

# 腔内倍频多纵模低噪音绿激光器\*

李春明<sup>1,2</sup> 高兰兰<sup>1,2</sup> 檀慧明<sup>1</sup> 钱龙生<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 介绍了一种 LD 泵浦腔内倍频全固体 Nd:YVO<sub>4</sub>-KTP 多纵模、低噪音、高功率稳定绿激光器. 在 Nd:YVO<sub>4</sub>-KTP 绿激光器组成的谐振腔内放置厚度约相等的石英晶体  $\frac{\lambda}{2}$  波片(HWP)和  $\frac{\lambda}{4}$  波片(QWP),使两波片快轴夹角互呈 90°,HWP、QWP 与 KTP 构成复合波片,其作用相当于 QWP,此复合波片与各相异性 Nd:YVO<sub>4</sub> 共同作用有效抑制了腔内偏振模耦合,获得多纵模低噪音绿光输出. 此复合波片相互作用由于抵消了石英晶体波片温度敏感引起的相位延迟量漂移,所以此激光器在不同功率、不同工作温度下,均能稳定可靠地运转于低噪音状态. 实验结果为,绿光输出纵模数为 3 个,噪音小于 0.5%(rms%),12 h 功率稳定性优于 1%.

**关键词** LD 泵浦;腔内倍频;复合波片;多纵模;低噪音

**中图分类号** TN284.1

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-4213(2007)01-0001-4

## 0 引言

LD 泵浦的全固态激光器,因其具有效率高、结构紧凑,输出光束质量高等优点而获得广泛应用并成为研究热点<sup>[1-2]</sup>. 但是 LD 泵浦全固体激光器常用的驻波型腔内倍频谐波输出出现瞬间尖峰即高频噪音,这使激光器的输出功率不稳定,称之为绿光问题,而达不到实际应用中功率稳定性要求.

T Baer<sup>[3]</sup> 首先用速率方程理论模型提出绿光问题是由于激光增益介质的交叉饱和效应和倍频晶体的插入,而不可避免出现的不同纵模间的合频效应所产生,并用驻波腔绿激光器腔内放置标准具距的方法使激光器单频运转而获得低噪音输出. 此外双折滤光片选频使激光器单频运转也解决了绿光噪音问题<sup>[4-5]</sup>. 而 James<sup>[6]</sup> 等人将偏振相关量引入 T Baer 的速率方程,建立偏振相关多纵模速率方程,提出通过控制腔内基频光的偏振态使激光器可以多纵模低噪音谐波输出. 而 Michio Oka<sup>[7]</sup> 等人也指出绿光问题是由基频光偏振模耦合引起. James 和 Michio Oka 均使用激光工作物质 Nd:YAG 和倍频晶体 KTP. 前者认为线偏振泵浦光使 Nd:YAG 产生了双折射,而通过调节 Nd:YAG 和 KTP 的快轴的相对方位夹角  $\beta$  来获得低噪音输出. 而后者认为 Nd:YAG 仍保持各向同性对腔内偏振态没有影响,并引入基频光 QWP 通过调节 KTP 和 QWP 快轴的相对方位夹角  $\gamma$  来有效抑制偏振模耦合获得

低噪音输出.

前者的夹角  $\beta$  受 KTP 晶体的相位延迟大小影响,KTP 既要进行严格的温控(KTP 晶体温度每变化 0.3°C 相位延迟变化  $\frac{\lambda}{20}$ <sup>[8]</sup>),又要进行快轴角度调节,调节难度大. 而后者要受到 QWP 对温度敏感的影响(如厚度为 1.8 mm 的石英波片温度每升高 1°C 相位延迟量减少 1°),这就使  $\gamma$  受腔内功率密度和不同工作温度的影响. 低噪音运转不稳定可靠.

本文在 Nd:YVO<sub>4</sub>-KTP 绿激光器谐振腔内放置厚度约相等的石英晶体  $\frac{\lambda}{2}$  波片和  $\frac{\lambda}{4}$  波片,使两波片快轴互呈 90° 夹角,HWP、QWP、KTP 构成复合波片其作用相当于 QWP,此 QWP 与各向异性 Nd:YVO<sub>4</sub> 共同作用有效抑制了腔内偏振模耦合,获得多纵模低噪音绿光输出. 此复合波片相互作用由于抵消了石英晶体波片温度敏感引起的相位延迟量漂移,所以此激光器在不同功率下,不同工作温度下,均能稳定可靠地运转于低噪音状态.

## 1 理论分析

复合波片由单个波片串接而成,以水平方向为参考方向,第一个波片的快轴与参考方向的夹角为  $\theta$ ,与第二个波片快轴间的夹角为  $\theta$ ,相位延迟量分别为  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,则水平方向的线偏光与第一个波片作用后

$$E_x = A \sin \theta \cos \omega t \quad (1)$$

$$E_y = A \cos \theta \cos (\omega t + \delta_1)$$

再经第二个波片后

Tel:13012557270 Email:yuedong2000@163.com

收稿日期:2005-09-22

$$\begin{aligned}
E_{xx'} &= A \sin \theta \cos \alpha \cos \omega t \\
E_{xy'} &= A \sin \theta \sin \alpha \cos (\omega t + \delta_2) \\
E_{yx'} &= A \cos \theta \sin \alpha \cos (\omega t + \delta_1) \\
E_{yy'} &= A \cos \theta \cos \alpha \cos (\omega t + \delta_1 + \delta_2)
\end{aligned} \quad (2)$$

因此在第二块波片快慢轴上的电矢量分别为

$$\begin{aligned}
E_{x'} &= E_{xx'} + E_{yx'} \\
E_{y'} &= E_{yy'} + E_{xy'}
\end{aligned} \quad (3)$$

总相位延迟为<sup>[9]</sup>

$$\delta = \arctan \left[ \frac{(\sin \delta_1 \cos \delta_2 + \cos \delta_1 \sin \delta_2 \cos 2\alpha)}{(\sin \delta_1 \sin \delta_2 - \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos 2\alpha)} \cdot \frac{\sin 2\theta - \sin 2\alpha \cos 2\theta \sin \delta_2}{\sin 2\theta + \sin 2\alpha \cos 2\theta \cos \delta_2} \right] \quad (4)$$

第一个为  $\lambda/2$  波片,其快轴与参考轴方向呈  $0^\circ$ , 第二个为  $\lambda/4$  波片,两波片快轴就夹角互呈  $90^\circ$ . 则此复合波片的作用结果为

$$\begin{aligned}
E_{x'} &= E_{xx'} + E_{yx'} = 0 \\
E_{y'} &= E_{yy'} + E_{xy'} = A \cos (\omega t + \delta_1 - \delta_2)
\end{aligned} \quad (5)$$

假设温度引起的波片的相位延迟漂移分别为  $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2$ , 总的相位延迟为

$$\delta = (\delta_1 + \Delta\delta_1) - (\delta_2 + \Delta\delta_2) \quad (6)$$

当石英晶体的  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片厚度近似相等时

$$\Delta\delta_1 = \Delta\delta_2$$

此时  $\delta = (\delta_1 + \Delta\delta_1) - (\delta_2 + \Delta\delta_2) =$

$$\delta_1 - \delta_2 = \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4}$$

$\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片组成的复合波片再与 KTP(其快轴与水平方向呈  $45^\circ$ , 设其相位延迟为  $\delta_1'$ ) 复合时总的相位延迟量  $\delta'$  由式(3)得

$$\delta' = \arctan \left( \frac{\cos \delta}{\sin \delta} \right) \quad (7)$$

此时  $\delta'$  值与  $\delta$  相关而与  $\delta_1'$  无关, 因  $\delta$  为  $\pi/4$ , 所以 HWP、QWP、KTP 构成复合波片, 其作用相当于 QWP, 此复合波片 QWP 与 Nd: YVO<sub>4</sub> 双轴晶体的快轴间夹角为  $45^\circ$ , 腔内各晶体放置关系如图 1, 此

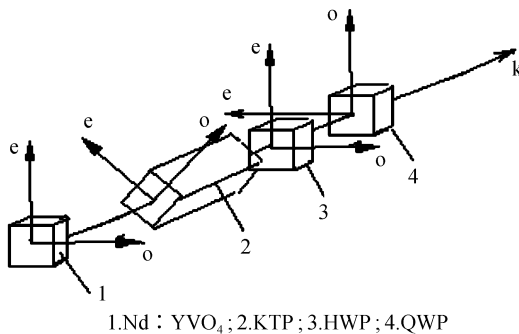


图 1 腔内各晶体放置关系  
Fig. 1 Schematic the relation of placement of crystals inside cavity

时激光谐振腔往返矩阵为

$$M = c(\delta_0)R(45^\circ)c(\pi/2)c(\pi/2)R(45^\circ)c(\delta_0) \quad (8)$$

$c(\delta_0)$  为 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体的双折射矩阵阵,  $R(45^\circ)$  为 Nd: YVO<sub>4</sub> 与复合波片 QWP 快轴间夹角的旋转矩阵,  $C(\pi/2)$  为复合波 QWP 矩阵.

矩阵  $M$  的本征值所对应的本征矢量即为两本征偏振态  $E_1(\omega_1)$  和  $E_2(\omega_2)$ . 其结果为

$$\begin{aligned}
E_1(\omega_1) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\
E_2(\omega_2) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_2 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (9)$$

当

$$E_i = |E_i| \exp [\exp i(\omega_i t + \phi_i)] \quad (10)$$

谐波平均输出功率为

$$\begin{aligned}
I(\omega_1 + \omega_2) &= \langle p(\omega_1 + \omega_2) p(\omega_1 + \omega_2)^* \rangle = \\
&= 1/4 d_{\text{eff}}^2 \langle [(E_1^2 - E_2^2)(E_1^2 - E_2^2)^*] \rangle = 1/4 d_{\text{eff}}^2 \{ |E_1|^4 + |E_2|^4 - 2 |E_1|^2 |E_2|^2 \langle \cos 2[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \rangle \} = \frac{1}{4} d_{\text{eff}}^2 (I_1^2 + I_2^2)
\end{aligned} \quad (11)$$

$\langle \cos 2[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \rangle$  的时间平均为零, 可见偏振模耦合得到有效抑制, 从而可获得低噪声稳定的谐波绿光输出.

## 2 实验装置及结果

实验装置如图 2. 半导体激光器输出波长为 808 nm. 光学耦合系统采用准直镜和扩束棱镜对泵浦光进行圆化后, 用聚焦镜聚焦于激光增益介质. 激光增益介质 Nd: YVO<sub>4</sub> 靠近泵浦光的一面镀 808 nm 减反膜和 1064 nm 高反膜作为腔镜, 另一面镀 1064 nm 减反膜, 厚度为 2 mm, 掺杂浓度为 1%, 厚度约相等的石英晶体的  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片的 4 个通光面均镀 1064 nm 和 532 nm 减反膜, 倍频晶体 KTP 的 2 个通光面均镀 1064 nm 和 532 nm 减反膜, 其快轴相对于激光增益介质 Nd: YVO<sub>4</sub> 快轴呈  $45^\circ$  角放置. Nd: YVO<sub>4</sub>、KTP、 $\lambda/2$  波片、 $\lambda/4$  波片如图 1 放置. 输出镜为曲率半径为 100 mm 的平凹镜,

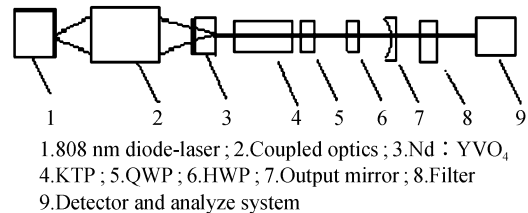


图 2 多纵模低噪声绿激光器实验装置  
Fig. 2 Schematic of the experimental setup multi-longitudinal-mode low-noise green laser

靠腔内凹面镀 1064 nm 高反膜和 532 nm 减反膜,平面镀 532 nm 减反膜.

实验中 KTP 为 9 mm 长,对 KTP 进行温控使其在最佳工作温度下运转,用 2 W 的 808 nm 半导体激光器泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>,在泵浦功率为 1.4 W 时获得 105 mW 的绿光输出.在不同泵浦功率和腔内激光功率下、以及激光工作物质和倍频晶体不同的激光器工作温度下绿光输出均为多纵模低噪音.图 3 和图 4 给出了以上实验条件下绿激光噪音和情况纵模测量情况.由图 4 可见,绿光纵模数为 3 个,图 3 显示噪音小于 0.5%(rms%).对激光器输出绿光功率每分钟测一次,连续测 12 h,其输出功率稳定性优于 1%.

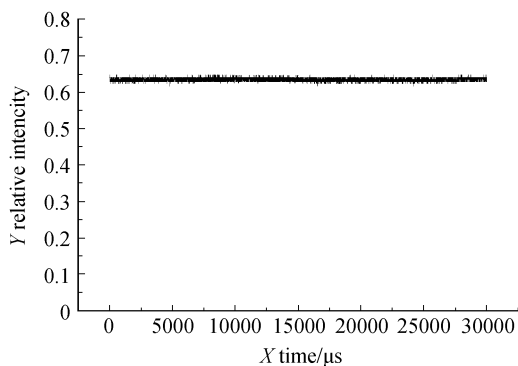


图 3 绿激光输出示波器描述

Fig. 3 Oscilloscope traces of the green laser output

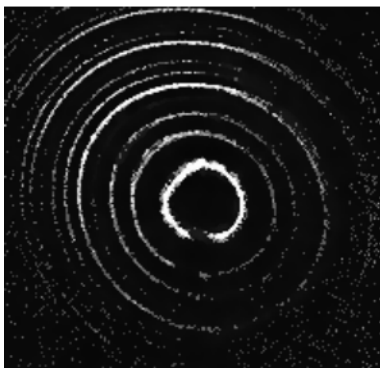


图 4 绿激光输出纵模情况

Fig. 4 Longitudinal-mode structures of the green laser output

## 4 结论

在 Nd:VO<sub>4</sub>-KTP 绿激光器谐振腔内放置厚度约相等的石英晶体的  $\frac{\lambda}{2}$  波片和  $\frac{\lambda}{4}$  波片,使两波片

快轴互呈 90° 夹角,两波片与 KTP 构成复合波片其作用相当于 QWP,此 QWP 与各相异性 Nd:VO<sub>4</sub> 共同作用有效抑制了腔内偏振模耦合,获得多纵模低噪音绿光输出.实验结果绿光输出纵模数为 3 个,噪小于 0.5%(rms%),对激光器绿光输出 12 小时功率稳定性优于 1%.因为此复合波片相互作用由于抵消了石英晶体波片温度敏感引起的相位延迟量漂移,所以此激光器在不同功率、不同工作温度下,均能稳定可靠的运转于低噪音状态,获得高功率稳定性.此激光器结构在大功率绿激光器的低噪音稳定运转中具有优势.

## 参考文献

- [1] YANG Ji-min, LIU Jie, HE Jing-liang. Experimental study of diode-pumped Nd:Gd<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>VO<sub>4</sub> continuous wave laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1153-1155.  
杨济民,刘杰,何京良. LD 抽运 Nd:Gd<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>VO<sub>4</sub> 连续波激光器的实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10):1153-1155.
- [2] LI Long, ZHANG Wei, TIAN Lai-ke, et al. Influence cavity stability of thermal effect in end-pumped double Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):4-7.  
李隆,张伟,田来科,等. 端面泵浦双 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中热效应对腔稳定性的影响[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1):4-7.
- [3] BAER T. Large amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *JOSA*, 1986, **B3**:1175-1180.
- [4] ZHENG Quan, ZHAO Ling, QIAN Longsheng. Low noise operation of a LD-pumped Nd:YAG/LBO blue laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1291-1293.  
郑权,赵岭,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/LBO 蓝光激光器的低噪音运转[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11):1291-1293.
- [5] FAN T Y. Single-axial mode intracavity doubled Nd:YAG laser[J]. *IEEE Quantum Electronics*, 1991, **27**(9):2091-2093.
- [6] JAMES G E, HARRELL E M. Elimination of chaos in intracavity-doubled Nd:YAG laser[J]. *Optics Letter*, 1990, **15**(20):1141-1143.
- [7] MICHIO Oka, SHIGEO Kubota. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *Optical Letter*, 1988, **13**(10):805-807.
- [8] BIERLEIN J D, VANHERZEELE H. Potassium titany phosphate: properties and new applications[J]. *JOSA*, 1989, **B6**:622-633.
- [9] LIAO Yan-biao. Deflect optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社, 2003. 215.

## Intracavity Frequency Doubling Multi-Longitudinal-Mode Low Noise Green Laser

LI Chun-ming<sup>1,2</sup>, GAO Lan-lan<sup>1,2</sup>, TAN Hui-ming<sup>1</sup>, QIAN Long-sheng<sup>1</sup>

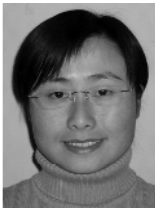
(1 *Changchun Institute of Optics Fine mechanics and Physics Chinese Academy, Changchun 130022*)

(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Received date: 2005-09-22

**Abstract**  $\lambda/4$  plate (QWP) and  $\lambda/2$  plate (HWP) were placed inside the Nd : YVO<sub>4</sub>-KTP green laser cavity with angle 90° between their fast axis. The composite plate composed of HWP, QWP and KTP has the function of QWP. The composite plate with Nd : YVO<sub>4</sub> can effectively suppress the coupling of polarized modes, and multi-longitudinal-mode low-noise green laser was obtained. Since the composite plate counteracted the phase shift induced by temperature sensitivity of quartz plate, the green laser operated with low-noise reliability in different output power and different operation temperature. The three-longitudinal-mode, the noise of less than 0.5% (rms%) and output power stability of less than 1% for 12 hour are obtained in the green laser.

**Key words** LD-pumped; Intracavity frequency doubling; Composite plate; Low-noise; Multilongitudinal-mode



**LI Chun-ming** was born in 1974. She has studied in Changchun Institute Of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science for Ph. D. degree. Her research fields are mainly in LD pumped all Solid-state laser and Nonlinear Optics.