

一种能补偿热效应的高功率端面泵浦 NdYVO₄
激光谐振腔的设计

关 俊 陈国夫 程光华 刘 畅 侯 洵
(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘 要 针对激光二极管端面泵浦的NdYVO₄全固态激光器,提出了一种利用双晶体,对NdYVO₄的热效应进行补偿的方案,同时该方案又能提高最大输出功率,避免由于插入附加光学元件所导致的损耗,满足调Q以及提高腔内倍频效率的要求。
关键词 谐振腔;热效应补偿;双晶体;端面泵浦;NdYVO₄;DPSSL
中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

激光二极管抽运的全固态激光器(DPSSL)由于其效率高、光束质量好、体积小、寿命长等优点,在测量、遥感、数据存储、医学等领域有着广泛的应用。而端面泵浦的 DPSSL 以其泵浦光利用光纤耦合时能够实现泵浦源与激光器的有效分离,近年来成为人们研究的热点。

在众多适合 LD 泵浦的激光介质中, NdYVO₄ 晶体由于它的受激发射截面大、吸收系数高、吸收光谱宽、偏振输出等优点而倍受青睐^[1]。然而 NdYVO₄ 晶体的热导率很低,只有 YAG 的一半,激光运行时所表现出的强烈的热效应,严重影响了激光器的稳定性和输出光的光束质量,限制了其在较高功率激光器上的应用。因此热效应的影响成了当前亟待解决的问题^[2]。

关于解决热透镜的问题除了设计热稳腔外,还可以对热透镜效应进行补偿^[2~4],但以前报道的热效应补偿方法都是通过加入附加的光学元件,增大了损耗降低了输出功率;本文根据几何光学原理,用两块激光晶体产生的热透镜组成共焦系统,能够有效地避免热透镜效应导致的输出功率下降、激光腔的热稳定性差和输出光束质量变差等问题,提出一种既能补偿热透镜效应又能提高最大输出功率的激光腔的设计。

1 谐振腔的设计与分析

1.1 腔的设计

本文针对端面泵浦的 NdYVO₄ 调 Q、腔内双通倍频激光器进行设计,考虑图 1 所示的 LD 双端泵浦 NdYVO₄ Z 型谐振腔。泵浦光的光路为:LD₁₍₂₎→

Focusing Optics→M₁(M₂);而 M₁→L₁→NdYVO₄→L₂→NdYVO₄→L₃→L₄(调 Q 晶体)→M₃→L₅(倍频晶体)→M₄ 则构成了振荡光路。其中,两块相同的激光晶体相对旋转 90°放置(对此将在后面有详细的说明和分析),并且光路中的相应光学元件已经按合适参数镀膜。

下面以 NdYVO₄ 发射波长 1064 nm 为例,利用传输矩阵对图 1 所示的谐振腔进行设计和分析;由于调 Q 晶体、倍频晶体的光学长度相对于各段光路来说是小量,所以在此忽略它们对传输矩阵的影响。

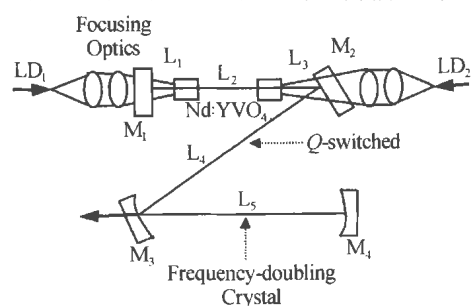


图 1 LD 端面泵浦 NdYVO₄ Z 型谐振腔

Fig. 1 Ld-end-pumped NdYVO₄ Z-cavity

M₁、M₂ 为平面镜;M₃、M₄ 为凹面镜,其曲率半径分别为 R₃、R₄;M₃ 的折叠角为 θ;两块同样的 Nd:YVO₄ 晶体的长度为 L;晶体中产生的热透镜焦距的取值由文献[5]中的式(13)计算得到,并且认为热透镜位于晶体的中间且两块晶体中产生的热透镜参数相同。以紧贴 M₄ 的左端面的平面为参考平面,则谐振腔内子午面和弧矢面上,傍轴光线往返一周的变换矩阵为

$$M_t = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/(R_3 \cos \theta) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/(R_3 \cos \theta) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_4 & 1 \end{bmatrix} \\ M_s = & \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2 \cos \theta / R_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2 \cos \theta / R_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_4 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

首先,利用数值计算并结合实际中易实现的原则选取一组理想的参数: $L=5\text{ mm}$, $L_1=10\text{ mm}$, $L_2=180$, $L_3+L_4=145\text{ mm}$, $R_3=150\text{ mm}$, $R_4=50\text{ mm}$;为了实际中易于调整,选取腔定性最为敏感的折叠角 θ 和短臂 L_5 为变量.根据腔的稳定条件: $G_t<1$ 且 $G_s<1$ ($G_i=|D_i+A_i|/2$, $i=t$ 和 $i=s$ 分别对应于子午面和弧矢面的光束).同时,为了保证较高的倍频效率,还应该使 L_5 上的束腰处(置放倍频晶体的位置)的像散尽量小,为此设置在该处的像散要求: $|R_t-R_s|<0.003\text{ mm}$; $|w_t-w_s|<0.003\text{ mm}$.其中 $R_i=2B_i/(D_i-A_i)$, $w_i=\sqrt{2\lambda|B_i|/[\pi\sqrt{4-(D_i-A_i)^2}]}$ 分别为 L_5 上束腰处的子午面和弧矢面内的等相位曲率半径和光斑半径. θ 和 L_5 取值范围分别为: $\theta\in[0,80^\circ]$, $L_5\in[0,250\text{ mm}]$,做出二者在 $f_t\in[140\text{ mm},\infty]$ 上的三维立体图.

1.2 腔的稳定性分析

在三维图上选取满足对 $f_t\in[140\text{ mm},\infty]$ 都稳定的 θ 值,结合实际选取 $\theta=10^\circ$,利用数值计算做出 L_5, f_t 的稳区图,如图 2;为了比较,在其它条件不变的情况下去掉图 1 所示的右边激光晶体,并做出其 L_5, f_t 的稳区图,如图 3.比较图 2 和图 3 可以看出,利用双激光晶体进行补偿后 L_5, f_t 稳区图明显加宽,并且从图 2 中还可以看出,利用双激晶体进行补偿后,当 L_5 取 $[105,120]\text{ mm}$ 上的任何一个值时,腔在热透镜焦距 $f_t[140\text{ mm},900]$ 上都是稳定的,这大大提高了腔的热稳定性.

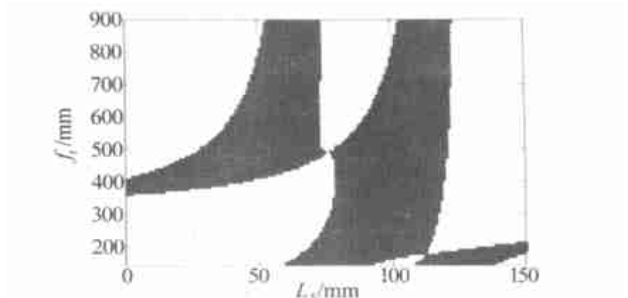


图 2 利用双激光晶进行补偿后的稳区图
Fig.2 The stable zone with compensated by twin laser crystals

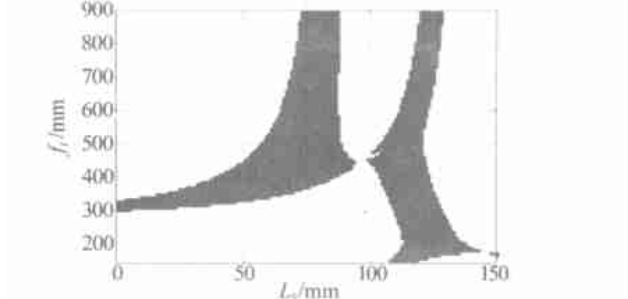


图 3 没有利用双激光晶体进行补偿(单个激光晶体)的稳区图
Fig.3 The stable zone without compensated by twin laser crystals

1.3 倍频效率分析

为了保证倍频效率,一般把倍频晶体放在 L_5 臂上的束腰位置,并且使光束在倍频晶体处的像散尽量小,这一点我们在前面的数值计算中已经保证;此外,减小束腰位置的变化量和束腰半径的变化量也是提高倍频效率和激光器稳定性的重要措施;从图 4 中可以看出,热透镜焦距 f_t 在 $[140\text{ mm},900]$ 上变化时,在利用双激光晶体进行热效应补偿的情况下, L_5 臂上的束腰位置 r_{20t}/r_{20s} (t 和 s 下标分别表示子午面和弧矢面内的参量,下同)的变化量在 10 mm 以下,而采用单块激光晶体时, L_5 臂上的束腰位置 r_{10t}/r_{10s} 的变化量则大得多.图 5 则表明:热透镜焦距 f_t 在 $[140\text{ mm},900]$ 上变化时,利用双激光晶体进行补偿后, L_5 臂上的束腰半径 w_{20t}/w_{20s} 变化很小变化率小于 14% ,特别是在 $140\sim700\text{ mm}$ 范围内 w_{20t}/w_{20s} 几乎不变;而在此范围内,采用单激光晶体时的 w_{10t}/w_{10s} 的变化则很大.所有的这些都说明,利用双

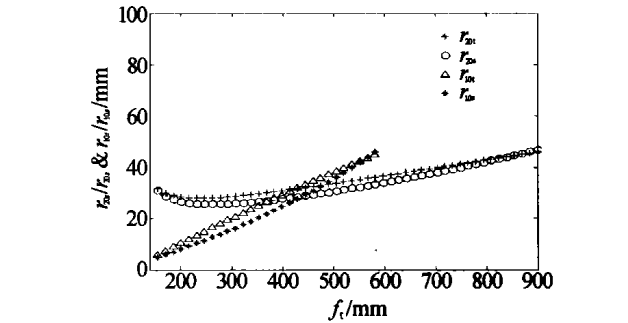


图 4 束腰位置 $r_{20t}/r_{20s}, r_{10t}/r_{10s}$ 随 f_t 的变化
Fig.4 Waist location $r_{20t}/r_{20s}, r_{10t}/r_{10s}$ as a function of f_t

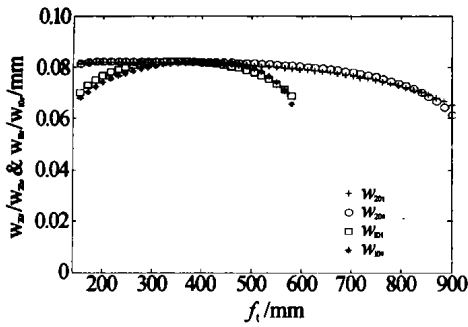


图 5 束腰半径 w_{20t}/w_{20s} , w_{10t}/w_{10s} 随 f_t 的变化

Fig. 5 Spot radii w_{20t}/w_{20s} , w_{10t}/w_{10s} as a function of f_t
激光晶体进行补偿后在提高倍频效率上也有较大的优势.

1.4 输出光束质量分析

为了增大散热面积,一般将四方系的 NdYVO_4 晶体切割成 $m \times m \times n$ 的形式,并且采用周边强制冷却的方式;而为了利用 NdYVO_4 的偏振输出特性,通常都是使晶体的四次旋转对称轴(光轴)垂直于光轴放置.这样,由于在振荡光通过的截面内晶体具有各向异性,导致了在相同温度边界条件下在 x 与 y 方向上有不同的温度梯度,进而导致在 x 和 y 方向上的热透镜焦距不同,这一点已经由文献[7]证实.所以在利用单激光晶体且没有进行相应补偿的情况下,输出的光束质量较差;而在利用如图 1 所示的双激光晶体结构时,如图 6 所示,将两块晶体相对旋转 90° 放置,其中, $s_{//}$ 和 $s_{\perp}$ 分别表示平行与光轴面与垂直与光轴面.由于振荡光束在 $s_{//}$ 面和 $s_{\perp}$ 面都经历了相同的屈光度(均为 $1/f_{t//} + 1/f_{t\perp}$, $f_{t//}$, $f_{t\perp}$ 分别为 $s_{//}$ 面和 $s_{\perp}$ 面内的热透镜焦距)所以可以补偿光束的畸变而得到较好的光束质量.

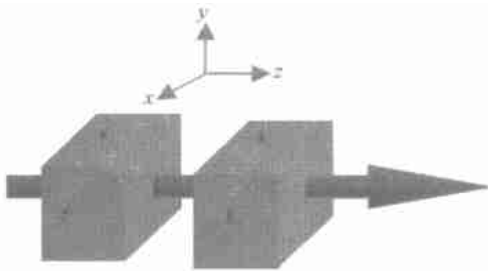


图 6 两激光晶体相对旋转放置示意

Fig. 6 Relative placement of twin laser crystals

2 结论

我们提出了一种利用晶体本身的热效应来进行“自补偿”,这种补偿有以下几点优势:

1) 由于随着泵浦功率变化,两晶体内产生的热透镜做同样的变化,这样热透镜的补偿范围(泵浦功率的变化范围)就更宽,腔的热稳定性更好.

2) 由于在光路中不引入导致谐振腔调整困难的透镜以及其它任何附加光学元件,减少了反射和吸收等损耗,提高了效率和输出功率.

3) 由于晶体中的热效应所产生的热应力不能超过 NdYVO_4 的断裂应力,所以单位增益介质上存在最大泵浦功率及输出功率极限,亦即 NdYVO_4 激光器的定标问题[8]. 而采用双晶体结构时,在补偿热效应的同时增加了增益介质,减少了每块增益介质上所承担的泵浦能量,所以可以承受总体更高的泵浦能量进而可以获得更高的输出功率极限.

4) 由于光束在连续通过两块相同条件下的激光晶体时,经历了相反的纵向温度梯度,补偿了晶体中的由于纵向分布的温度梯度所导致的热效应;同时,由于振荡光通过两块激光晶体时,在子午面和弧矢面经历了相同的屈光度补偿了由于晶体的热效应横向各向异性造成的椭圆型光斑;所有这些都有利于提高光束质量,这是其他补偿方法很难达到的.

5) 由于 NdYVO_4 为单轴晶体且具有偏振吸收和偏振激发特性,它的热致双折射效应相对于其本身的双折射来说可以忽略,所以 NdYVO_4 晶体的热效应不会产生退偏损耗,因而两块激光晶体之间不需要加入旋转片;而当采用 NdYAG 做激光晶体时,由于其为立方系晶体且非偏振激发而会产生热致双折射,在采用本文所提出的腔的结构时,不但可以补偿热透镜效应而且参考文献[9]和[10]等分别从理论和实验上已经证明在两块 NdYAG 晶体之间加入 90° 旋转片后还可以补偿热致双折射和退偏损耗.

通过数值模拟,证实了这种腔结构设计的优势与可行性,同时也为同类激光器的设计提供了参考.

参考文献

- 1 白晋涛,张振杰,武自录,等. 用于飞秒紫外激光产生的 LD 泵浦高效 NdYVO_4 绿光激光器研究. 光子学报, 2000, **29**(11): 1053~1055
Bai J T, Zhang Z J, Wu Z L, et al. Acta Photonica Sinica, 2000, **29**(11): 1053~1055
- 2 尹丽娜,陈莹,陈檬,等. 大功率 LD 端抽运 NdYAG Z 型腔内热效应补偿的研究. 中国激光, 2002, **A29**(8): 673~676
Yin L N, Chen Y, Chen M, et al. Chinese Journal of Lasers, 2002, **A29**(8): 673~676
- 3 高颖,黄维铃,刘耀兰,等. 固体激光器热透镜焦距的自适应补偿. 中国激光, 1999, **A26**(3): 205~208
Gao Y, Huang W L, Liu Y L, et al. Chinese Journal of Lasers, 1999, **A26**(3): 205~208
- 4 张光寅,宋峰,冯衍,等. 可自适应补偿热透镜效应的固体激光谐振腔. 物理学报, 2000, **49**(8): 1495~1498
Zhang G Y, Song F, Feng Y, et al. Acta Physica Sinica, 2000, **49**(8): 1495~1498
- 5 Innocenzi M E, Yura H T, Fincher L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers. Appl Phys Lett, 1990, **56**(19): 1831~1833
- 6 Walter K. Solid state laser engineering. New York:

Springer-Verlag, 1999

7 郑朝思, 胡企铨. 半导体激光泵浦各向异性介质的热效应. 中国激光, 1997, **24**(8): 679~683

Zheng C S, Hu Q Q. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **24**(8): 679~683

8 Peng Xiaoyuan, Xu L, Asundi A, et al. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO₄ lasers. *IEEE J Quantum Electronics*, 2002, **38**(9): 1291~1299

9 Giunliani G, Paola R. Polarization flip cavities: A new approach to laser resonators. *Optics Communications*, 1980, **35**(1): 109~112

10 Yasui K. Efficient and stable operation of a high-brightness cw 500 W Nd:YAG rod laser. *Appl Optics*, 1996, **35**(15): 2566~2569

Design of Thermal Effect Compensation Resonator for a Sort of High-power End-pumped Nd:YVO₄ Laser

Guan Jun, Chen Guofu, Cheng Guanghua, Liu Chang, Hou Xun
State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, P. R. China
Received date: 2003-04-22

Abstract For diode end-pumped Nd:YVO₄ solid-state laser, a scheme employing twin laser crystals to compensate thermal effects is brought forward. At the same time laser maximum output can be enhanced, and the loss resulting from additional optical elements can be avoided, Q-switching and efficient frequency-doubling can be met in this scheme.

Keywords Resonator; Thermal effect compensation; Twin laser crystals; End-pumped; Nd:YVO₄; DPSSL

Guan Jun was born in 1978, in Zhumadian, Henan Province. He received the B.S degree in Mechanical Engineering from Xi'an Jiaotong University. Now, he is pursuing his M.S. degree directing by Prof. Hou Xun (Academician of CAS) and Prof. Cheng Guofu in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His current interest is in solid state laser.

