

LD 端面泵浦折叠腔 Nd:YVO₄/LBO 激光器

李 隆^{1,2} 田 丰³ 赵致民¹ 田来科¹ 张 伟¹ 白晋涛¹ 侯 洵^{1,2,4}

(1 西北大学光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

(2 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(3 长安大学基础部, 西安 710064)

(4 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 对端面泵浦 Nd:YVO₄ 构成的四镜 Z 型折叠腔结构进行了理论研究, 合理调整谐振腔的参量关系, 使谐振腔能够适应不同泵浦功率下激光晶体热焦距的变化, 同时所设计的折叠腔还具有腔参量调整灵活等特点. 以 LBO 晶体为倍频晶体, 采用 I 类角度调节位相匹配技术, 在双端泵浦光功率为 26 W 时, 成功地获得了 4 W 稳定的连续绿光输出. Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器输出为 4 W 时的稳定性为 1.3%, 其光-光转换效率达到 13%.

关键词 热透镜效应; Z 型折叠腔; Nd:YVO₄/LBO 激光器

中图分类号 TN248.1+3 **文献标识码** A

0 引言

自 20 世纪 90 年代大功率半导体二极管激光器得到了迅猛发展, 相应的也促进了激光二极管泵浦的全固态激光器 (DPSSL) 的发展. DPSSL 具有体积小、结构简单、可靠性好、转换效率高、光束质量好等优点, 具有广泛的应用前景, 成为当今激光器领域的热门研究课题^[1-3].

DPSSL 在稳定运转时, 激光晶体因吸收泵浦光能量而发热^[4], 同时外部使用半导体或循环冷却水制冷使产生的热量得以扩散, 这样在激光介质内便形成了一定的温度梯度分布, 对腔内激光产生的效果可等效为有一定焦距的透镜所产生的效果^[5]. 激光晶体的热透镜效应主要表现在两个方面: 在泵浦光的影响下, 温度的径向分布引起晶体的折射率和晶体通光方向长度的变化, 进而影响到 DPSSL 的各方面性能, 如: 谐振腔的稳定性、腔模的尺寸、模式耦合效率、输出光束质量等. 特别是在不同的泵浦功率下激光晶体具有的热透镜焦距不同, 而谐振腔的结构固定, 因此热透镜焦距改变会导致谐振腔失稳. 因而激光晶体的热透镜效应是激光谐振腔设计、优化时考虑的重要因素之一^[6].

1 理论分析

光纤耦合的激光二极管发出的泵浦光光强分布可用高斯函数近似

$$I(r) = \frac{2P_{oh}}{\pi\omega_0^2} \exp(-2\frac{r^2}{\omega_0^2}) \quad (1)$$

式中 P_{oh} 是激光器输出泵浦光的能量; ω_0 是在近场近似条件下高斯光束的半径.

激光器稳定运转时激光晶体内部会形成稳定的温度场分布, 其温度场的分布数学表达式为^[5]

$$\Delta T(r, z) = \frac{\alpha P_{ph} \exp(-\alpha z)}{4\pi K_c} \left[\ln\left(\frac{r_b^2}{r^2}\right) + E_1\left(\frac{2r_b^2}{\omega_0^2}\right) - E_1\left(\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \right] \quad (2)$$

式中: P_{ph} 是产生热的泵浦能量, K_c 是介质的温度传导率, r_b 是激光晶体的半径, α 是激光晶体的吸收率.

激光介质在 LD 抽运下所产生的等效凸透镜焦距的表达式^[5]为

$$f = \frac{\pi K_c \omega^2}{\delta P_{in} (dn/dT)} \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \quad (3)$$

式中 dn/dT 为介质折射率随温度的变化率, α 为激光介质对泵浦光的吸收系数, l 为介质的长度, P_{in} 为抽运光功率, δ 为激光介质内作为热所损耗的功率占吸收功率的比例, ω 为泵浦光在介质中的半径. 当泵浦光光强为高斯分布时, ω 可定义为: 泵浦光在 ω 处强度是在轴心强度的 $1/e^2$. 对掺杂浓度为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体, $K_c = 0.054 \text{ W/cmK}$, $\alpha = 14.8 \text{ cm}^{-1}$, $dn/dT = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6} / \text{K}$ ^[7]. 由式(3)可以得出: 当泵浦光功率太大或泵浦光光斑半径太小都将使热焦距变短, 因此实验中用大功率 LD 泵浦时, 在基本满足与腔模相位匹配条件下^[8], 泵浦光的束腰半径应该尽量增大以减少热透镜效应^[9]. 根据以上参量, 可得到泵浦光功率为 20 W 时, 热焦距约为 15 cm 左右. 热透镜的测量方法很多^[10,11], 我们使用了侯学元的热焦距的动态测量方法, 实验结果与数值计算值相吻合^[12].

2 谐振腔的参量分析

折叠腔与直腔式结构相比具有模参量调整灵活以及腔内有效空间大,腔内倍频可有效的降低阈值,产生较细的光腰,提高了激光器对泵浦光的利用率,同时易于获得基模光斑输出,具有光-光转换效率高优点. 又可进行双端泵浦,减少单端泵浦造成的增益介质吸收不均匀性. 图 1 为双端泵浦四镜折叠腔结构简图.

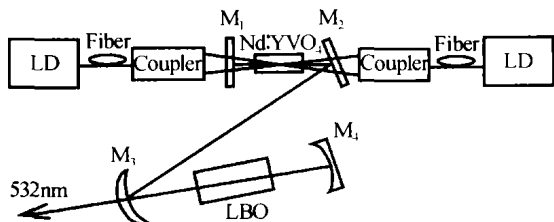


图 1 双端泵浦 Nd:YVO₄/LBO 激光实验简图
Fig. 1 Schematic diagram of LD double-end pump Nd:YVO₄/LBO laser experiment

激光晶体的热透镜效应是谐振腔设计中的中心问题,它对腔的稳定性和腔内各处的模参量有直接和较大的影响. 因此应把谐振腔的稳定工作区设计在较大的泵浦功率范围之内,这样既可使激光器实现高功率运转,同时又对泵浦功率的起伏具有不敏感的特性. 在谐振腔的设计中还要考虑在倍频晶体内的光斑大小,过分减小光斑会造成倍频晶体的损伤,而光斑过大又会降低倍频效率,使输出功率下降. 基于以上分析^[13],用传输矩阵法对谐振腔的等效热透镜腔进行分析和数值计算. 图 2 为谐振腔的等效热透镜示意图.

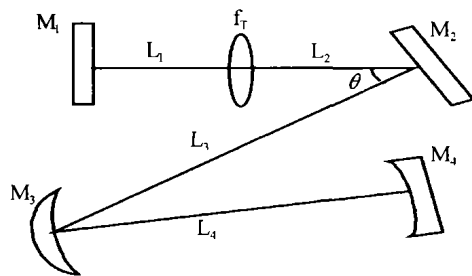


图 2 谐振腔的等效热透镜示意图
Fig. 2 Schematic illustration of Nd:YVO₄ laser's resonant structure

图中 M₁, M₂ 为平面镜, M₃ 为内表面曲率半径 R₃ 的凹凸弯月透镜; M₄ 为曲率半径 R₄ 的凹面镜.

根据标准的 ABCD 传输矩阵理论,根据谐振腔的稳定性条件.

$$|(A + D)/2| \leq 1 \quad (4)$$

得到基模高斯光束 q 参量与往返矩阵各元素之间的关系

$$\frac{1}{q_{l(s)}} = \frac{D_{l(s)} - A_{l(s)}}{2B_{l(s)}} - i \sqrt{1 - \left[\frac{A_{l(s)} + D_{l(s)}}{2} \right]^2} =$$

$$\frac{1}{R_{l(s)}} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_{l(s)}^2} \quad (5)$$

并得到在增益介质处高斯光束的光斑半径

$$\omega_{l(s)} = \sqrt{\frac{\lambda |B_{l(s)}|}{\pi \sqrt{1 - \left[\frac{A_{l(s)} + D_{l(s)}}{2} \right]^2}}} \quad (6)$$

改变往返矩阵的起点位置,便可以得到谐振腔内各处的光束参量,从而获得腔内光束的分布情况以及选择倍频晶体的放置位置.

根据上述分析,使用计算机软件进行数值计算. 我们对折叠腔处于稳定条件时各个参量的允许变化范围进行了分析计算. 图中的纵坐标为设定的谐振腔稳定条件范围,横坐标为腔参量的变化范围.

折叠腔的各参量为: $L_1 = 15 \text{ mm}$, $L_2 = 15 \text{ mm}$, $L_3 = 230 \text{ mm}$, $L_4 = 115 \text{ mm}$, f_2 为平面镜 M₂ 的焦距,可以视为 $f_2 = +\infty \text{ mm}$, f_3 为弯月透镜 M₃ 的焦距, $f_3 = 50 \text{ mm}$, f_4 为凹面镜 M₄ 的焦距, $f_4 = 25 \text{ mm}$. 从图 3 可得出所设计的折叠腔允许激光晶体的热透镜焦距变化范围从 80 mm 到 150 mm,表明此谐振腔可适应于更大功率的泵浦.

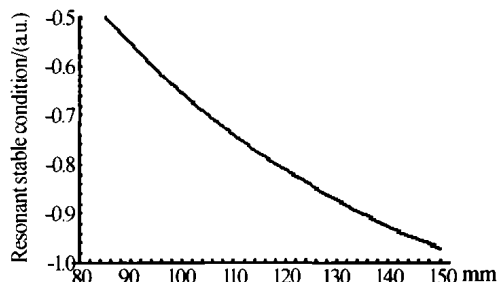


图 3 稳定条件下晶体热透镜焦距的改变范围
Fig. 3 Under resonant stable condition crystal's thermal lens focus change range

折叠腔的各个参量为 $L_1 = 15 \text{ mm}$, $L_2 = 15 \text{ mm}$, $L_3 = 230 \text{ mm}$, 设激光晶体热透镜焦距 f 为 140 mm, $f_2 = +\infty \text{ mm}$, $f_3 = 50 \text{ mm}$, $f_4 = 25 \text{ mm}$. 图 4 给出了在稳定条件下谐振腔参数 L_4 的可变范围.

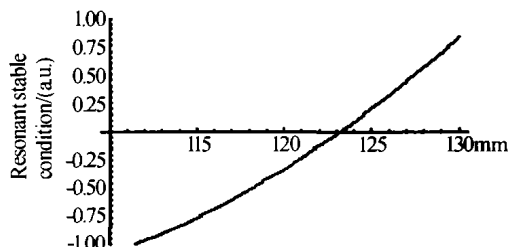


图 4 稳定条件下谐振腔参数 L_4 的改变范围
Fig. 4 Under resonant stable condition resonant parameter L_4 change range

折叠腔的其他参量为 $L_1 = 15 \text{ mm}$, $L_2 = 15 \text{ mm}$, $L_4 = 115 \text{ mm}$, 并设定激光晶体热透镜焦距 f 仍为 140 mm, $f_2 = +\infty \text{ mm}$, $f_3 = 50 \text{ mm}$, $f_4 = 25 \text{ mm}$. 图 5 给出了在稳定条件下谐振腔参量 L_3 的可变范围.

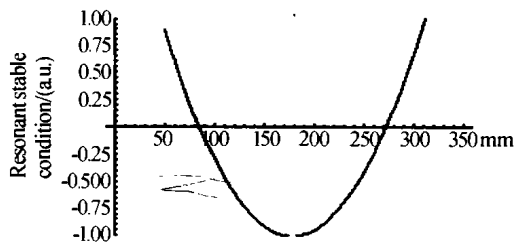


图5 稳定条件下谐振腔参量 L_3 的改变范围

Fig. 5 Under resonant stable condition resonant parameter L_3 change range

折叠腔的参量为 $L_1 = 15$ mm, $L_2 = 15$ mm, 热透镜焦距 f 为 140 mm, $f_2 = \infty$ mm, $f_3 = 50$ mm, $f_4 = 25$ mm. 三维立体图 6 给出了在稳定条件下谐振腔参量 L_3 , L_4 同时调整的可变范围.

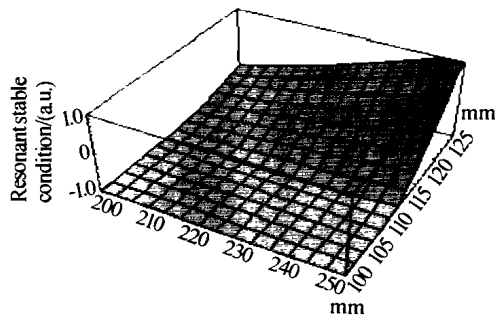


图6 稳定条件下谐振腔参量 L_3, L_4 同时调整的可变范围

Fig. 6 Under resonant stable condition resonant parameter L_3, L_4 change range

图 4、5、6 表明所设计的折叠腔具有灵活的腔参量调整空间和较大的空间变化范围. 并根据以上的数值计算结果, 我们筛选出了一组理想的腔参量: M_1 和 M_2 为平面镜, M_3 和 M_4 都是凹面镜, 曲率半径分别为 100 mm 和 50 mm, M_3 镜处的折叠半角小于 8° , $L_1 = 10$ mm, $L_2 + L_3 = 245$ mm, $L_4 = 115$ mm. LBO 晶体处于 M_3 和 M_4 之间, 距离 M_3 大约为 60 mm.

3 实验装置及实验结果

泵浦源为武汉凌云的 LYF-1 半导体激光器. 自行研制了两个平凸透镜组成的准直聚焦系统, 系统的物距为 30 mm, 像距为 32 mm, 通过离焦使用, 可将泵浦光聚焦为 $450 \mu\text{m}$ 左右光斑. Nd:YVO₄ 晶体由中科院福建物质结构所提供^[15], LBO 晶体由山东大学晶体所提供, 尺寸为 $4 \times 4 \times 8 \text{ mm}^3$, 两通光面镀有 1064 nm 和 532 nm 双色增透膜, 晶体以 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 11.6^\circ$ 切割, 采用了 18°C 恒温角度调谐相位匹配的方式.

Nd:YVO₄ 晶体和 LBO 晶体分别被置入精心设计的四周通有冷却水的铜块中. 用美国 NESLB 公司的 RTE 恒温冷却水浴循环器, 严格地控制 Nd:YVO₄ 晶体和 LBO 晶体温度冷却温度.

调整半导体激光器的泵浦电流, 用 Spectral Physics 公司的 R14 能量计观测激光器输出的绿光

功率在 10 min 内保持稳定, 记录激光器输出绿光的功率. 这样每隔 10 min 将此测量顺序重复一次, 可以得到半导体激光器输入总能量与倍频绿光输出能量的曲线图, 如图 7 所示.

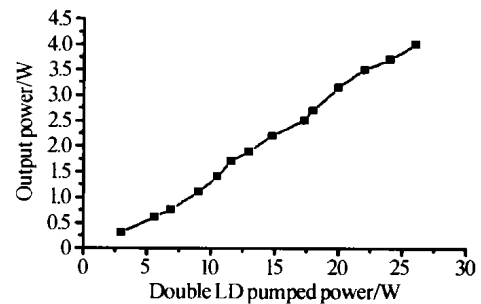


图7 Nd:YVO₄/LBO 激光器输出绿光功率曲线图

Fig. 7 Nd:YVO₄/LBO laser output power curve chart

当双端泵浦光功率之和为 26 W 时, 实际腔内泵浦功率为 $26 \times 90\% = 23.4$ W (考虑到准直聚焦系统 90% 的传输效率), 经过 LBO 倍频, 获得了 4 W 的稳定绿光输出, 其输出稳定性为 1.3%, 光-光转换效率为 13%. 同时在 LBO 晶体不施加任何冷却下做了相同的倍频实验, 其实验结果与图 7 基本相同.

4 结论

国内在这方面的报道中^[14,15]多采用的倍频晶体 LBO 的 I 类非临界位相匹配 (NCPM) 方式, 温度调谐方法, 将倍频晶体置于温控炉中, 并严格的控制炉温. 我们采用的是 LBO I 类角度调节位相匹配技术, 通过与温度控制倍频效率相比效率虽然低了一些^[15], 但实验结果表明: 非线性倍频晶体可在实际室温下无需附加装置, 通过角度调谐便达到了倍频的目的, 其系统结构简单, 并且具有较高的光-光转换效率.

参考文献

- 1 郑权, 赵岭, 钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展. 光学精密工程, 2001, 9(1): 6~9.
Zheng Q, Zhao L, Qian L S. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 6~9
- 2 Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, 24(6): 895~912
- 4 张行愚, 赵圣之, 王青圃, 等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应的研究. 中国激光, 2000, 27(9): 777~781
Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(9): 777~781
- 5 Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, et al. Thermal modeling of a continuous-wave end-pumped solid-state laser. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(19): 1831~1833
- 6 Agnesi A, Dellacqua S, Reali G C, et al. Design and characterization of a diode-pumped, single-longitudinal and transverse mode, intracavity-double CW Nd:YAG laser. *Appl*

- Opt*, 1997, **36**(3):597~601
- 7 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 an Nd:YVO₄ laser. *Chin Phys Lett*, 1998, **15**(6):418~419
- 8 刘均海, 吕军华, 卢建仁, 等. 高功率端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器模匹配的研究. *光学学报*, 2000, **20**(2):186~189
- Liu J H, Lü J H, Lu J R, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):186~189
- 9 Laporta P, Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, **27**(10):2319-2326
- 10 Ozygus B, Erhard J. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers with transverse beat frequencies. *Appl Phys Lett*, 1995, **67**(10):1361~1362
- 11 郭蕊香, 李凤琴, 谢常德, 等. 一种间接测量全固化激光器热焦距的方法. *中国激光*, 2001, **28**(8):721~724
- Guo R X, Li F Q, Xie C D, *et al.* *Chinas Journal of Lasers*, 2001, **28**(8):721~724
- 12 侯学元, 李宇飞, 孙渝明, 等. 热焦距的动态测量. *光子·激光*, 1999, **10**(3):276~277
- Hou X Y, Li Y F, Sun Y M, *et al.* *Journal of Optics · Laser*, 1999, **10**(3):276~277
- 13 Magni V. Resonator for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl Opt*, 1986, **25**(1):107~117
- 14 何京良, 王建明, 侯玮, 等. 激光二极管泵浦 Nd:YVO₄/LBO 腔内倍频瓦级连续波绿光激光器. *光学学报*, 1998, **18**(7):862~865
- He J L, Wang J M, Hou W, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(7):862~865
- 15 白晋涛, 赵致民, 李隆, 等. 8 W 高功率全固态 LD 双端抽运连续波绿光激光器. *中国激光*, 2003, **30**(1):40
- Bai J T, Zhao Z M, Li L, *et al.* *Chinas Journal of Lasers*, 2003, **30**(1):40

LD End-pumped Folded Cavity Nd:YVO₄/LBO Laser

Li Long^{1,2}, Tian Feng³, Zhao Zhimin¹, Tian Laike¹, Zhang Wei¹, Bai Jintao¹, Hou Xun^{1,2,4}

¹ Institute of Photonics & Photo-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China

² School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

³ The Foundation Department of Chang'an University, Xi'an 710064, China

⁴ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date:2003-05-07

Abstract End-pumped Nd:YVO₄ four-mirror formed fold-cavity structure is researched, rational resonant parameters have been designed and optimized. The designed fold cavity has furthest fit in with laser crystal's different thermal focal length, at the same time the cavity has other characteristic, such as resonant parameters adjusted flexibly. Nonlinear optical crystal LBO is used as intracavity double frequency crystal, with I-type angle tuning of phase-match, at double-ends 26 W pumped power, stable continuous-wave output of 4W at 532 nm green laser is obtained. At output of 4W Nd:YVO₄/LBO laser's stability is 1.3%, and the optical-optical conversion efficiency is 13%.

Keywords Thermal lens effect; Z-type fold cavity; Nd:YVO₄/LBO laser



Li Long was born in 1972. He received the B. S. degree in 1995 and the M. S. degree in 2001 from Shannxi Teacher University. He is a instructor at Xi'an University of Architecture & Technology. He now is studying for Ph. D. degree in Xi'an Jiaotong University. He works at Institute of Photonics & Photo-Technology, and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University. His major is LD pumped all-solid-state lasers.