文章编号：1002-2082(2009)03-0531-05

热效应不敏感的Z型全固态绿光激光器设计

刘 蓉[1]，拜晓锋[2]，李 锋[3]，白晋涛[4]

(1. 西安工业大学 光电工程学院，陕西 西安 710032；2. 西安应用光学研究所，陕西 西安 710065；
3. 商洛学院，陕西 商洛 726000；4. 西北大学 光子学与光子技术研究所，陕西 西安 710069)

摘 要：为构建LD泵浦Nd：$GdVO_4$/KTP腔内倍频热效应不敏感的激光器系统，提高绿光激光的热稳定性，利用基于传播圆变换理论的Z型腔图解分析方法，得到光斑半径w_2、w_3随热动力参数$1/f_t$的变换关系，利用Mathematics编程软件计算得到了具有激光晶体热透镜不敏性的Z型折叠腔参数。当激光器腔长参数为170 mm，523 mm和152 mm时，在20.3 W的注入泵浦功率下获得了2.72 W的531.5 nm连续绿光激光输出，实现光-光转换率13%。通过传播圆变换理论图解分析方法的理论计算和实验研究，发现在$1/f_t$小于0.25 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，热效应不敏感，像散不明显。

关键词：全固态激光器；绿光激光；图解分析法；Nd：$GdVO_4$晶体；热透镜效应

中图分类号：TN248.1 **文献标志码**：A

Design of Z type all-solid-state green laser insensitive to thermal effect

LIU Rong[1], BAI Xiao-feng[2], LI Feng[3], BAI Jin-tao[4]

(1. School of Optoelectronical Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710032, China;
2. Xi'an Institute of Applied Optics , Xi'an 710065, China; 3. Shangluo Institute, Shangluo 726000, China;
4. Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: In order to establish a LD-pumped Nd：$GdVO_4$/KTP laser system and improve the thermal stability of the green laser, the relation that the spot radii w_2 and w_3 vary with the thermodynamic parameter $1/f_t$ were investigated with the graphic analysis method, and the parameters of three-mirror Z-type folded cavity insensitive to the variation of thermal lens effect of laser crystal were acquired by the calculation with Mathematics software. The continuous output green laser whose wavelength is 531.5 nm and power is 2.72 W was obtained at 20.3 W end-pumping power when $l_1 = 170$ mm, $l_2 = 523$ mm and $l_3 = 152$ mm. The optical-optical conversion efficiency of 13% was realized with the all-solid-state laser. It is found that the laser system is insensitive to the variation of thermal lens effect when $1/f_t < 0.25$ cm^{-1}.

Key words: all-solid-state laser; green laser; graphic analysis method; Nd：$GdVO_4$ crystal; thermolens effect

收稿日期：2008-09-25； **修回日期**：2008-11-10

基金项目：陕西省教育厅专项基金项目(批准号：05JK185)

作者简介：刘蓉(1982—)，女，陕西西安人，硕士研究生，主要从事全固体激光器件的研究工作。
E-mail：liurong0918@163.com.

引言

激光二极管(LD)端面泵浦的全固态激光器由于其体积小、效率高、运行可靠等优点而成为激光技术的热点。在激光腔设计中,通常采用直腔、V型腔或Z型腔。其中Z型腔由于折叠镜容易制成高反射率的反射镜,可以减小腔内损耗,缩短激光器的长度,并在折叠短臂中产生小的束腰,便于提高倍频转换效率,因而本文采用Z型腔结构[1-3]。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方法,通过数值计算筛选优化谐振腔参数,设计了Z型折叠腔,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:$GdVO_4$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Z型折叠腔腔内倍频激光装置。实验测量不同输出功率下倍频光功率的稳定性,从而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。

1 谐振腔设计

图1给出Z型腔的等效光路,该光路用一个单一焦距值的透镜F_1和F_2等效折叠镜M_2和M_3。将激光介质等效为一个紧帖于平面镜M_1的薄热透镜F_t,其焦距值随光泵浦功率的增大,可以从无穷大变化至10 cm附近。因此,其工作特性要求谐振腔的热动力参数$1/f_t$能够大幅度地变化。

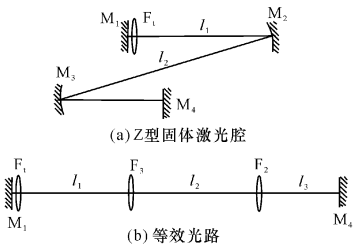

图1 Z型固体激光腔及其等效光路

Fig. 1 Z type all-solid-state cavity and its equivalent beam path

根据传播圆变换理论[4],图2示出了热透镜F_t的焦距为不同值时M_1镜的σ_1传播圆[4]的"像圆"σ'_{1a},σ'_{1b},σ'_{1c},σ'_{1d},…,这些"像圆"σ'_1再经过透镜F_1和F_2后转变为它们的"像圆"σ''_{1a},σ''_{1b},σ''_{1c},σ''_{1d}等。由这些"像圆"σ''_1与M_4镜的传播圆σ_4的相对位置和相交关系可以得到F_2M_4腔臂中的光模特性。根据模像理论,传播圆经过透镜变换时,满足以下关系[4]:

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

式中: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。

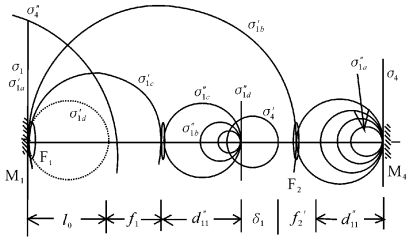

图2 Z型激光腔的解析图

Fig. 2 Graphic analyze of Z type cavicy

根据图2中的位置关系,可以求得平面镜M_1的波面传播圆σ_1经F_t和F_1变换后的σ_1''圆与光轴的交点离透镜F_1的距离:

$$d''_{11}=\frac{f_t(l_0+f_1)}{l_0} \tag{2}$$

$$d''_{12}=\frac{f_t(l_0+f_1-f_t)}{l_0-f_t} \tag{3}$$

式中$l_0=l_1-f$。由上面两式可以看到,σ_1''圆与光轴的两交点有一点不变,而另一点随热焦距的变化而变化。当$f_t\to\infty$时,σ_1''圆的直径为:

$$R''_{1a}=\frac{f_1^2}{l_0} \tag{4}$$

根据谐振腔内存在稳定高斯光束的条件[4]要求,并考虑腔的动态稳定性,M_2镜选择的位置为

$$l_2=d''_{11}+f_2+\delta_1=\frac{f_1(l_0+f_1)}{l_0}+f_2+\delta_1 \tag{5}$$

则σ_1''圆与光轴的交点离透镜F_2的距离为

$$\rho_{11}=f_2+\delta_1 \tag{6}$$

$$\rho_{12}=R''_1+f_2+\delta_1=d''_{11}-d''_{12}+f_2+\delta_1=\frac{f_1^2 f_t}{l_0(f_t-l_0)}+f_2+\delta_1 \tag{7}$$

经F_2变换后,得到M_1镜的传播圆σ_1经F_t,F_1,F_2变换后的σ_1''圆与光轴的交点距F_2的距离为(F_2

的右侧)

$$d''_{11}=\frac{f_2(f_2+\delta_1)}{f_2}=f_2+\frac{f_2^2}{\delta_1} \tag{8}$$

$$d''_{12}=\frac{\rho_{12}f_2}{\rho_{12}-f_2}=f_2+\frac{l_0f_2^2(f_t-l_0)}{f_1^2f_t+l_0\delta_1(f_t-l_0)} \tag{9}$$

σ''_1 圆的直径为

$$R''_1=d''_{11}-d''_{12}=\frac{f_1^2f_2^2f_t}{\delta_1f_1^2f_t+l_0\delta_1^2(f_t-l_0)} \tag{10}$$

同样,根据谐振腔内存在稳定高斯光束的条件要求,取第3臂长为

$$l_3=f_2+\frac{f_2^2}{\delta_1}-\delta_2 \tag{11}$$

为保证激光腔能够在低功率下工作,要求 δ_2 满足:

$$0<\delta_2<\frac{f_1^2f_2^2}{\delta_1f_1^2+\delta_1^2l_0} \tag{12}$$

根据 σ''_1 与平面镜 M_4 的传播圆 σ_4(平面)相交的关系(参见图2),可以确定光腔第3臂的基模光束参数为

$$b_3=\sqrt{(R''_1-\delta_2)\delta_2}=\sqrt{\frac{f_1^2f_2^2f_t\delta_2}{\delta_1f_1^2f_t+\delta_1^2l_0(f_t-l_0)}-\delta_2^2} \tag{13}$$

进而可得第3臂的基模光斑尺寸为

$$w_3=\sqrt{\frac{\lambda b_3}{\pi}}=\sqrt{\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{f_1^2f_2^2f_t\delta_2}{\delta_1f_1^2f_t+\delta_1^2l_0(f_t-l_0)}-\delta_2^2}} \tag{14}$$

根据Z型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:

$f=100$ mm,$R_2=50$ mm,$l_0=70$ mm,

$\delta_1=180$ mm,$\delta_2=4$ mm,$\lambda=1.06$ μm。

图3示出了 w_3 对热动力参数 $1/f_t$ 的关系曲线。

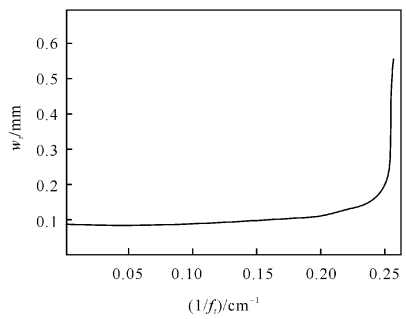

图3　Z型腔中 w_3 对 $1/f_t$ 的变化曲线

Fig. 3　Curve of w_3 versus $1/f_t$ in Z type resonator

从图中可以看出,在这一参数下,当 f_t 由∞到50 mm变动时,w_3 都在腔的热稳定范围之内。而且 M_3 镜处的光斑半径 w_3 比较小,这正好可作为内腔倍频固体激光腔,有利于提高倍频效率。另外,随着热动力参数 $1/f_t$ 增大(泵浦功率增大),w_3 缓慢增大,可避免因光功率密度太大而损伤倍频晶体或 M_3。

接下来考察 l_2 腔臂中的光模特性。M_4 的传播圆 σ_4 经过 F_2 变换后的传播圆 σ'_4 与光轴的交点距离 F_2 为

$$d'_{31}=f_2+\frac{\delta_1f_2^2}{f_2^2-\delta_1\delta_2} \tag{15}$$

$$d'_{32}=f_2 \tag{16}$$

由此得 σ'_3 圆的直径为

$$R'_3=d'_{31}-d'_{32}=\frac{\delta_1f_2^2}{f_2^2-\delta_1\delta_2} \tag{17}$$

同理,根据(2)式和(3)式可得 σ''_1 圆的直径为

$$R''_1={}''_{11}-{}''_{12}=\frac{f_1^2f_t}{l_0(f_t-l_0)} \tag{18}$$

根据 σ''_1 与平面镜 M_3 的传播圆 σ_3 的"像圆" σ'_3 相交的关系(图2所示),可以确定光腔第2臂的基模光束参数及基模光斑尺寸:

$$b_2=\sqrt{(R''_1-y_1)y_1} \tag{19}$$

$$w_2=\sqrt{\frac{\lambda b_2}{\pi}} \tag{20}$$

式中:

$$y_2=\frac{\delta_1^3\delta_2l_0(f_t-l_0)}{[f_t(f_1^2+l_0\delta_1)-\delta_1l_0^2)](f_2^2-2\delta_1\delta_1)} \tag{21}$$

图4示出了 w_2 随热动力参数 $1/f_t$ 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 ω_3 与 ω_2 具有相同的稳区宽度。

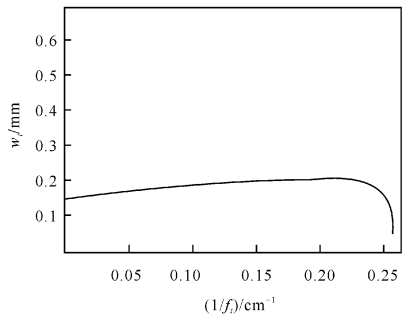

图4　Z型腔中 w_2 对 $1/f_t$ 的变化曲线

Fig. 4　Curve of w_2 versus $1/f_t$ in Z type resonator

由上述分析可见,Z腔型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。

2 实验相关参数的确定

采用LD泵浦的Z型折叠腔结构,实验结构如图5所示。

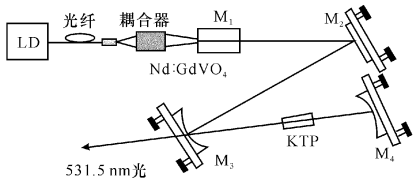

图5 LD泵浦Nd:$GdVO_4$/KTP激光器实验结构图

Fig. 5 Schematic of LD-pumped Nd:$GdVO_4$/KTP laser

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_{00}模体积内,易于实现泵浦光与振荡光的空间模式匹配,从而大大提高激光器的转换效率[5]。

该实验使用的泵浦源为武汉凌云公司生产的光纤耦合半导体激光器,常温(20℃)下输出波长为808 nm,尾纤的纤芯直径为400 μm,输出光束数值孔径NA=0.22。由于半导体激光器LD的输出光束发散较严重,为了使发散度小的泵浦光进入增益介质,以求与腔模空间最大限度地交叠,同时尽量减少激光晶体横截面内造成的泵浦不均匀性,我们自行设计了双平凸透镜(焦距f_1=18 mm,f_2=32 mm)组成的耦合系统,先准直后聚焦。准直聚焦后得到腰斑直径约为700 μm的圆高斯光束,直接注入到Nd:$GdVO_4$晶体的内部,耦合光学系统效率约为90%。

选取Nd:$GdVO_4$/KTP组合得到连续绿光输出。Nd:$GdVO_4$采用a轴切割,掺Nd^{3+}的原子数分数为0.5%,晶体尺寸为3 mm×3 mm×6 mm,一端镀808 nm增透、1 064 nm高反双色膜作为一个腔镜,另一端镀1 064 nm增透膜,晶体侧面用铟箔包裹放入铜热沉(加导热硅脂)中,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4 mm×4 mm×12 mm,两通光面镀1 064 nm和532 nm双色增透膜,采用II类相位匹配,匹配角θ=90°,φ=23.6°。由于倍频晶体上的功率密度较小,所以直接用铜热沉冷却。

Z折叠腔镜M_1和M_2皆为平凹镜。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,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1臂长170 mm,第2臂长523 mm,第3臂长152 mm,可见在$1/f_t$小于0.25 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3臂的基频光束腰处,依上述要求对腔参数进行微调从而使得绿光输出最强。

3 实验结果与分析

用Nd:$GdVO_4$晶体作增益介质,并在第2臂的激光束腰处放入倍频晶体KTP,在20.3 W的泵浦功率下获得了2.72 W的连续绿光输出,光-光转换效率为13%。图6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。还可以看到,伴随泵浦功率的增加,输出绿光的斜效率呈现先增大后减小的趋势,产生这种现象的原因可能是:泵浦功率密度较小时,激光晶体的热效应很小,对激光输出影响微弱,对激光器光增益的影响较小,输出绿光的斜效率不断增大。但随着泵浦功率密度的增加,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。

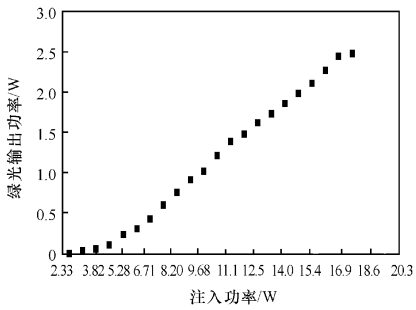

图6 绿光输出功率随注入功率的变化曲线

Fig. 6 Output power of green laser at 531.5 nm versus pump power at 808 nm

4 结束语

本文利用传播圆变换理论结合图解分析法研究了含热透镜的折叠谐振腔热稳定性,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:$GdVO_4$晶体作增益介质的Z型折叠腔,在第3臂束腰位置放入KTP倍频晶体,在20.3 W的注入功率下获得了2.72 W的连续波绿光输出,光-光转换效率为13%。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:$GdVO_4$/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,有助于LD泵浦全固态连续绿光激光器的研究。

参考文献:

[1] PIERROU M, LAURELL F, KARLSSON H, et al. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched $KTiOPO_4$ crystal [J]. Optics Letters,1999,24(4):205-207.

[2] CZERANOWSKY C, SCHMIDT M, HEUMANN E, et al. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd : $GdVO_4$ laser with 840 mW output power at 456 nm [J]. Optics Communications,2002,205(4-6):361-365.

[3] CZERANOWSKY C, HEUMANN E, HUBER G. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd : YAG BiBO laser with 2.8-woutput power at 473 nm[J]. Optics Letters,2003,28(6):432-434.

[4] 张光寅,郭曙光.光学谐振腔的图解分析与设计方法[M].北京:国防工业出版社,2003.
ZHANG Guang-yan, GUO Shu-guang. Graphic analysis and design method of optical resonator[M]. BeiJing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)

[5] MAGNI V. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. Applied Optics, 1986(25):107-117.