

# 热效应不敏感的 Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP 全固态绿光激光器设计

刘蓉<sup>1</sup>, 李锋<sup>2</sup>, 白晋涛<sup>3</sup>

(1. 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032; 2. 商洛学院, 陕西 商洛 726000;

3. 西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069)

**摘要:**利用基于传播圆变换理论的图解分析方法,得到了具有激光晶体热透镜不敏性的 V 形折叠腔参数。实验中通过 LD 端面泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub>, 获得了稳定的 TEM<sub>00</sub> 模激光输出。将非线性晶体 KTP 置于基波的腰斑处, 在 19.7W 的注入泵浦功率下获得了 3.68W 的 531.5nm 连续绿光激光输出, 考虑到泵浦耦合用准直聚焦筒 10% 的耦合损耗, 实现光-光转换率 21%。经测量该激光腔输出功率及热稳定性在国内 LD 泵浦全固态连续绿光激光器研究领域处于领先水平。

**关键词:** 固体激光器; 绿光激光; 传播圆变换理论; Nd:GdVO<sub>4</sub>; 热透镜效应

**中图分类号:** TN 248.1

**文献标识码:** B

## Thermally Insensitive LD Pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP All-solid-state Green Laser

LIU Rong<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, BAI Jin-tao<sup>3</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710032, China; 2. ShangLuo Institute, ShangLuo 726000, China; 3. Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** With a graphic analysis method, the parameters of three-mirror V-type folded cavity by diode laser end-pumped are optimized, which make the cavity not sensitive to the variation of thermal lens effect of laser crystal, and obtain stable TEM<sub>00</sub> mode output easily. When putting the nonlinear crystal KTP at the waist of fundamental wave, we got diode laser end pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP cw green laser. At 19.7W end pump power, 3.68W of continuous output green laser was obtained. Considering of the loss of coupling system, the optical-optical conversion efficiency of this all-solid-state laser was 21%.

**Key words:** all-solid-state laser; green laser; graphic analysis method; Nd:GdVO<sub>4</sub>; thermal effect

### 1 引言

LD 泵浦固体激光器是具有结构紧凑、体积小、稳定性好、光束质量好的相干光源, 因而在高密度光存储、高密度光学测量、光谱研究、激光雷达、空间光通讯、激光测距、海底通讯、化学成分分析、医用仪器、三维成像、目标识别和机器人等方面已显示出潜在的应用前景。而通过非线性谐波变换获得的可见光波段激光更是扩展了全固态激光器的应用领域, 使这种激光器的研究成为激光技术的热点。但固体增益介质的使用不可避免地引入了热效应问题, 尤其

是热透镜效应的产生造成激光谐振腔参数的变化, 导致了激光输出功率、模式等随泵浦功率强度的不稳定状态, 这种不稳定性限制了固体激光器的可靠运转。所以在固体激光器谐振腔设计中设法消除谐振腔的热效应敏感性成为腔型设计的一个重要出发点。

本文利用传播圆变换理论结合谐振腔图解分析

**基金项目:** 陕西省教育厅专项基金项目 (No. 05 JK185) 资助。

**作者简介:** 刘蓉 (1982 -), 女, 硕士, 从事全固态激光器件的研究。E-mail: liurong0918@163.com

**收稿日期:** 2008-09-23

方法,通过数值计算筛选优化谐振腔参数,设计了V形折叠腔,并使谐振腔具有激光晶体热透镜不敏性。基于计算参数,选用Nd:GdVO<sub>4</sub>作为激光晶体,KTP作为倍频晶体,搭建了热透镜效应不敏感的V形折叠腔腔内倍频激光装置。实验测得的不同输出功率下的倍频光功率稳定性证明了该折叠腔具有良好的热透镜效应不敏性,与理论设计相符。

### 2 谐振腔设计

近年来,激光二极管(LD)端面泵浦的全固态激光器有很多采用了V形折叠腔结构<sup>[1-3]</sup>。这种折叠腔与直腔结构相比具有模参数调整灵活以及腔内有效空间大,有利于热效应不敏感激光谐振腔的设计。本文采用图解的方法对图1(a)所示V形腔作了较为深入的热动力分析,对正确选择合理的谐振腔结构、优化腔型设计具有一定的指导意义。

在图1(b)中给出了这种V形腔的等效光路。为了分析简化,这里忽略了像散作用。因而可用一个单一焦距值的透镜F等效折叠镜M,将激光介质等效为一个紧帖于平面镜M<sub>1</sub>的薄的热透镜F<sub>t</sub>,其焦距值随光泵浦功率的增大,可以从∞变化至10cm附近。因此,其工作特性要求谐振腔的热动力参数1/f<sub>t</sub>能够大幅度地变化。

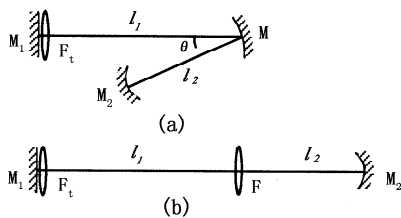


图1 V形腔结构(a)及其等效光路(b)

根据传播圆变换理论<sup>[4]</sup>,在图2中示出了热透镜F<sub>t</sub>的焦距为不同值时M<sub>1</sub>镜的σ<sub>1</sub>传播圆的“像圆”σ<sub>1a</sub>′,σ<sub>1b</sub>′,σ<sub>1c</sub>′,σ<sub>1d</sub>′……等,这些“像圆”σ<sub>1</sub>′再经过透镜F后继续转变为它们的“像圆”σ<sub>1a</sub>′′,σ<sub>1b</sub>′′,σ<sub>1c</sub>′′,σ<sub>1d</sub>′′……。由这些“像圆”σ<sub>1</sub>′′与M<sub>2</sub>镜(曲率半径为R<sub>2</sub>)的传播圆σ<sub>2</sub>(直径为R<sub>2</sub>)的相对位置和相交关系可以得到FM<sub>2</sub>腔臂中的光模特性。

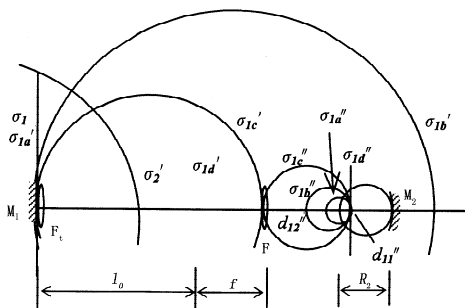


图2 V形激光腔的图解分析

根据模像理论,传播圆经过透镜变换时,满足以下关系:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}, \frac{1}{d+R} + \frac{1}{d'-R'} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

其中,d和d′分别为“物”波面和“像”波面与光轴的焦点离薄透镜的距离(波面与传播圆的关系参见文献[4]),前者在透镜的左侧为正值,后者在透镜的右侧为正值,否则为负值;R与R′分别为“物”波面与“像”波面的曲率半径。

谐振腔内存在稳定高斯光束的条件要求传播圆能够相交,并考虑腔的动态稳定性,选择M<sub>2</sub>镜的位置为:

$$l_2 = d_{11}'' + R_2 - \delta = \frac{f(l_0 + f)}{l_0} + R_2 - \delta \quad (2)$$

其中,δ满足:0 < δ < f<sup>2</sup>/l<sub>0</sub>。

根据σ<sub>1</sub>′′圆与σ<sub>2</sub>相交的几何关系,可以给出l<sub>2</sub>腔臂中的侧焦点及束腰参数为:

$$b_2 = \sqrt{y_2(R_2 - y_2)} \quad (3)$$

其中:

$$y_2 = \frac{(\delta f^2 - l_0 \delta^2)f_t + \delta^2 l_0^2}{(2\delta l_0^2 - R_2 l_0) + (f^2 - 2\delta l_0 + R_2 l_0)f_t} \quad (4)$$

进而,可以得到l<sub>2</sub>臂中的基模光斑束腰尺寸为:

$$w_2 = \sqrt{\frac{b_2 \lambda}{\pi}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} y_2 (R_2 - y_2)} \quad (5)$$

根据V形谐振腔图解分析的腔型设计方法,利用Mathematics软件进行热稳腔计算。通过多次计算和比较,我们确定热稳腔参数如下:l<sub>0</sub> = 190mm, f = 75mm, R<sub>2</sub> = 50mm, δ = 2.0, λ = 1.06μm。

在图3中示出了ω<sub>2</sub>与热动力参数1/f<sub>t</sub>的关系曲线。通过曲线分析可以得到,此时热透镜焦距由无穷大到12.5cm的变化范围内,第二臂束腰半径ω<sub>2</sub>近似保持等于100μm,保证了对热焦距不敏感。

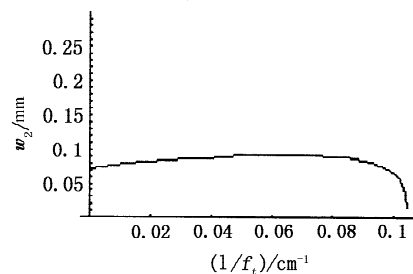


图3 V形腔中l<sub>2</sub>臂中的基模光斑束腰尺寸w<sub>2</sub>随热焦距倒数1/f<sub>t</sub>的变化曲线

下面考察l<sub>1</sub>腔臂中光模特性。由σ<sub>2</sub>′圆与不同

$f_i$  下  $\sigma'_1$  的相交的几何关系,可以确定出热透镜处的基模光束参数为:

$$b_i = \sqrt{\frac{f_i^2 y_1}{f_i - y_1}} \quad (8)$$

其中:

$$y_1 = \frac{\delta l_0^4 (R_2 - \delta)}{f_i (f_i^2 - \delta l_0) [f_i^2 + l_0 (R_2 - \delta)] + 2\delta l_0^2 [f_i^2 + 2\delta l_0 (R_2 - \delta)] - l_0^4 R_2} \quad (9)$$

热透镜处光斑尺寸为:

$$w_i = \sqrt{\frac{\lambda b_i}{\pi}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_i^2 y_1}{f_i - y_1}}} \quad (10)$$

图4中示出  $w_i$  对热动力参数  $1/f_i$  的关系曲线,这里的参数与图3相对应。由图3和图4可以看出,腔的热稳定范围很宽,且  $w_1$  与  $w_2$  具有相同的稳区宽度。

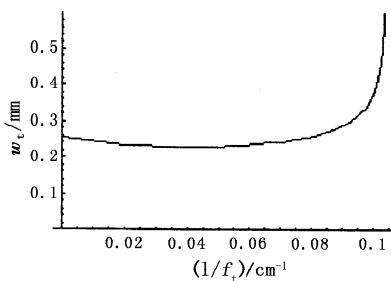


图4 V形腔中激光晶体处的光斑半径  $w_i$  随热焦距倒数  $1/f_i$  的变化曲线

由分析可见,V形热稳定性这一优点是明显的。通过合理选择腔参数可以对其热稳定范围及基模光斑尺进行调控,以得到合适的动态工作特性,在热焦距由几厘米到无穷大的范围内都可以保持激光晶体处及折叠臂束腰处的光模半径稳定。

### 3 实验相关参数的确定

我们在实验中采用了LD泵浦的V形折叠腔结构,实验结构如图5所示。

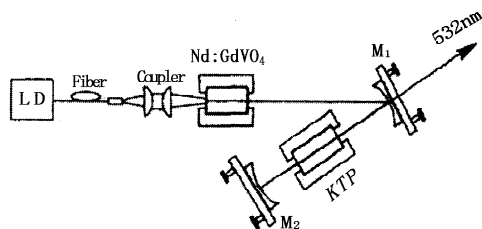


图5 LD泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP 全固态绿光激光器实验结构图

采用端面泵浦的方式,泵浦光可被有效地耦合进入激活介质的 TEM<sub>00</sub> 模体积内。易于实现泵浦光与振荡光的空间模式匹配,从而大大地提高激光器

的转换效率<sup>[5]</sup>。

该实验中,我们使用 Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP 组合得到连续绿光输出。Nd:GdVO<sub>4</sub> 采用 a 轴切割,掺 Nd<sup>3+</sup> 浓度为 0.5at%,晶体尺寸为 3mm × 3mm × 6mm,一端镀 808nm 增透、1064nm 高反双色膜作为一个腔镜,另一端镀 1064nm 增透膜,晶体侧面用铝箔包裹放入铜热沉中(加导热硅脂),通过水循环制冷器进行温度控制,冷却水温设为 18℃。非线性晶体 KTP 晶体作为倍频晶体,尺寸为 4mm × 4mm × 12mm,两通光面镀 1064nm 和 532nm 双色增透膜,采用 II 类相位匹配。由于倍频晶体上的功率密度较小,所以直接用铜热沉冷却。

V 形折叠腔镜 M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub> 皆为平凹镜。输出镜 M<sub>1</sub> 的曲率半径为 150mm,凹面镀制 1064nm 高反和 532nm 增透膜,平面镀制 532nm 增透膜;M<sub>2</sub> 的曲率半径为 50mm,凹面镀制 1064nm 和 532nm 双色高反膜。结合前面的理论分析,在本实验所用腔镜参数已定情况下,为了得到热透镜效应不敏感的激光谐振腔,因而在实验中只关注 12.5cm ~ ∞ 的热焦距动态范围。设计出的谐振腔在激光晶体及倍频晶体处的光斑随热动力参数变化情况如图3和图4所示,图中对应腔参数为第一臂长 265mm,第二臂长 135mm,折叠镜的折叠角为 7°,可见在  $1/f_i$  小于  $0.08\text{cm}^{-1}$  的情况下,该腔在激光晶体和倍频晶体处的光斑大小稳定,像散不明显。将倍频晶体 KTP 置于第二臂的基频光束腰处,在前述范围内对腔参数进行微调使得绿光输出最强。

### 4 实验结果与分析

用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体作增益介质,输出镜 M<sub>1</sub> 的透过率 T 为 15%,测量了连续波 1063nm 激光输出特性。图6给出了实验测得的 1063nm 波长激光输出功率随注入泵浦功率变化的关系。由图6可以看出,随着注入功率的增加,激光输出功率基本呈线性增加,没有出现功率随热效应的波动。

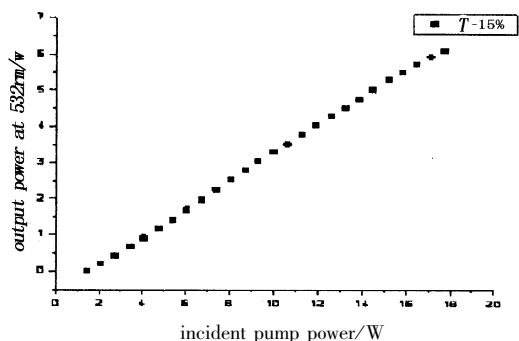


图6 1063nm 激光输出功率与注入功率关系

$M_1$  镜换为镀 1064nm 高反膜、532nm 增透膜的腔镜,并在第二臂的激光束腰处放入倍频晶体 KTP,在 19.7W 的泵浦功率下获得了 3.68W 的连续绿光输出,考虑到准直聚焦筒 10% 的耦合损耗,光-光转换效率为 21%。图 7 给出了绿光输出功率与抽运功率的关系曲线。随着泵浦光功率的变化,没有观察到绿光功率输出不稳定现象。从图 7 我们还可以看到,伴随泵浦功率的增加,输出绿光的斜率呈现先增大后减小的趋势,产生这种现象的原因可能是:泵浦功率密度的增加使得激光晶体的热效应越来越严重,热应力双折射引起的退偏效应导致位相失配,使得激光器的谐波转换效率下降。

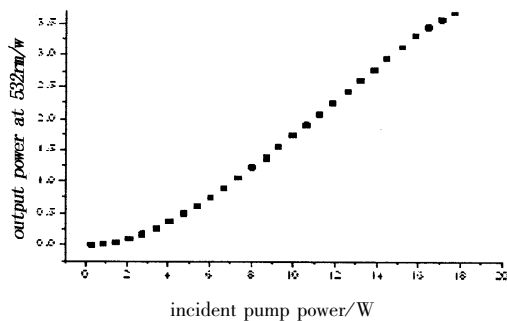


图 7 绿光输出功率与注入功率关系

使用美国 Ophir Optonics 公司的 Nova-30A-P-SH 型号功率计,滤波后在连续绿光输出功率 1.9W,2.6W 和 3.3W 附近,对激光器的稳定度进行了测算。时间间隔为 60s,测量值如表 1 所示。

表 1 连续绿光瞬时功率测量值

功率/W	测量值										$\bar{P}$	$\Delta\bar{P}$
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.9	1.92	1.87	1.93	1.95	1.89	1.86	1.91	1.94	1.89	1.93	1.909	0.0281
2.6	2.63	2.58	2.62	2.56	2.61	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63	2.603	0.0261
3.3	3.28	3.31	3.34	3.30	3.26	3.29	3.33	3.35	3.29	3.27	3.302	0.0308

采用均方根误差,在 1.9W,2.6W 和 3.3W 附近的连续绿光输出功率的稳定度/分别为:1.48%,1.00% 和 0.93%。这一结果表明 LD 泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP 全固态绿光激光器实验系统中的各

参数达到了很好的匹配,所设计的腔型非常稳定,其输出功率和热稳定性方面在国内 LD 泵浦全固态连续绿光激光器研究领域处于领先水平。

## 5 结论

研究了利用传播圆变换理论结合图解分析法对含热透镜的折叠谐振腔热稳定性的设计探索,经过数值计算筛选出一套腔参数,使得激光谐振腔在热透镜效应逐渐增强的一段热焦距内始终保持稳定的腔模状态,从而得到了具备热透镜效应不敏性的固体激光谐振腔。依据计算的谐振腔参数值,在实验中搭建了以 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体作增益介质的 V 形折叠腔,在折叠臂束腰位置放入 KTP 倍频晶体,在 19.7W 的注入功率下获得了 3.68W 的连续波绿光输出,光-光转换效率为 21%。测量了不同输出功率下绿光的稳定度,测量结果表明该 LD 泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP 全固态绿光激光器实验系统中的各参数达到了很好的匹配,所设计的腔型十分稳定,其输出功率和热稳定性方面在国内 LD 泵浦全固态连续绿光激光器研究领域处于领先水平。

## 参考文献:

- [1] Z Quan, W Jun-ying, Z Ling. 2.23 W diode-pumped Nd:VO<sub>4</sub>/LBO laser at 671 nm[J]. Optics and Lasers Technology, 2004, 36:485-487.
- [2] X Qinghua, B Yikun, J Fuqiang, et al. Compact efficient 1.5 W continuous wave Nd:VO<sub>4</sub>/LBO blue laser[J]. Optics Communications, 2006, 258: 67-71.
- [3] 毕勇,孙志培,李瑞宁,等. 高平均功率腔内和频蓝光 Nd:YAG 激光器[J]. 光学精密工程, 2005, 13:16-21.
- [4] 张光寅,郭曙光. 光学谐振腔的图解分析与设计方法[J]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [5] V Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. Applied Optics, 1986, 25:107-117.