

高稳定 LD 泵浦腔内倍频 Nd : YVO₄/KTP 连续绿光激光器*

张玉萍¹ 郑义² 张会云¹ 王鹏¹ 姚建铨¹

(1 天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 教育部光电信息技术科学重点实验室,
南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072)

(2 郑州大学激光与光电信息技术重点实验室, 郑州 450052)

摘要 设计出一种能够较好地补偿激光晶体热效应的激光谐振腔, 实现了高稳定 LD 单端泵浦 KTP 腔内倍频 Nd : YVO₄ 连续绿光激光器. 当晶体吸收的泵浦功率为 24.56 W 时, 532 nm 激光功率达到 5.3 W, 光-光转换效率达到 21.6%, 激光模式为 TEM₀₀ 模. 在输出功率 5W 左右时, 激光器 1 h 功率不稳定性优于 0.6%.

关键词 LD 端面泵浦; 连续; Nd : YVO₄; KTP; 532nm

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

大功率绿光激光器在国外已经产品化, 相干公司和光谱物理公司已实现大于 10 W 的高稳定连续绿光激光器产品; 国内也有许多超过 5W 的连续绿光激光器的研究报道^[1~6], 但是都没有解决激光功率稳定性问题, 而功率稳定性在激光器的应用中是很重要的指标, 功率稳定性不高在很大程度上限制了该激光器的实用化和产品化.

本文使用 Nd : YVO₄ 和 KTP 晶体进行了高功率高稳定 LD 端面泵浦连续绿光激光器的实验研究, 研制了高稳定 LD 泵浦腔内倍频 5.3W Nd : YVO₄/KTP 连续绿光激光器. 当晶体吸收的泵浦功率为 24.56 W 时, 532 nm 激光功率达到 5.3 W, 光-光转换效率达到 21.6%, 激光模式为 TEM₀₀ 模, 特别在激光器的稳定性方面取得了很好的结果, 在输出功率 5 W 左右时, 激光功率不稳定性优于 0.6%. 与国内外同类激光器相比较, 该激光器在功率稳定性方面处于领先水平, 完全达到了实用化和产品化要求.

1 实验装置

该激光器采用折叠腔结构, 折叠腔与直腔结构相比具有模参量调整灵活以及模体积大, 腔内倍频可降低阈值, 产生较细的激光束腰, 提高激光器对泵浦光的利用率, 同时易于获得基模光斑输出等优点.

图 1 为实验装置示意图. 谐振腔镜及晶体镀膜参量见表 1.

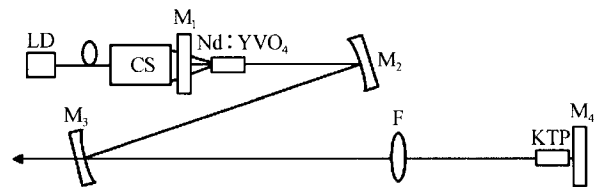


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

表 1 谐振腔镜及晶体镀膜参量

元件	一面镀膜情况	另一面镀膜情况	曲率半径 R 或焦距 f
M ₁	R1064 nm > 99.8% R808 nm < 5%	R808 nm < 0.1	R = ∞
M ₂	R1064 nm > 99.8%	—	平凹 R = 200
M ₃	R1064 nm > 99.8% R532 nm < 5%	R532 nm < 0.1	平凹 R = 200
M ₄	R1064 nm > 99.8% R532 nm > 99%	—	R = ∞
F	R1064 nm < 0.1% R532 nm < 0.5%	R1064 nm < 0.1 R532 nm < 0.5	平凸 f = 50
Nd : YVO ₄	R1064 nm < 0.1%	R1064 nm < 0.1	R = ∞
KTP	R1064 nm < 0.1% R532 nm < 0.5%	R1064 nm < 0.1 R532 nm < 0.5	R = ∞

实验采用美国相干公司生产的一个 30W 的光纤耦合半导体激光器 (LD) 作为泵浦源, 光纤芯径 800 μm, 数值孔径 0.22, 连续运转. 从光纤射出的光经耦合系统 (CS) 耦合到腔内, 耦合系统工作距 f = 35 mm, 聚焦光斑比 1 : 1, 耦合效率为 89.7%. 调整 LD 温度, 使其与 Nd : YVO₄ 晶体的吸收峰匹配.

实验中所用的 Nd : YVO₄ 晶体和 KTP 晶体是由中科院福建物质结构研究所提供的. 在大功率

*河南省院士科研启动基金、河南省高校创新人才培养对象基金、教育部南开大学和天津大学科技合作基金资助项目
Tel: 022-27407676 Email: yzheng@zzu.edu.cn
收稿日期: 2005-11-12

LD 端面泵浦情况下,为减小热效应,选用低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体,相应地增加晶体的通光长度. 实验中选用掺杂浓度为 0.3 at.%, a 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体为增益介质,晶体尺寸为 3×3×10 mm³. KTP 晶体采用 II 类非临界相位匹配,尺寸为 4×4×10 mm³. Nd:YVO₄ 晶体和 KTP 晶体均采用恒温冷却水循环装置进行温度控制,控温精度为 ±0.2℃. Nd:YVO₄ 晶体控制在 14℃,KTP 晶体控制在 19.5℃. 将晶体用铝箔包裹后放入紫铜热沉中,保持较好的热接触,再将紫铜热沉放入水冷紫铜夹中,并把紫铜夹放在五维调整架上以便调整.

激光器输出功率用 Newport 公司生产的 8025C 型双通道功率能量计测量.

2 Nd:YVO₄ 晶体热效应补偿和谐振腔稳区研究

Nd:YVO₄ 晶体的热效应影响到激光器的各方面性能,如腔的稳定性、模的尺寸、模式匹配、光束质量等,因此在设计和优化激光器系统时必须考虑晶体的热效应.

为了实现激光器高功率高稳定运转,采取了以下措施:1)采用低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体以减小激光晶体的热效应;2)对温度精确控制;3)用谐振腔稳区理论计算表明,在谐振腔中加入透镜,并选择合适的腔参量,能够在较大的泵浦功率范围之内从

根本上补偿了激光晶体的热透镜效应. 以此为指导,本文设计了加入透镜的四镜折叠腔. 选择谐振腔参量时,首先从实验上测量了激光晶体的热透镜焦距,然后运用 ABCD 定律进行稳区计算,依据计算结果选择合适的谐振腔参量.

2.1 四镜折叠腔的往返矩阵

在措施 1)、2)的基础上,为了定量研究激光晶体的热效应,从实验上测量了晶体的热焦距. 测量结果显示,激光晶体的热效应很明显. 单端泵浦时,当晶体吸收 25 W 泵浦功率时,热焦距大约为 30 mm,当晶体吸收 15 W 泵浦功率时,热焦距大约为 80 mm. 计算中,把 Nd:YVO₄ 晶体等效为一薄透镜 F_T,焦距 f_T. 图 2 是谐振腔的等效示意图,图中,θ 为折叠半角, l₁₁ 为 M₁ 到 Nd:YVO₄ 晶体中心的距离, l₁₂ 为 Nd:YVO₄ 晶体中心到 M₂ 的距离, l₂ 为 M₂ 到

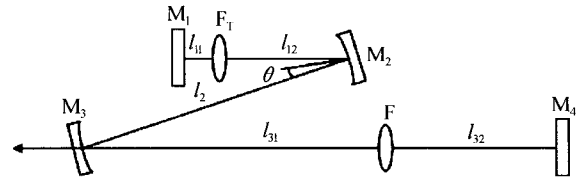


图 2 谐振腔等效

Fig. 2 The corresponding thermal lens equivalent resonator M₃ 的距离, l₃₁ 为 M₃ 到凸透镜中心的距离, l₃₂ 为凸透镜中心到 M₄ 的距离. 利用 ABCD 定律^[7]和高斯光束传输规律^[8]写出四镜折叠腔在子午面内和弧矢面内的往返矩阵,它们分别为

$$M_t = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_3 \cos \theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ \begin{bmatrix} 1 & l_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_3 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{31} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ \begin{bmatrix} 1 & l_{32} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{32} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{31} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_s = \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{R_3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ \begin{bmatrix} 1 & l_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{R_3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{31} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ \begin{bmatrix} 1 & l_{32} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{32} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{31} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则谐振腔的稳态振荡条件为 $-1 < \frac{D_t + A_t}{2} < 1$, $-1 < \frac{D_s + A_s}{2} < 1$, 即子午面和弧矢面内的光束同时满足稳态振荡条件时, 谐振腔才是稳定腔.

2.2 稳区图和谐振腔光路参量选取

根据谐振腔的稳态振荡条件及像散补偿条件, 利用计算机画出四镜折叠腔的稳区图, 再从中选取最优化的参量. 作稳区图时以 l_2 和 θ 为坐标变量, 因为折叠臂 l_2 和折叠角 θ 的变化对稳区图的影响比较敏感. 其它参量根据实验经验并经计算机多次反复计算确定, $l_{11} = 30$ mm, $l_{12} = 80$ mm, $l_{31} = 230$ mm, $l_{32} = 100$ mm. 由于不同泵浦功率下的热焦距是不同的, 在谐振腔参量固定的情况下, 可能导致大泵浦功率下谐振腔的不稳定. 而该激光器采用在四镜折叠腔中加入凸透镜对热效应进行补偿的方法较好地解决了这一问题. 稳区图显示取这一组参量时凸透镜的补偿范围较大, 从 $f_T = 30$ mm 到 $f_T = 80$ mm, 取 $l_2 = 230$ mm, $\theta = 10^\circ$ 时, 谐振腔都工作在稳区. 本文仅给出当 $f_T = 50$ 时的稳区图, 如图 3 (其中黑色区域为稳区), 图中其它参量分别为 $l_{11} = 30$ mm, $l_{12} = 80$ mm, $l_{31} = 230$ mm, $l_{32} = 100$ mm.

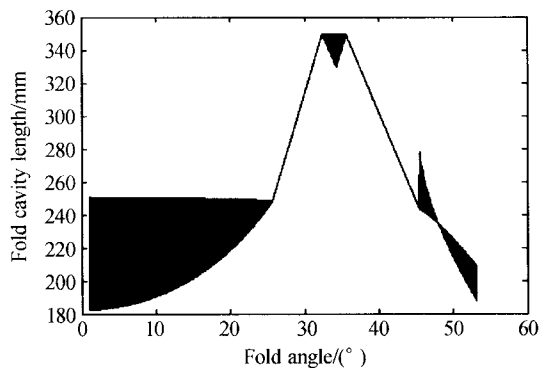


图3 四镜折叠腔的稳区图

Fig. 3 Stable range of the four mirror cavity

KTP 放置于凸透镜与之间, 放置前和放置后对稳区图影响不大.

根据稳区图, 选取 $l_2 = 230$ mm, 折叠半角 $\theta = 10^\circ$ 进行激光器实验. 其他谐振腔参量为: $l_{11} = 30$ mm, $l_{12} = 80$ mm, $l_{31} = 230$ mm, $l_{32} = 100$ mm, KTP 放置于透镜与 M_4 之间, 因为束腰位于 M_4 镜, KTP 晶体应尽量靠近 M_4 .

3 实验结果与分析

在 Nd:YVO₄ 晶体的冷却温度控制在 14°C , KTP 晶体的冷却温度控制在 19.5°C 条件下; 通过温控系统将 30W-LD 峰值波长移到与 Nd:YVO₄ 晶体吸收峰吻合. 再通过改变 LD 工作电流改变泵

浦功率, 得到 532 nm 激光的输入输出特性曲线, 如图 4. 图中泵浦功率为晶体吸收的 808 nm 激光功率. 在 LD 泵浦功率为 24.56 W 时, 得到 5.3 W 的绿光输出, 光-光转换效率为 21.57%.

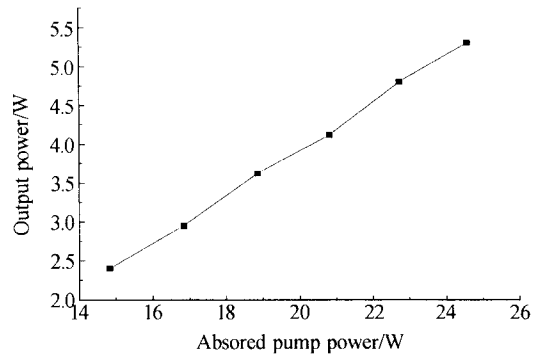


图4 激光器输入输出特性

Fig. 4 Laser output power versus absorbed pump power

以前因为加入透镜后增加了损耗, 所以实验的光光转换效率不是很高. 但由于凸透镜很好的补偿了激光晶体的热效应, 获得了非常稳定的绿光激光输出. 实验还测量了绿光输出功率在 4.8 W 和 5.3 W 附近时的 1 h 功率稳定性, 分别为 0.45% 和 0.51%, 见图 5.

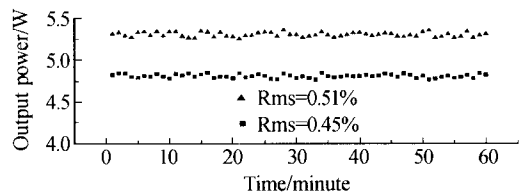


图5 输出功率分别 4.8 W 和 5.3 W 时的 1 h 功率稳定性
Fig. 5 The stability testing at the output power level of 4.8 W and 5.3 W in an hour

4 结论

激光晶体热效应是产生绿光激光功率不稳定的关键因素, 通过对热效应的定量分析, 在腔内插入凸透镜, 有效地克服了热效应, 成功研制出高稳定 LD 端面泵浦 KTP 内腔倍频 Nd:YVO₄ 5.3 W 连续绿光激光器. 当晶体吸收的泵浦功率为 24.56 W 时, 532 nm 激光功率达到 5.3 W, 光-光转换效率达到 21.6%, 激光模式为 TEM₀₀ 模, 功率不稳定性优于 0.6%. 目前正在有关双端泵浦的计算和准备工作, 有望实现大于 10 W 的高稳定绿光输出.

参考文献

- He J L, Hou W, Zhang H L, *et al.* Continuous wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YVO₄ laser. *Chin Phys Lett*, 1998, **15** (6): 418~419
- 何京良, 侯玮, 张恒利, 等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器. *中国激光*, 2000, **27**(6): 481~

- 484
He J L, Hou W, Zhang H L, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(6):481~484
- 3 李隆, 田丰, 赵致民, 等. LD 端面泵浦折叠腔 Nd : YVO₄/LBO 激光器. *光子学报*, 2004, **33**(4):396~399
Li L, Tian F, Zhao Z M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):396~399
- 4 田丰, 解慧明, 陈浩伟, 等. 半导体激光端泵腔内倍频 Nd : YVO₄/LBO 连续波 8 W 绿光激光器. *光子学报*, 2004, **33**(6):651~653
Tian F, Xie H M, Chen H W, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):651~653
- 5 Bai Y, Li L, Chen H W, *et al.* Continuous-wave Green laser of 9.9W by Intracavity frequency doubling in laser-diode single-end-pumped Nd : YVO₄/LBO. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**(8):1532~1534
- 6 侯学元, 李宇飞, 孙渝明, 等. LD 泵浦的 Nd:GdVO₄/KTP 腔内倍频激光器. *光子学报*, 2004, **33**(1):11~14
Hou X Y, Li Y F, Sun Y M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):11~14
- 7 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理. 北京:国防工业出版社, 2000. 75~79
Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, *et al.* *Principle of Laser*. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 75~79
- 8 王青圃, 张行愚, 赵圣之, 等. 激光物理学. 济南:山东大学出版社, 1993. 170~181
Wang Q P, Zhang X Y, Zhao S Z, *et al.* *Laser Physics*. Jinan: Shandong University Press, 1993. 170~181

High Stability LD-pumped CW Laser at 532 nm by Intracavity-doubled Nd : YVO₄ Laser Using KTP

Zhang Yuping¹, Zheng Yi², Zhang Huiyun¹, Wang Peng¹, Yao Jianquan¹

¹ Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Optoelectrics Information Science and Technology, EMC, Cooperated Institute of Naikai University and Tianjin University, Tianjin 300072

² Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052

Received date: 2005-11-12

Abstract A laser resonator that can compensate the thermal lensing effect of the laser crystal greatly is designed. Thus a continuous wave laser with high stability at 532 nm by intracavity frequency doubling of a Nd : YVO₄ laser based on the nonlinear crystal KTP is achieved. The 532 nm laser reaches 5.3 W when the absorbed pump power is 24.56 W, with TEM₀₀ mode and an optical to optical efficiency of 21.6%. The amplitude noise is better than 0.6% (rms) in an hour when the output power is at about 5W.

Keywords LD-pumped; Continuous wave; Nd : YVO₄; KTP; 532 nm



Zhang Yuping was born on Jan. 15, 1976. She graduated from Qufu Normal University with a Master's Degree in January, 2004. At present, she is working for her doctor's degree at Tianjin University. Her main research fields focus on high power all-solid-state laser, nonlinear frequency conversion optics and photonic crystal.