

文章编号: 1001-3806(2013)04-0441-04

## 正分支共焦非稳腔的脉冲固体激光器研究

王灿召, 李丽, 尚卫东, 孙建国, 郭占斌, 李忠华

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

**摘要:** 为了获得高光束质量中红外激光抽运源, 采用正分支共焦非稳腔设计 Nd:YAG 脉冲固体激光器。在考虑晶体热效应情况下, 对其腔型参量进行了数值模拟和试验验证, 获得重复频率 10Hz、脉冲宽度 9.7ns、单脉冲能量 260mJ、光束参量积  $3.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$  的激光输出。该激光经放大后抽运 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 实现波长  $3.85\mu\text{m}$ 、脉冲宽度 8ns、单脉冲能量 104mJ 的激光输出, 光光转换效率为 12.5%。结果表明, 该抽运源光束质量满足高峰值功率中红外光参变振荡激光器使用要求, 为光电对抗领域的应用奠定了技术基础。

**关键词:** 激光器; 激光技术; 固体激光器; 正分支共焦非稳腔; 数值模拟; 光束质量

**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A      **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.006

## Study on pulsed solid-state lasers with positive branch confocal unstable resonators

WANG Can-zhao, LI Li, SHANG Wei-dong, SUN Jian-guo, GUO Zhan-bin, LI Zhong-hua

(The 27th Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** To obtain high beam quality pump sources for mid-infrared lasers, a Nd:YAG pulsed solid-state laser was designed with positive branch confocal unstable resonator. Under the influence of thermal effect, parameters of the positive branch confocal unstable resonator were optimized after numerical simulation and experimental verification. Single pulse energy of 260mJ, pulse width of 9.7ns and beam parameter product of  $3.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$  were achieved at 10Hz. After amplification and pumping MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal, single pulse energy of 104mJ at  $3.85\mu\text{m}$  was obtained with pulse width of 8ns, and its optical-optical conversion efficiency gets up to 12.5%. The results demonstrate that beam quality of laser pump source meets the requirements of the mid-infrared optical parametric oscillation laser. The research lays the technical foundation for its application in the field of optoelectronic countermeasures.

**Key words:** lasers; laser technique; solid-state lasers; positive branch confocal unstable resonator; numerical simulation; beam quality

### 引言

高功率高光束质量全固态激光器在军事、科研等领域具有广阔的应用前景。高功率全固态 Nd:YAG 激光器是光电对抗领域重要的对抗光源; 高光束质量  $1.06\mu\text{m}$  激光经非线性频率转换所产生的  $0.53\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$  等波段激光, 可以对抗多种类型的光电观瞄装置及光电制导武器。因此, 研究高功率高光束质量全固态  $1.06\mu\text{m}$  激光光源具有重要的应用价值。

然而, 激光增益介质的热透镜效应是高功率固体激光器提高光束质量需要解决的一个关键问题。由于抽运吸收及冷却不均匀致使增益介质具有径向温度梯度, 光焦度  $D$  (热焦距  $f = 1/D$ ) 随输入功率变化而变化, 激光振荡模式及光束质量不再由腔镜几何参量唯一确定, 而受到增益介质光焦度变化的影响, 因而谐振腔设计中需要考虑增益介质的可变热透镜效应<sup>[1-2]</sup>。

采用稳定腔设计, 激光光束质量较依赖于输入功率, 随输入功率增大, 光束质量明显变差, 腔内插入限模元件提高光束质量则是以牺牲增益介质模体为代价的, 导致能量转换效率降低。而非稳腔设计能够同时获得高光束质量及高能量转换效率, 成为解决高功率固体激光器工程应用的一个有效途

作者简介: 王灿召 (1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事固体激光器及其工程应用的研究。

E-mail: wangcanzhao2003@163.com

收稿日期: 2012-10-15; 收到修改稿日期: 2012-11-26

径<sup>[3-4]</sup>。

考虑到变反射率镜(variable reflectivity mirror, VRM)与非稳腔配合使用能够一定程度上提高光束质量并改善激光光斑均匀性<sup>[5-6]</sup>。本文中对使用VRM的正分支共焦非稳腔型参量进行了仿真优化,在此基础上试验研究了基于此设计的Nd:YAG脉冲固体激光器,并以此激光器抽运MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体,获得高峰值功率可调谐中红外激光输出,为其在光电对抗中应用奠定了技术基础。

### 1 正分支共焦非稳腔仿真设计

正分支共焦非稳腔、棒成像共焦非稳腔及对称近共心非稳腔是3种适用于高功率固体激光器工程应用的非稳腔型<sup>[7-8]</sup>。其中,对称近共心非稳腔具有腔型对光焦度变化灵敏度低的特点,利于保持腔型稳定,但其腔内存在两个焦点;共焦非稳腔主要优点是能够产生自动对准的输出光束,理想状态下输出激光束近似平行光,即光束发散角很小,其中,棒成像共焦非稳腔为负分支共焦腔,腔内存在一个焦点;而正分支共焦腔中,激光在谐振腔内不存在焦点。考虑到激光增益介质光焦度测量误差及输入功率抖动等外界因素影响,易造成实际腔型参量与仿真设计参量存在略微差异。此时选用棒成像共焦非稳腔或对称近共心非稳腔,由于谐振腔内存在焦点,操作不当易造成腔内光学元件的损伤,危害设备安全、降低设备可靠性<sup>[9-10]</sup>。基于此,以下采用正分支共焦非稳腔仿真设计具有可变热透镜的Nd:YAG脉冲固体激光器。

图1为正分支共焦非稳腔示意图。图中,增益介质及抽运源等效为具有可变光焦度 $D$ 的热透镜, $a$ 为输出镜膜斑半径, $b$ 为增益介质截面半径, $l$ 为增益介质长度, $d_1$ 为输出镜与相邻主平面距离, $d_2$ 为全反后镜与相邻主平面距离, $\rho_1$ 为输出镜曲率半径, $\rho_2$ 为全反后镜曲率半径, $M_1^*$ 为等效单程往返放大率, $M_2^*$ 为等效单程透射放大率。

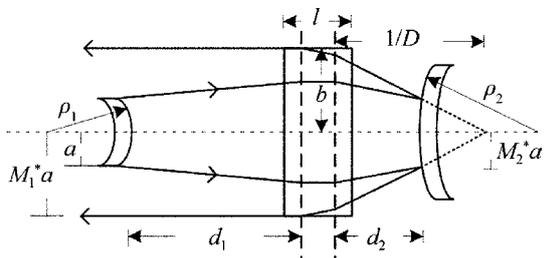


Fig. 1 Schematic diagram of positive branch confocal unstable resonator

$$g_i^* = g_i - Dd_j(1 - \frac{d_i}{\rho_i}), (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (1)$$

$$g_i = 1 - \frac{(d_1 + d_2)}{\rho_i} \quad (2)$$

$$L^* = d_1 + d_2 - Dd_1d_2 \quad (3)$$

式中, $g_i^*$ 为等效 $g$ 参量, $L^*$ 为等效腔长。假定光焦度为 $D_0$ 时实现共焦输出,即满足共焦条件 $2g_1^*g_2^* = g_1^* + g_2^*$ ,则得到正分支共焦非稳腔设计方程:

$$a = \frac{b}{1.05M_0} \quad (4)$$

$$\rho_1 = -\frac{b^2}{\lambda N_{eq}(1.05M_0)^2} \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{d_2[2 - D_0(M_0 - 1)\rho_1] + (M_0 - 1)\rho_1}{2(D_0d_2 - 1)} \quad (6)$$

$$\rho_2 = \frac{L^{*2}}{L^*(1 - D_0d_1) - \frac{a^2(M_0^2 - 1)}{4M_0N_{eq}\lambda}} \quad (7)$$

式中, $M_0$ 为非稳腔放大率; $\lambda$ 为激光波长; $N_{eq}$ 为等效菲涅耳数; $D_0$ 为激光增益介质光焦度。

对于高功率固体激光器,选取放大率 $M_0 = 2$ ,为提高横模鉴别度, $N_{eq}$ 取半整数值, $d_2$ 是自由参量,为消除放大区域对提取效率的影响,尽可能取小值,同时考虑到腔内其它光学元件需要占据的结构位置,最终选择 $d_2 = 260\text{mm}$ 。选取Nd:YAG尺寸为 $\varnothing 7\text{mm} \times 110\text{mm}$ , $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ ,抽运功率每千瓦对应的光焦度取值为 $0.3\text{m}^{-1}$ 。由(4)式计算得到VRM膜斑半径 $a = 1.7\text{mm}$ ;由(5)式计算得到 $N_{eq}$ 取不同值时对应的VRM曲率半径;对(4)式~(7)式进行数值模拟,结果如图2和图3所示。

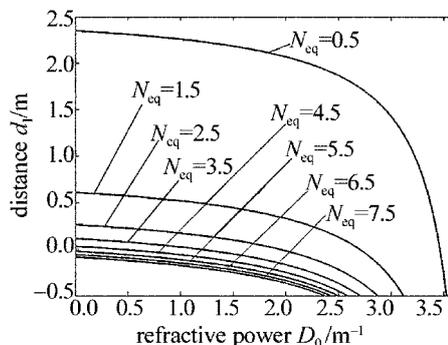


Fig. 2 Relationship between  $d_1$  and refractive power of Nd:YAG

由输入抽运功率计算得到 $D_0 = 0.06\text{m}^{-1}$ 。依据数值计算结果并以设备紧凑性为设计依据,最终优选出Nd:YAG脉冲固体激光器所采用的正分支共焦非稳腔腔型参量: $N_{eq} = 3.5$ , $a = 1.7\text{mm}$ , $\rho_1 = -0.75\text{m}$ , $\rho_2 = 1.6\text{m}$ , $d_1 = 109\text{mm}$ , $d_2 = 260\text{mm}$ 。考虑

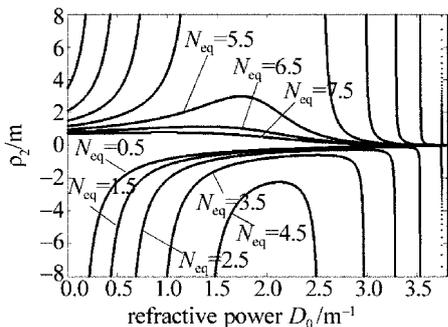


Fig. 3 Relationship between  $\rho_2$  and refractive power of Nd:YAG

实际器件加工情况,取  $a = 2\text{mm}$ ,  $\rho_1 = -0.8\text{m}$ 。

## 2 试验研究

图 4 为基于正分支共焦非稳腔 Nd:YAG 脉冲固体激光器抽运的中红外激光试验光路图。根据腔型优化计算结果,选取腔型参量为  $a = 2\text{mm}$ ,  $\rho_1 = -0.8\text{m}$ ,  $\rho_2 = 1.5\text{m}$ ,  $d_1 = 109\text{mm}$ ,  $d_2 = 260\text{mm}$ , VRM 中心反射率 30%, Nd:YAG 尺寸为  $\varnothing 7\text{mm} \times 110\text{mm}$ , 获得重复频率 10Hz、脉冲宽度 9.7ns、单脉冲能量 260mJ、光束参量积  $3.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、波长  $1.06\mu\text{m}$  的本振激光输出,经行波放大,单脉冲能量 830mJ,经扩束整形后抽运光参变振荡(optical parametric oscillation, OPO)晶体  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ , 晶体镀对抽运光、信号光和闲频光增透膜,将其固定在一个可以精确调节角度的 1 维转台上。 $M_3$  和  $M_4$  为  $45^\circ\text{HR}@1.06\mu\text{m}$  镜,  $M_5$  对抽运光高透,对信号光和闲频光高反;  $M_6$  对信号光半反,对闲频光高透;  $M_7$  为  $45^\circ$  滤光片,对抽运光和信号光全反,对闲频光高透,从而将闲频光分离出来。

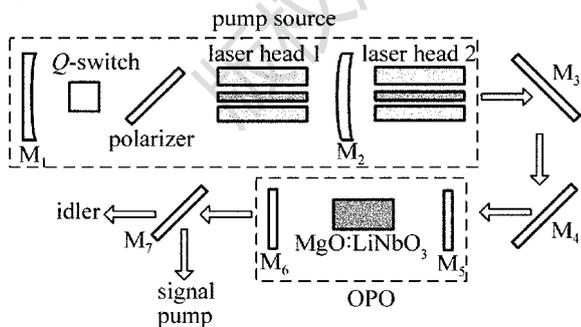


Fig. 4 Experimental diagram of mid-infrared laser

晶体正置时,试验测得闲频光波长  $3.85\mu\text{m}$ , 线宽 56nm, 脉冲宽度 8ns, 单脉冲能量 104mJ, 光光转换效率为 12.5%。通过转动转台,实现晶体与抽运光角度调谐相位匹配,以正入射角度为中心,往相位匹配角增大方向调节转台,实现波长  $3.9\mu\text{m}$  闲频光输出,往相位匹配角减小方向分步调节转台,实现波长范围  $3.85\mu\text{m} \sim 2.87\mu\text{m}$  的闲频光调谐输出。图 5

为闲频光输出能量与波长对应关系,图 6 为波长  $3.85\mu\text{m}$  激光脉冲波形图。

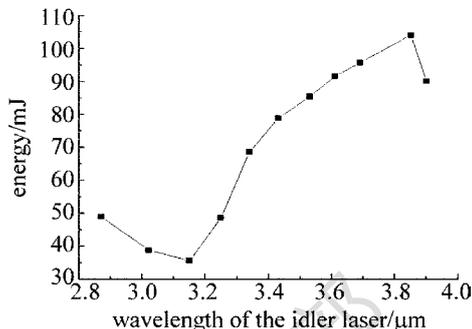


Fig. 5 Relationship between idler output energy and wavelength

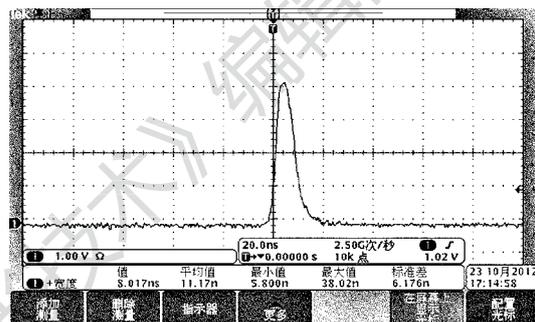


Fig. 6 Pulse width of  $3.85\mu\text{m}$  wavelength laser

进一步提高抽运光能量时发现,  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体表面出现膜层损伤和体损伤,若要继续提高中红外激光输出能量,需要提供更高光束质量更好光斑均匀性抽运源。通过精确测量激光增益介质光焦度、定制更接近最优化参量的 VRM、减少测量误差,能够进一步提高输出抽运光的光束质量和光斑均匀性。

## 3 结论

通过建立可变热透镜激光谐振腔仿真模型,对采用正分支共焦非稳腔的 Nd:YAG 脉冲固体激光器腔型参量进行了数值计算,实现了优化设计,依此激光器作为抽运源抽运  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体,实验中获得重复频率 10Hz、脉冲宽度 8ns、最大单脉冲能量 104mJ、波长  $2.87\mu\text{m} \sim 3.9\mu\text{m}$  的中红外激光输出,证明所设计抽运源光束质量满足要求,为其在光电对抗领域中应用奠定了技术基础。

### 参考文献

- [1] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. New York, USA: Springer Science + Business Media, 2006: 282-295.
- [2] HODGSON N, WEBER H. Laser resonators and beam propagation [M]. New York, USA: Springer Science + Business Media, 2005: 451-500.
- [3] HODGSON N, WEBER H. High power solid state lasers with unstable resonators [J]. Optical and Quantum Electronics, 1990, 22 (12): 39-55.

- [4] HE G Y, GUO J, JIAO Zh X, *et al.* Control of the thermal lensing effect in solid-state laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(9): 0942171 (in Chinese).
- [5] GUO R H, LI D J, YANG G L, *et al.* Design and experiment of unstable resonator for high-power TEA CO<sub>2</sub> laser[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3): 253-257 (in Chinese).
- [6] GAO H W, PENG Q J, CUI Q J, *et al.* Double focus thermally-near-unstable resonator laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 56-58 (in Chinese).
- [7] MAGNI V, DESILVESTRI S, QIAN L J, *et al.* Rod-imaging super-gaussian unstable resonator for high power solid-state lasers [J]. *Optics Communications*, 1992, 94(1): 87-91.
- [8] HODGSON N, BOSTANJOGLO G. The near-concentric unstable resonator(NCUR)-an improved resonator design for high power solid state lasers[J]. *Optics Communications*, 1993, 99(1/2): 75-81.
- [9] HODGSON N, BOSTANJOGLO G, WEBER H. Multirod unstable resonators for high power solid-state lasers [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 5902-5917.
- [10] HODGSON N, WEBER H. Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd: YAG lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(9): 2497-2507.

· 简 讯 ·

请向邮局订阅 2014 年度《激光技术》!

国内邮发代号:62-74;国内统一刊号:CN51-1125/TN