波片正交时,激光器输出线偏振单纵模激光,扭转模腔失谐时,单纵模分裂为两个正交的线偏振模,实验获得的最大频率分裂量为 3 GHz.实验结果与理论分析一致.该连续可调谐双频 Nd : YAG 激光器结构简单,可用于激光干涉测量和微波光电子等领域.

**关键词:**双频激光器;Nd : YAG 晶体;纵模分裂;扭转模腔;频差调谐

中图分类号:TN248; TN242

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1014001-7

## Dual-frequency Nd : YAG Laser with a Detuning Twisted-mode Cavity

XING Jun-hong, ZHANG Ne-jie, JIAO Ming-xing, LIU Yun

(Department of Precision Instruments, School of Mechanical and Instrumental Engineering,  
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A twisted-mode cavity end-pumped dual-frequency Nd : YAG laser has been presented. The polarizing beam splitter is used as the polarizer and two quarter-wave plates are placed on each end of the gain medium Nd : YAG crystal. The frequency difference of the dual-frequency laser can be continuously tuned through the whole cavity free spectral range, by rotating one of two quarter-wave plates in the plane perpendicular to the cavity axis. The theoretical analysis based on Jones matrices is made that the frequency difference is proportional to the rotation angle of the wave plate. The characteristics of twisted-mode cavity mode selection, mode splitting and polarization have been investigated experimentally. The results show that laser is output with the linearly polarized single longitudinal mode when the two quarter-wave plates are perpendicular, and the single longitudinal mode splits into two modes which are orthogonally linearly polarized modes while the twisted-mode cavity is detuning. The largest frequency difference obtained is about 3 GHz. Experimental results match well with the theoretical analysis. Such a continuous tunable dual-frequency Nd : YAG laser with simple structure will find wide applications in the fields of laser interferometry, and microwave photoelectronics, etc.

**Key words:** Dual-frequency laser; Nd : YAG crystal; Mode splitting; Twisted-mode cavity; Frequency-difference tuning

**OCIS Codes:** 140.3480; 140.3530; 140.3600

## 0 引言

可调谐双频固体激光器被广泛应用于激光干涉测量、激光传感和微波光电子等领域,成为目前激光科技

基金项目:国家自然科学基金(Nos.51875455,61805195,61605156,61205135)资助

第一作者:邢俊红(1978-),女,副教授,博士,主要研究方向为全固态激光技术及器件、激光传感与测量技术.Email:xjh3729@xaut.edu.cn

通讯作者:焦明星(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为全固态激光技术及器件、激光传感与测量技术.Email:jiaomx@xaut.edu.cn

收稿日期:2018-05-07;录用日期:2018-07-10

<http://www.photon.ac.cn>

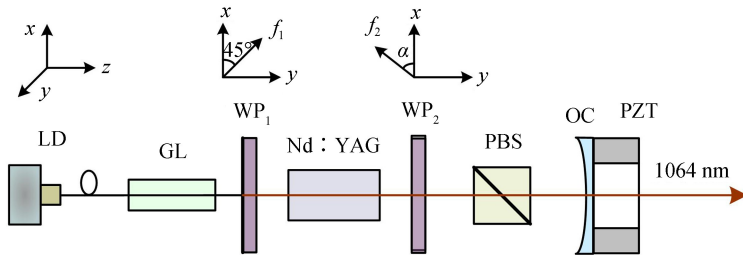
前沿领域中的重要研究方向之一.产生双频激光的主流方法是首先采用短腔法<sup>[1-3]</sup>、法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具<sup>[4-7]</sup>、扭转模腔<sup>[8-11]</sup>、耦合腔<sup>[12]</sup>、和双折射滤光片<sup>[13-15]</sup>等纵模选择技术选出激光单纵模,然后采用自然<sup>[1-2,4,13]</sup>、应力<sup>[12]</sup>、电光或热光<sup>[3,5-7]</sup>等双折射效应使该纵模分裂为两个正交偏振模,从而实现双频激光同时振荡输出.相应地,双频激光频差调谐的方法主要有旋转波片或标准具,调谐应力、电压和温度等.

1965年, SIEGMAN A等提出扭转模腔概念<sup>[8]</sup>,即激光谐振腔内放置一个偏振片,增益介质的两端各放一个 $\lambda/4$ 波片,其快(慢)轴互相垂直,并且两个 $\lambda/4$ 波片的快(慢)轴与偏振片的偏振方向夹角分别为 $\pm\pi/4$ ,构成扭转模腔.研究表明:扭转模腔能够消除增益的空间烧孔效应,是一种有效的激光单纵模选择方法,这种激光器结构简单、输出功率大、易于集成.此后该选模方法得到不断发展,已经在 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 红外激光器中得以应用<sup>[8-10]</sup>.但若两个波片的快(慢)轴不垂直,腔内由于存在双折射效应出现纵模分裂现象,称为扭转模腔的失谐.采用失谐扭转模腔实现双频激光振荡输出的研究尚未见报道.文献<sup>[4,16-19]</sup>在腔内放置两个 $\lambda/4$ 波片,通过改变两个波片的夹角实现双频激光输出及频差调谐,但两个波片均放置在增益介质的一端,并未形成扭转模腔结构,采用标准具选模<sup>[4,16-17]</sup>或未采用选模措施<sup>[18-19]</sup>.

本文设计了一种失谐扭转模腔双频 Nd:YAG 激光器,采用琼斯矩阵理论分析了波片转角与频率分裂量的关系,实验研究了纵模分裂现象和规律,得到的最大频差调谐量为一个激光谐振腔纵模间隔.

## 1 失谐扭转模腔双频激光器系统

失谐扭转模腔双频 Nd:YAG 激光器结构如图 1 所示.从 LD 尾纤出射的 808 nm 泵浦光经自聚焦透镜 GL 汇聚,入射至 Nd:YAG 晶体,增益介质 Nd:YAG 的两端各放置一个 $\lambda/4$ 波片 WP<sub>1</sub>和 WP<sub>2</sub>.WP<sub>1</sub>左端面镀有对 1 064 nm 振荡激光高反、对 808 nm 泵浦光增透的双色介质膜作为激光谐振腔的输入耦合镜,右端面镀有 1 064 nm 增透膜.偏振分光棱镜 PBS 为偏振元件,并且 PBS 的 p 光透光轴与 WP<sub>1</sub>的快轴夹角为 $\pi/4$ .WP<sub>2</sub>和 Nd:YAG 的两个端面均镀有 1 064 nm 增透膜,OC 为输出耦合镜.这样,WP<sub>1</sub>左端面与 OC 构成一个平凹谐振腔.PZT 为压电陶瓷管,改变其内外壁的电电压可以微调腔长.



LD: lasing diode; GL: grin-lens; WP: wave plate; PBS: polarizing beam splitter; OC: output coupler; PZT: piezoelectric tube

图 1 失谐扭转模腔双频 Nd:YAG 激光器

Fig.1 Dual-frequency Nd:YAG laser with a detuning twisted-mode cavity

由扭转模腔理论可知,当 WP<sub>1</sub>和 WP<sub>2</sub>的快(慢)轴互相垂直,并且他们的快(慢)轴与 PBS 对 p 光的透光轴夹角分别成 $\pm\pi/4$ 时, Nd:YAG 中形成了一个能量均匀分布的驻波场,不同纵模要在相同区域内获得增益,就会产生互相抑制的竞争,这样就消除了增益的空间烧孔效应,实现激光单纵模振荡.

设谐振腔轴为 z 轴, PBS 对 p 光的透光轴为 x 轴,即 x 轴与纸面平行, y 轴与纸面垂直.为简化调谐结构,固定 WP<sub>1</sub>,其快轴 f<sub>1</sub>与 x 轴之间的夹角为 45°,在垂直于腔轴的平面内旋转 WP<sub>2</sub>,即改变 WP<sub>2</sub>快轴 f<sub>2</sub>与 x 轴之间的夹角  $\alpha$ , WP<sub>1</sub>和 WP<sub>2</sub>的快(慢)轴不再互相垂直,扭转模腔失谐,单纵模被分裂成两个纵模,实现双频激光输出.

## 2 理论分析

根据矩阵光学理论,当光线沿 z 轴传播时, WP<sub>1</sub>的快轴与 x 轴夹角为 $\pi/4$ ,其琼斯矩阵为

$$J_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-i & 1+i \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix} \quad (1)$$

WP<sub>2</sub>的快轴与 x 轴的夹角为  $\alpha$ ,则琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha - i \sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha (1+i) \\ \sin \alpha \cos \alpha (1+i) & \sin^2 \alpha - i \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于激光在谐振腔内往返振荡,当光沿反方向传播时,WP<sub>1</sub>和 WP<sub>2</sub>的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{J}'_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-i & -(1+i) \\ -(1+i) & 1-i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}'_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha - i \sin^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha (1+i) \\ -\sin \alpha \cos \alpha (1+i) & \sin^2 \alpha - i \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

因为激光器输出激光与输出镜 OC 上光场的分布直接相联,现设光从 OC 出发,在腔内往返 1 周,其琼斯矩阵为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_r \mathbf{J}_2 \mathbf{J}_1 \mathbf{J}_i \mathbf{J}'_1 \mathbf{J}'_2 = \begin{bmatrix} \sin 2\alpha + i \sin 2\alpha \cos 2\alpha & i \cos^2 2\alpha \\ i \cos^2 2\alpha & -\sin 2\alpha - i \sin 2\alpha \cos 2\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{J}_r$  是两个腔镜的琼斯矩阵,即

$$\mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则  $\mathbf{J}$  的本征方程为

$$\mathbf{J}\mathbf{E} = \lambda\mathbf{E} \quad (7)$$

可解得本征值为

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\cos 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) - i \sin 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) = e^{i\left[\pi + 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)\right]} \\ \lambda_2 &= -\cos 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) + i \sin 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) = e^{i\left[\pi - 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)\right]} \end{aligned} \quad (8)$$

由以上分析可知,OC 上存在两个本征光波,一个本征光波在谐振腔内往返 1 周后引起的相移为  $\phi_1 = 2(\alpha + \pi/4)$ ,另一个本征光波在谐振腔内往返 1 周后引起的相移为  $\phi_2 = -2(\alpha + \pi/4)$ ,这两个本征模在谐振腔内往返 1 周后均应满足自洽条件,因此可得两个本征光波的谐振频率分别为

$$\begin{cases} \nu_1 = \frac{c}{2L} \left[ q + \frac{\pi + 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)}{2\pi} \right] \\ \nu_2 = \frac{c}{2L} \left[ q + \frac{\pi - 2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)}{2\pi} \right] \end{cases} \quad (9)$$

两个本征模的频差为

$$\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_2| = \frac{c}{2L} \cdot \frac{2\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)}{\pi} \quad (10)$$

由式(10)可知,如果保持 WP<sub>1</sub>与  $x$  轴夹角不变,绕腔轴旋转 WP<sub>2</sub>,频差随  $\alpha$  呈线性关系,详细描述为:

- 1) 当  $\alpha = -\pi/4$  时,WP<sub>1</sub>与 WP<sub>2</sub>正交,两个本征模简并,输出单纵模,  $\Delta\nu = 0$ .
- 2) 当  $-\pi/4 < \alpha < \pi/4$  时,简并的纵模被分开,即一个单纵模被分裂成两个,频差  $\Delta\nu$  与  $(\alpha + \pi/4)$  成正比.
- 3) 当  $\alpha = 0$  时,  $\Delta\nu = c/4L$ ,为激光谐振腔自由光谱范围的一半.
- 4) 当  $\alpha \approx \pi/4$  时,  $\Delta\nu = c/2L$ ,纵模分裂量等于一个激光谐振腔自由光谱范围,达到最大值.
- 5) 当  $\alpha = \pi/4$  时,WP<sub>1</sub>与 WP<sub>2</sub>重合,相当于一个  $\lambda/2$  波片,与 PBS 组成双折射滤光片,两个本征模简并,输出单纵模,  $\Delta\nu = 0$ .
- 6) 当  $\pi/4 < \alpha < 3\pi/4$  时,随  $\alpha$  增大,纵模分裂量逐渐变小,  $\Delta\nu = c/\pi L [\pi - (\alpha + \pi/4)]$ .
- 7) 当  $\alpha = 3\pi/4$  时,WP<sub>1</sub>与 WP<sub>2</sub>正交,两个本征模再次简并,输出单纵模,  $\Delta\nu = 0$ .

### 3 实验研究

建立如图 1 所示实验系统,LD 的最大功率为 2 W;GL 尺寸为  $\Phi 2.6 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ ;WP<sub>1</sub> 和 WP<sub>2</sub> 均为石

英波片,直径为 10 mm,WP<sub>1</sub>左端面 808 nm 增透膜透过率  $T > 95\%$ ,1 064 nm 高反膜反射率  $R > 99.5\%$ ,右端面 1 064 nm 增透膜透过率  $T > 95\%$ ,WP<sub>2</sub>两面 1 064 nm 增透膜透过率  $T > 99.5\%$ ;Nd:YAG 尺寸为 3 mm×3 mm×5.5 mm,掺杂浓度为 1.1%,左端面 808 nm 和 1 064 nm 增透膜透过率  $T > 95\%$ ,右端面 1 064 nm 增透膜透过率  $T > 95\%$ ;PBS 尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm,对 p 光透射率为 95%;输出耦合镜 OC 的直径为 10 mm,球面曲率半径为 100 mm,球面 1 064 nm 增透膜透过率  $T = 3.6\%$ .谐振腔光学长度约为 50 mm,对应的纵模间隔为 3 GHz.

### 3.1 扭转模腔选模特性

让 WP<sub>1</sub> 和 WP<sub>2</sub> 的快(慢)轴互相垂直,并且他们的快(慢)轴与 PBS 对 p 光的透光轴夹角分别成  $\pm\pi/4$ . 调谐 PZT 电压以微调腔长,当激光器输出功率最大时,说明激光器谐振频率为 Nd:YAG 晶体增益曲线的中心频率.采用自由光谱范围为 3.75 GHz 的共焦扫描干涉仪观察激光的振荡模谱如图 2 所示,在共焦扫描干涉仪的一个自由光谱范围内,同一个纵模被扫描两次,谐振腔以单纵模振荡输出,该扭转模腔具有有效的激光纵模选择能力.采用 LP-3A 型功率计测量了激光器输出功率.图 3 为输入输出功率特性曲线.其中,阈值泵浦功率为 180 mW,激光输出功率随泵浦功率线性增长,斜效率为 15%.泵浦功率为 1 500 mW 时,实验获得的最大输出功率为 198.8 mW.

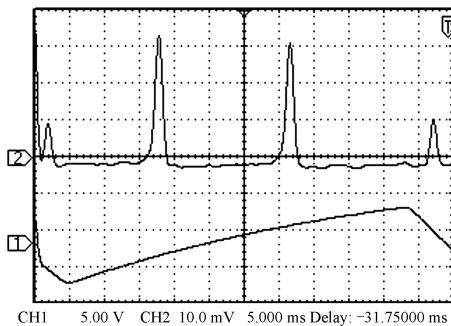


图 2 激光振荡模谱图

Fig.2 Oscillating mode pattern

为检验此时激光的偏振状态,输出镜 OC 后放置一个格兰-泰勒棱镜作为检偏器.初始时,格兰-泰勒棱镜的偏振方向与 PBS 的 p 偏振方向重合,然后在垂直于激光腔轴的平面内旋转格兰-泰勒棱镜.图 4 为激光透过率随格兰-泰勒棱镜转角的变化曲线.可以看出,激光透过率随格兰-泰勒棱镜转角呈余弦曲线变化,周期为  $\pi$ .根据马吕斯定律,说明激光谐振腔输出的单纵模激光为线偏振光,并且偏振方向与 PBS 的 p 偏振方向一致.

### 3.2 纵模分裂特性

固定波片 WP<sub>1</sub>,绕腔轴旋转波片 WP<sub>2</sub>,即改变 WP<sub>2</sub> 的快轴与 x 轴的夹角  $\alpha$ ,观察到纵模出现分裂现象,单纵模分裂成两个纵模,并且频率分裂量随  $\alpha$  连续调谐.频率分裂量与  $\alpha$  的关系如图 5 所示.由图 5 可以看出:

1) 纵模分裂量随  $\alpha$  呈周期性变化,变化周期为  $90^\circ$ ,并且其最大分裂量约为 3 GHz.

2)  $\alpha$  为  $-\pi/4$  时,纵模简并,不产生纵模分裂,频率分裂量为 0.当  $\alpha$  为  $\pi/4$  时,两个纵模再次简并成一个,因此,频率分裂量为 0.

3) 纵模分裂量随  $\alpha$  在  $-\pi/4 \sim \pi/4$  和  $\pi/4 \sim 3\pi/4$  范围内基本为线性变化.

图 6 为 WP<sub>2</sub> 的快轴与 x 轴的夹角分别是  $-35^\circ$ 、 $-25^\circ$ 、 $-15^\circ$ 、 $5^\circ$  时的模谱.对应的纵模分裂量分别为

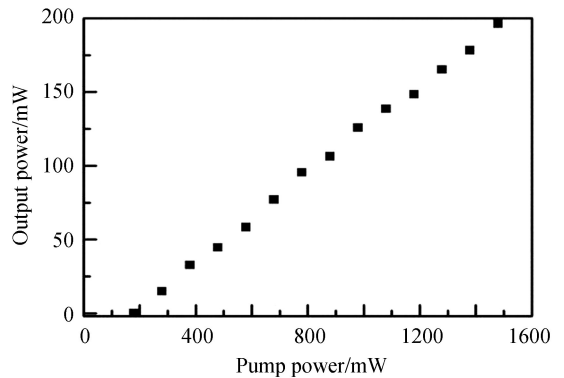


图 3 输入输出功率特性曲线

Fig.3 Output powers versus pump power

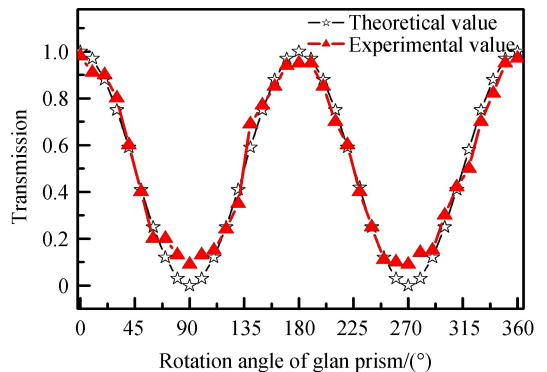


图 4 激光透过率随格兰棱镜转角的关系

Fig.4 Dependence of transmission on the rotation angle of Glan prism

0.33 GHz、0.67 GHz、1.04 GHz 和 1.67 GHz.由图 5 和图 6 可知,频率分裂量与  $\alpha$  存在一定的非线性,这是因为旋转石英波片  $WP_2$  时,波片光轴不可能与腔轴严格垂直,石英晶体存在旋光效应.由图 6 还可以看出,由于扭转模腔的失谐,增益的空间烧孔效应减弱,导致两个纵模存在增益的竞争效应.

采用 LP-3A 型功率计分别测量了  $WP_2$  的快轴与  $x$  轴的夹角为  $-35^\circ$ 、 $-25^\circ$ 、 $-15^\circ$ 、 $5^\circ$  时的激光器输出功率,获得了与图 3 一致的输入输出功率特性曲线.这是因为扭转模腔失谐时,尽管一个单纵模分裂成两个纵模,但纵模分裂量较小(最大值为一个纵模间隔),双频激光依然处于增益介质的中心频率处,另外腔内损耗未发生变化,因此扭转模腔失谐前后激光输入输出功率特性基本保持不变.

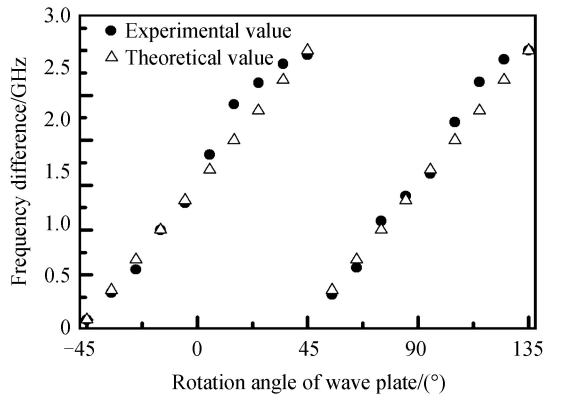


图 5 纵模分裂量与  $\alpha$  的关系

Fig.5 Dependence of mode splitting magnitude on  $\alpha$

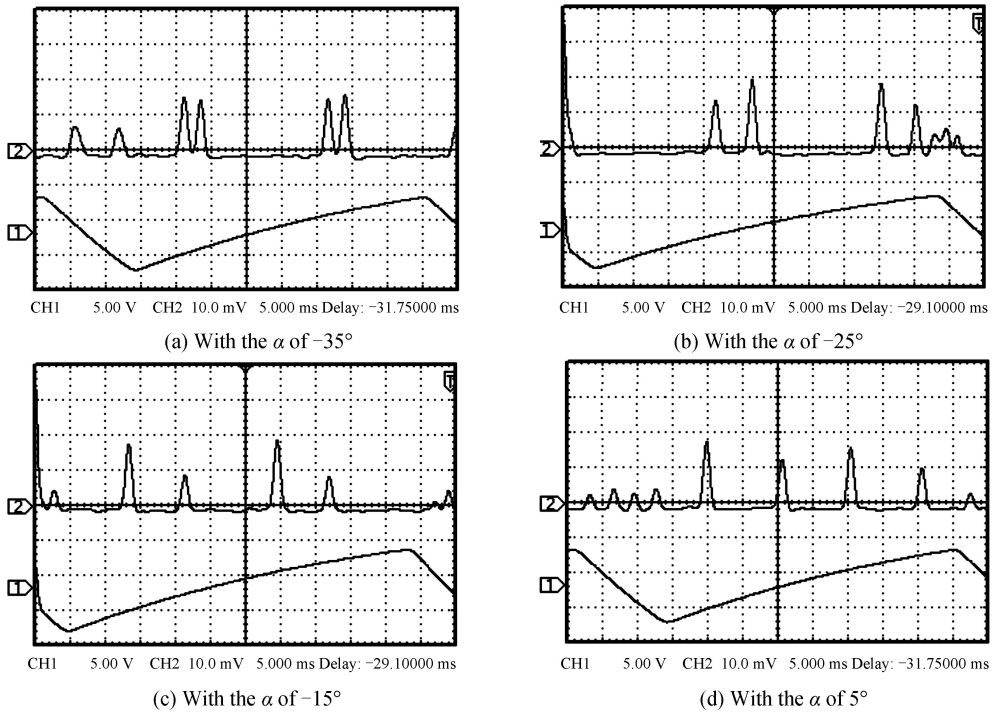


图 6 纵模分裂模谱

Fig.6 Mode splitting pattern

### 3.3 双频激光偏振特性

由 2.1 节和 2.2 节可知,  $WP_1$  与  $WP_2$  正交时,扭转模腔输出线偏振单纵模激光.扭转模腔失谐时,产生纵模分裂.图 7(a) 为  $WP_2$  的快轴与  $x$  轴的夹角为  $-30^\circ$  时,双频激光模谱图,记为纵模①和纵模②.与图 2 和图 6 不同的是,为便于观察,共焦扫描干涉仪的一个自由光谱范围内,同一个纵模只被扫描 1 次.在输出镜 OC 后放置一个格兰-泰勒棱镜,绕激光腔轴 ( $z$  轴) 旋转格兰-泰勒棱镜,当只有纵模①通过格兰-泰勒棱镜时,记为  $0^\circ$ ,如图 7(b) 所示,图 7(c)~(f) 为格兰-泰勒棱镜转角分别是  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时的激光纵模模谱图.可见,格兰-泰勒棱镜转角为  $0^\circ$  时,只有纵模①通过,随格兰-泰勒棱镜转角变大,纵模①透过棱镜的幅值越来越小,而纵模②透过棱镜的幅值越来越大,当格兰-泰勒棱镜转角为  $90^\circ$  时,只有纵模②透过.格兰-泰勒棱镜旋转过程中,纵模①和纵模②的幅值变化基本符合马吕斯定律.因此,线偏振单纵模分裂成两个本征模时,这两个本征模均为线偏振光,并且偏振状态是正交的.



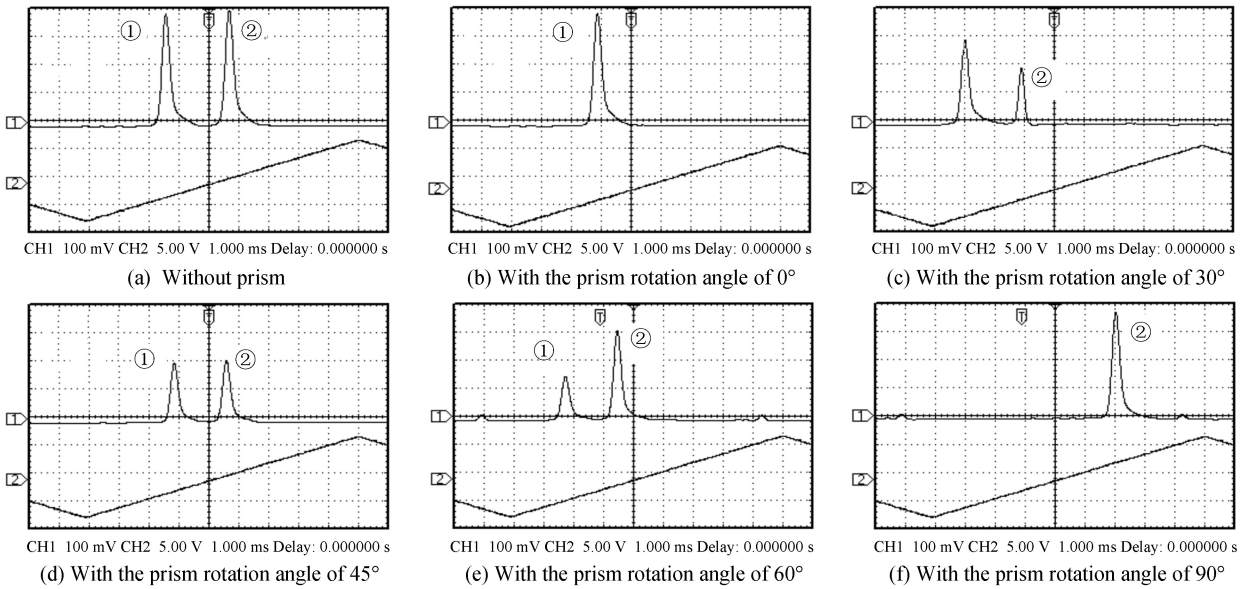


图7 双频激光振荡模谱  
Fig.7 Dual-frequency laser mode pattern

## 4 结论

设计了一种二极管泵浦失谐扭转模腔双频 Nd : YAG 激光器. Nd : YAG 晶体两端各放置一个  $\lambda/4$  波片, 其中一个波片作为输入镜, 在垂直于腔轴的平面内旋转另一个波片, 输出两个偏振状态正交的线偏振模, 实验获得双频激光的最大频差为 3 GHz, 与理论分析一致. 进一步缩短腔长, 可扩大激光器纵模间隔, 因此有望获得更大的频差调谐范围. 这种连续可调谐正交线偏振双频 Nd : YAG 激光器结构简单、调谐方便, 可用于激光干涉测量等领域.

## 参考文献

- [1] MCKAY A, DAWES J M. Tunable terahertz signals using a helicoidally polarized ceramic microchip laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(7): 480-482.
- [2] RROLLAND A, FREIN L, VALLENT M, *et al.* 40-GHz photonic synthesizer using a dual-polarization picrolaser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(23): 1738-1740.
- [3] BRUNEL M, AMON A, VALLENT M. Dual-polarization microchip laser at  $1.53\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(18): 2418-2420.
- [4] KERVEVA L, GILLES H, GIRARD S, *et al.* Beat-note jitter suppression in a dual-frequency laser using optical feedback[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(9): 1099-1101.
- [5] GOUET J L, MORVAN L, ALOUINI M, *et al.* Dual-frequency single-axis laser using a lead lanthanum zirconate tantanate (PLZT) birefringent etalon for millimeter wave generation: beyond the standard limit of tenability[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(9): 1090-1092.
- [6] BRUNEL M, BRETENAKER F, BLANC S, *et al.* High-spectral purity RF beat note generated by a two-frequency solid-state laser in a dual thermo-optic and electro-optic phase-locked loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(3): 870-872.
- [7] PILLET G, MORVAN L, BRUNEL M, *et al.* Dual-frequency laser at  $1.5\mu\text{m}$  for optical distribution and generation of high-purity microwave signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(15): 2764-2772.
- [8] EVTUHOV V, SIEGMAN A E. Twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity [J]. *Applied Optics*, 1965, **394**(1): 142-143.
- [9] XING Jun-hong, JIAO Ming-xing. Two-cavity dual-frequency Nd : YAG laser with a twisted-mode configuration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0214003.  
邢俊红, 焦明星. 扭转模结构双腔双频 Nd : YAG 激光器[J]. 光子学报, 2015, **44**(2): 0214003.
- [10] HAO Er-juan, TAN Hui-ming, LI Te, *et al.* Single-frequency laser at 473 nm by use of twisted-mode technique[J]. *Optics Communication*, 2007, **270**: 327-331.
- [11] POLYNKIN P, POLYNKIN A, MANSURIPUR M, *et al.* Single-frequency laser oscillator with watts-level output power at  $1.5\mu\text{m}$  by use of a twisted-mode technique[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(20): 2745-2747.

- [12] GUDELEV V G, MASHHO V V, NIKEENKO N K, *et al.* Diode-pumped CW tunable two-frequency YAG:Nd<sup>3+</sup> laser with coupled resonators[J]. *Applied Physics B*, 2003, **76**(3): 249-252.
- [13] XING Jun-hong, JIAO Ming-xing, LIU Yun. T-shaped cavity dual-frequency Nd : YAG laser with electro-optical modulation[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(5): 056115.
- [14] CHENG Guang-hua, DONG Shu-fu, WANG Yi-shan, *et al.* The actual linewidth of laser with birefringence filter in oscillator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 790-793.  
程光华, 董淑福, 王屹山, 等. 腔内有双折射滤光片的激光实际线宽[J]. 光子学报, 2003, **32**(7): 790-793.
- [15] WANG Jun-ying, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, *et al.* 1.12W single-frequency green laser adopting birefringent filter technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 321-324.  
王军营, 郑权, 薛庆华, 等. 利用双折射滤光片技术获得瓦级单频绿光输出[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 321-324.
- [16] LI Lei, ZHAO Chang-ming, ZHANG Peng, *et al.* The study on diode-pumped two-frequency solid-state laser with tunable frequency difference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2663-2669.  
李磊, 赵长明, 张鹏, 等. 激光二极管抽运频差可调谐双频固体激光器的研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(5): 2663-2669.
- [17] WU Xia, YANG Su-hui, CHEN Ying, *et al.* Tunable two-frequency solid state laser with coupled-cavity configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0314003.  
吴霞, 杨苏辉, 陈颖, 等. 耦合腔结构可调谐双频固体激光器的研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0314003.
- [18] BRUNEL M, EMILF O, BETENAKER F, *et al.* Molva. Tunable two frequency lasers for lifetime measurements[J]. *Optics Review*, 1997, **4**(5): 550-552.
- [19] REN Cheng, ZHANG Shu-lian. Diode-pumped dual-frequency microchip Nd : YAG laser with tunable frequency difference[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, **42**: 155107.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos.51875455,61805195,61605156,61205135)

引用格式: XING Jun-hong, ZHANG Ne-jie, JIAO Ming-xing, *et al.* Dual-frequency Nd : YAG Laser with a Detuning Twisted—mode Cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1014001

邢俊红, 张讷洁, 焦明星, 等. 失谐扭转模腔双频 Nd : YAG 激光器[J]. 光子学报, 2018, **47**(10): 1014001