

# 非热稳定非稳腔固体激光理论分析与实验研究

靳全伟<sup>1</sup> 蒋建锋<sup>1</sup> 涂波<sup>1</sup> 蔡震<sup>1</sup> 王亚丽<sup>1</sup> 王小军<sup>2</sup> 温圣林<sup>3</sup> 唐淳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院应用物理与计算数学研究所, 北京 100088  
<sup>3</sup> 中国工程物理研究院成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041

**摘要** 建立了包括非热稳定热力学模型、光学传输模型、能量转换模型及非稳腔模型的综合理论分析平台。理论分析得到以下主要结论: 谐振腔长度变化对光束质量及光光效率的影响不大, 对于给定的增益, 激光最佳效率和光束质量分别对应不同的非稳腔放大率。提出非稳腔腔内相位板补偿介质静态畸变提高光束质量的技术措施, 并开展实验验证, 光束质量由补偿前的 5.48 倍衍射极限提升到补偿后的 2.46 倍, 输出功率为 12.1 kW。

**关键词** 激光光学; 非稳腔; 高平均功率; 高光束质量; 相位板; 腔内补偿

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0314002

## Theory Analysis and Experimental Investigation of Thermodynamic Unstable Resonator Solid State Laser

Jin Quanwei<sup>1</sup> Jiang Jianfeng<sup>1</sup> Tu Bo<sup>1</sup> Cai Zhen<sup>1</sup> Wang Yali<sup>1</sup> Wang Xiaojun<sup>2</sup>  
Wen Shenglin<sup>3</sup> Tang Chun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China  
<sup>2</sup> Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China  
<sup>3</sup> Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** An integrated theoretical analytic platform is developed, which consisted of the thermodynamic model, beam transformation model, energy transition model and active unstable resonator model. The main conclusion of theory analysis is that: the beam-quality and optical-optical efficiency are weakly impacted by the length of resonator on fixed gain; the optimal efficiency and beam-quality are different corresponding to magnification for unstable resonator. The experiment of phase plate with passive resonator compensation is accomplished, the beam quality is improved from 5.48 times of diffraction limit to 2.46, with the output power of 12.1 kW.

**Key words** laser optics; unstable resonator; high average power; high beam quality; phase plate; resonator compensation

**OCIS codes** 140.2010; 140.3480; 140.3538; 140.6810; 140.3580

## 1 引 言

近年国内外谐振腔型全固态激光器的功率水平已得到显著提高,但在实现功率放大的同时遇到了大量新的物理问题与技术困难,严重制约了谐振腔型高平均功率固体激光技术的快速发展,迫切需要深入开展相关基础问题研究和创新性研究。到目前

为止,国内还没有成熟的高亮度高平均功率谐振腔型全固态激光方案,需要对高功率下光束质量变差的物理机制、影响因素及解决途径进行深入研究探索。2008年,波音公司利用10块Yb:YAG薄片作为激光介质,谐振腔镜采用高斯变反镜(VRM),激光器的输出功率达到27 kW<sup>[1]</sup>。2010年LLNL

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(60890201)

作者简介: 靳全伟(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: angeljqw@163.com

实验室报道了采用腔内自适应补偿技术在万瓦输出功率水平上实现了约 2 倍衍射极限的高光束质量输出<sup>[2]</sup>。2010 年,初达信公司的“ThinZag”激光器宣布实现了 100 kW 输出<sup>[3]</sup>,但未见效率和光束质量报道。2011 年通用原子公司浸入式激光器实现了高功率、高光束质量的激光输出<sup>[4]</sup>。

围绕着高功率全固态激光器(DPL)的发展,目前所采用的技术途径主要有两条:1)采用大口径激光介质<sup>[5]</sup>作为工作物质,通过谐振腔内多片介质串接<sup>[6]</sup>从而实现单孔径的高功率激光输出<sup>[7]</sup>;2)采用主振功率放大器(MOPA)工作方式<sup>[8]</sup>,将高光束质量、低功率的种子源激光注入高储能的放大器模块,通过多通放大实现激光器的高功率输出<sup>[9]</sup>,进一步通过多光路相干合成实现百千瓦激光输出。与 MOPA 功率定标放大的技术路线相比,前者具有效率高、结构简单紧凑等优点<sup>[10]</sup>,但是谐振腔技术路线对激光光束质量控制手段较少,因此对谐振腔的物理分析<sup>[11]</sup>和优化设计<sup>[12]</sup>提出了更高要求。

## 2 非热稳定大模体积谐振腔理论物理分析及数值计算

从非涅耳-基尔霍夫衍射积分出发,可以建立一个描述光学谐振腔特性的本征积分方程。利用这个方程可以求得任意光腔的模参数,包括腔模的场振幅、相位分布、谐振频率和衍射损耗等。虽然本征积分方程的解在数学上已经证明,但是至今只在少数情况下求出解析形式的解,在大多数情况下,需要求解数值解。

光学谐振腔的本征积分方程可表示为

$$\gamma_1 E_1(x_1, y_1) = \frac{i}{\lambda L} \int_{s_2} E_2(x_2, y_2) \exp(-i\mathbf{k}\rho) ds_2, \quad (1)$$

$$\gamma_2 E_2(x_2, y_2) = \frac{i}{\lambda L} \int_{s_1} E_1(x_1, y_1) \exp(-i\mathbf{k}\rho) ds_1, \quad (2)$$

式中  $\gamma_i$  为本征值,  $L$  为腔长,  $\mathbf{k}$  为波矢。

将介质分为  $m$  层,介质总长度为  $L$ ,则每一层的厚度为  $l = L/m$ ,对介质内部的每一层考虑到饱和效应的影响有

$$E = E_0 \exp\left[\frac{1}{2} \left( \frac{g_0}{1 + I/I_s} - \alpha_L \right) dl\right], \quad (3)$$

式中  $\alpha_L$  为介质的吸收损耗系数,小信号增益  $g_0$  为

$$g_0(x, y, z) = \alpha_p \eta_Q \eta_{st} I_p(x, y) \{ \exp(-\alpha_p z) + \exp[-\alpha_p(l - z)] \} / I_s, \quad (4)$$

式中  $\eta_Q$  和  $\eta_{st}$  分别为量子效率和斯托克斯效率,  $I_s$  为饱和光强,  $\alpha_p$  为介质对抽运光的吸收系数。

对于非热稳定谐振腔,需要考虑热致光学畸变的时间演化。首先需要求解热传导方程的含时解:

$$\rho c \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T(\mathbf{x}, t) + Q(\mathbf{x}), \quad (5)$$

式中  $\rho, c, \kappa$  分别为介质的密度、比热容和热导率。热源  $Q(\mathbf{x})$  由抽运的横向均匀性、抽运功率和介质对抽运光的吸收系数  $\alpha_p$  决定,对于双端单通抽运结构有:

$$Q(x, y, z) = \alpha_p \eta_h I_p(x, y) \{ \exp(-\alpha_p z) + \exp[-\alpha_p(l - z)] \}, \quad (6)$$

式中  $I_p$  为入射抽运光强,  $\eta_h$  为产热比,对于掺杂原子数分数为 0.6% 的 Nd:GGG 取 0.4。求解(6)式时,介质的所有边界都取绝热边界条件。

介质温度分布的横向不均匀性导致介质表面的不均匀形变,可以估算为

$$\Delta z(x, y, t) = \beta_h \int_{l/2}^l dz \cdot [T(x, y, z, t) - T_0], \quad (7)$$

式中  $T_0$  为室温,  $\beta_h$  为热膨胀系数。那么每个时刻介质上热致光学畸变可以用光程差表示,由(5)式和(7)式得到

$$D_{op}(x, y, t) = \frac{dn}{dT} \int_0^l dz \cdot [T(x, y, z, t) - T_0] + 2(n - 1) \Delta z(x, y, t), \quad (8)$$

将热致光学畸变转换成相位因子并代入描述光学谐振腔特征的本征积分方程,迭代计算其输出镜处的衍射分布,通过衍射图样的强度分布(9)式获得激光光强,通过其输出镜处的衍射光强分布求出激光器的功率及远场光束质量。

$$I(x, y) \propto \left| F \left\{ E(x, y) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda z_1} (x^2 + y^2) \right] \right\} \right|^2. \quad (9)$$

研究中利用非稳腔理论分析模型数值模拟了不同腔参数下激光器的输出功率及光束质量变化情况,初始条件假定为激光器同时满足输出功率大于 10 kW、光束质量  $\beta$  因子小于 6。图 1 为 2 倍放大率时不同腔长下光束质量和光光效率随时间的变化曲线。

数值模拟结果显示当腔长在 3~6 m 之间变化时,短腔的光束质量稍好点,但长腔输出功率较高,造成这种差异的原因是由于短腔对热致相差的容忍度较好,而长腔时在相同放大倍率下发射的球面光束通过介质的模体积较大,从而提取能量较多。但总体来说,谐振腔长度变化对光束质量及光光效率带来的影响不大,从万瓦实验平台空间布局的实际

情况出发,两块介质的间距需要 90 cm,而 4 块介质的腔长则会达到 3.7 m。考虑到实际光路调节的冗

余度取腔长  $L=4.0$  m。

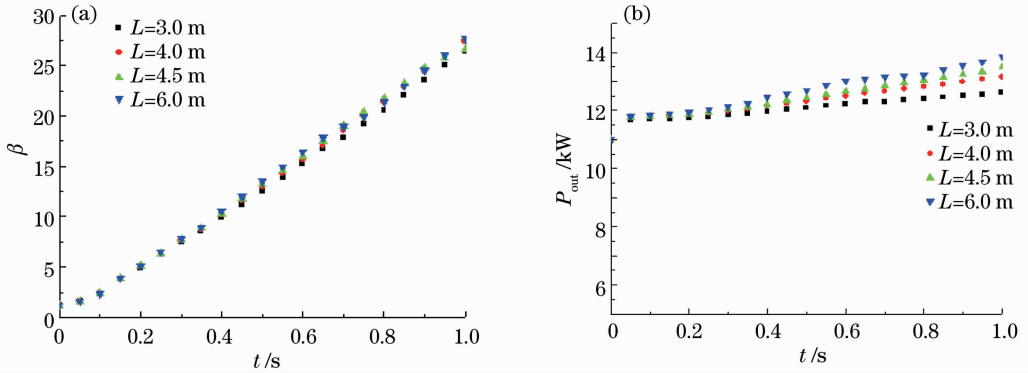


图 1 谐振腔腔长对(a)光束质量和(b)输出功率的影响

Fig. 1 Influence of length of resonator on (a) beam quality and (b) output power

根据谐振腔理论,放大率越大的腔对像差的容忍程度越强,即光束质量越好,光光效率越低,这二者之间是矛盾的。为了综合评价放大率对激光器的影响,使用如下两个参数对谐振腔进行综合评价:

$$\eta = \beta P_{in} / P_{out}, \quad \xi = \eta / \gamma_0, \quad (10)$$

式中  $\gamma_0$  为不同遮拦比理想环形光束在第一衍射斑内的能量占比,  $\beta$  为以输出功率为基准得到的环围

半径来定义的光束质量因子。 $\eta$  的物理意义是以抽运功率为基准得到的环围半径来定义的光束质量因子;而  $\xi$  在物理上则描述了确定比率的抽运能量在远场的弥散程度。图 2 为不同放大率下光束质量和光光效率随时间的变化,图 3 给出了不同放大率下  $\eta$  和  $\xi$  随时间的变化。

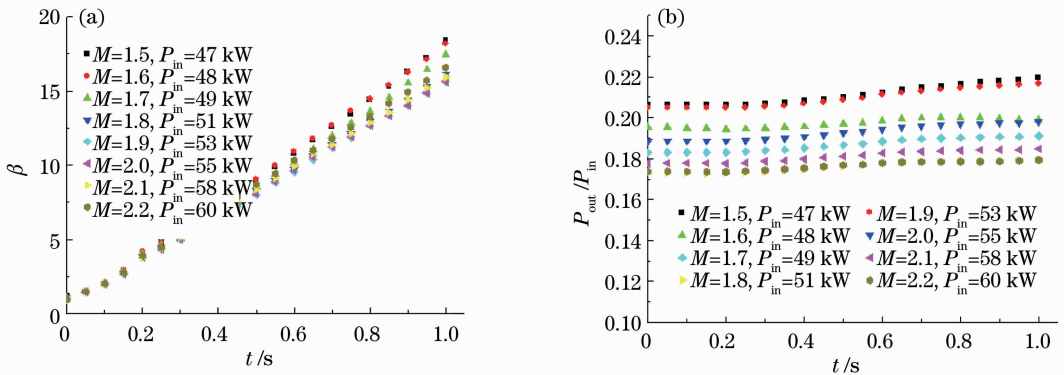


图 2 谐振腔放大率  $M$  对(a)光束质量和(b)光光效率的影响

Fig. 2 Influence of different resonator magnification  $M$  on (a) beam quality and (b) optical-optical efficiency

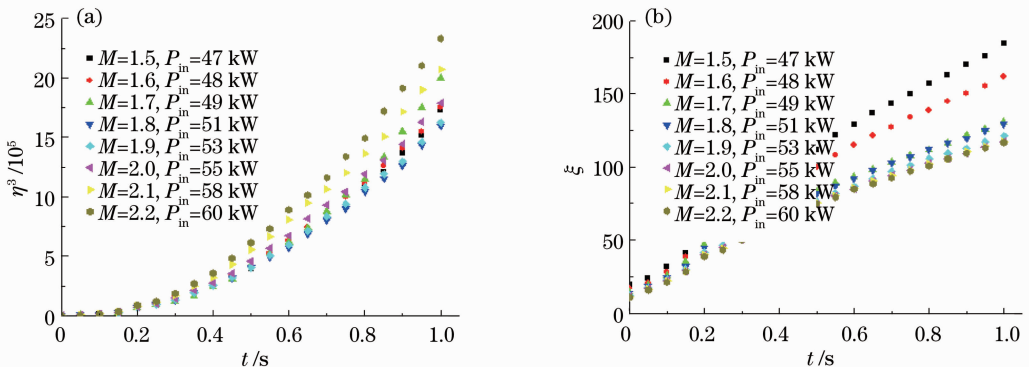


图 3 谐振腔放大率对(a)  $\eta$  和(b)  $\xi$  的影响

Fig. 3 Influence of different resonator magnifications  $M$  on  $\eta$  and  $\xi$

如果追求光束质量,放大率应该在 1.8~2.0 ( $M > 1.8$  时由于需要提高抽运功率以满足输出功率大于 10 kW 的需求,随之增长的热致像差抵消了放大率增加对光束质量的提升效果);如果追求光光效率,建议  $M = 1.5$ ;如果使用  $\eta$  来综合评价,最优的放大率仍然为  $M = 1.8$ ;即使使用指标  $\xi$  来评价,  $M > 2.0$  后对激光器性能的提升是非常有限的。

根据以上分析并结合二极管激光器阵列参数,确定谐振腔参数如下:谐振腔长度 4.2 m,放大率  $M = 1.7$ ,腔镜曲率半径分别为 20.4 m(凹镜)和 12 m(凸镜),刮刀镜口径为 46 mm,理论分析显示可以达到平

均输出功率为 11.7 kW,工作时间 0.6 s 内平均光束质量达 6 倍衍射极限,光光效率约为 28%。

### 3 10 kW 谐振腔全固态激光器实验研究

激光器布局如图 4 所示,采用 8 个二极管面阵对称布置对 4 片直径为 80 mm 的 Nd:GKG 晶体进行抽运,二极管阵列发出的抽运光通过双色镜进入波导,并在波导输出端放置激光介质,激光介质采用双向端面抽运。激光介质、双色镜、波导、高反镜(HR)和 OC 组成激光谐振腔。激光介质的掺杂原子数分数为 0.6%,其通光面镀 808 nm 和 1064 nm 的消反膜。

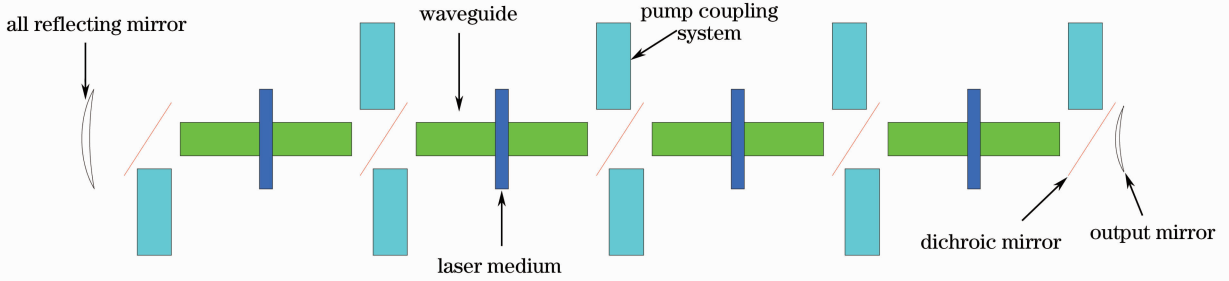


图 4 激光器实验布局图  
Fig. 4 Schematic diagram of laser

实验中所采用的 4 块 Nd:GKG 晶体的静态透射波前检测结果如图 5 所示,其中 2 块晶体质量较好,透射波前峰谷(PV)值在 0.5~0.7  $\mu\text{m}$  之间且波面是连续的;另外两块晶体质量较差,透射波前 PV

值在 2.6~3.5  $\mu\text{m}$  之间且波面是不连续的,且有很多尖峰和低谷,将 4 块 GKG 材料的静态像差进行空间叠加求偶计算,再考虑实际加工能力之后得到了相位板的设计结果,如图 6 所示。

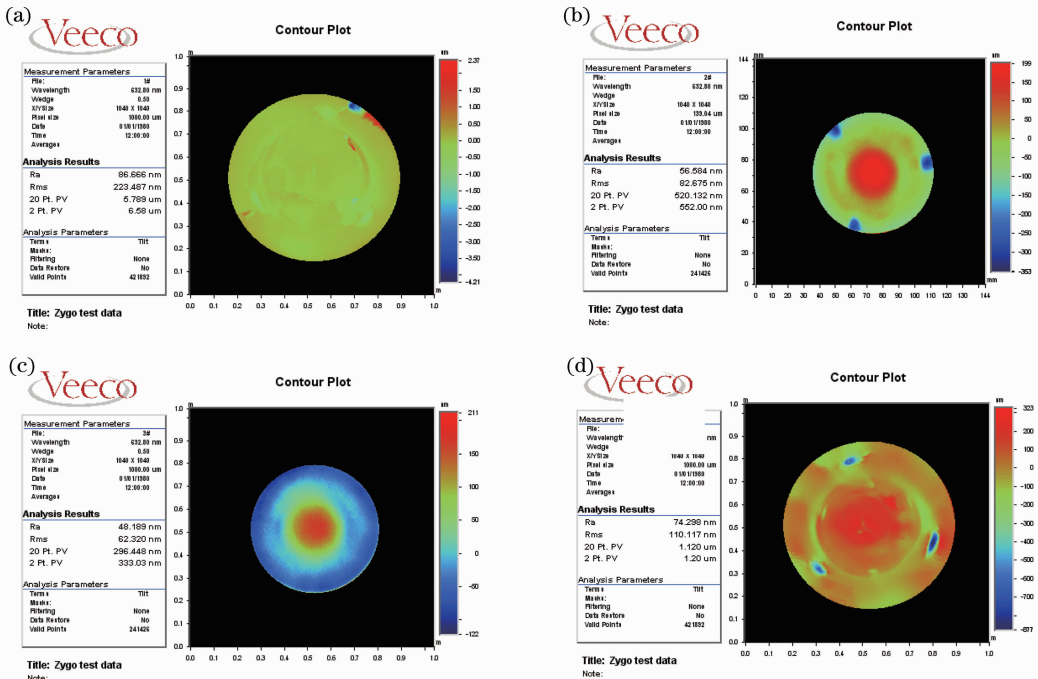


图 5 GKG 晶体静态像差测量结果  
Fig. 5 Metrical result of GKG medium

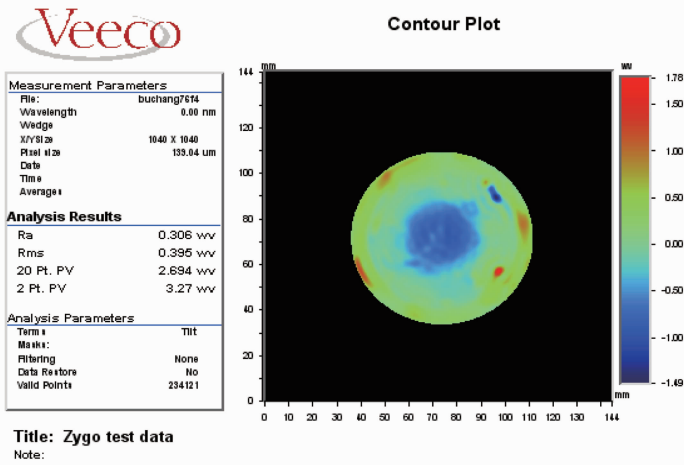


图 6 静态像差补偿相位板

Fig. 6 Design of phase plate with passive compensation

将 4 块晶体材料的静态像差及相位板的波前分布带入非稳腔理论分析模型计算了激光器输出光斑的光束质量。如图 7 所示,在未补偿前晶体静态波前畸变所产生的光束质量  $\beta$  约为 5.48,采用相位板

补偿后光束质量  $\beta$  变为 1.61。理论分析结果表明相位补偿板能够大幅度改善晶体畸变对光束质量的影响。

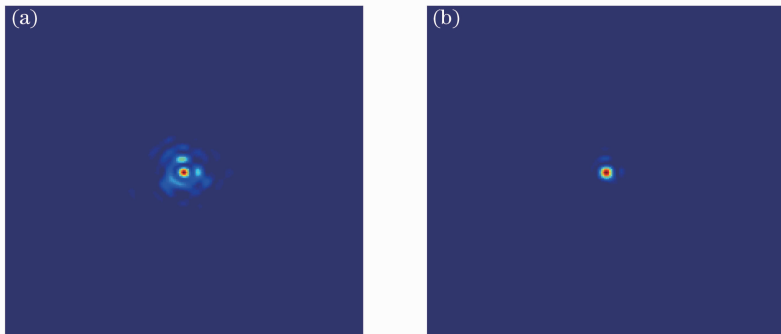


图 7 相位补偿板校正前后的模拟结果

Fig. 7 Simulated result of phase plate (a) with and (b) without passive compensation

开展了非稳腔被动补偿出光实验,将相位板放置于第 4 块晶体和刮刀镜之间,激光器的运行条件为抽运脉宽为 300  $\mu$ s,重复频率为 500 Hz。实验测量结果

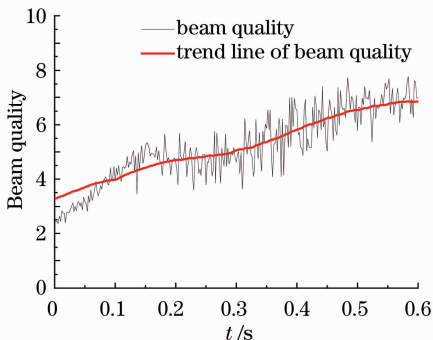


图 8 激光器光束质量实验结果

Fig. 8 Experimental result of laser beam quality

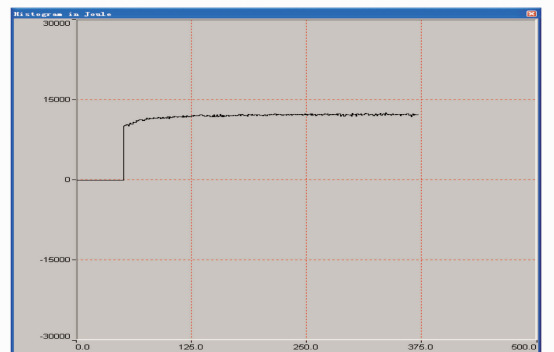


图 9 激光器功率实验结果

显示激光器平均功率为 12.1 kW,初始阶段平均光束质量为 2.46 倍衍射极限,在连续出光 0.6 s 内激光器的平均光束质量约为 5.35 倍衍射极限,但随着工作

时间的延长,由于废热的持续积累使激光器的光束质量迅速退化。

## 4 结 论

重点开展了非热稳定大模体积非稳腔技术理论和实验研究,其中包括:非热稳定条件下的非稳腔理论,激光输出功率和光束质量变化规律,高平均功率激光参数动态测量及谐振腔参数自适应调整与匹配技术等,提出了非热稳定大模体积非稳腔设计方案;建立了高平均功率非热稳定腔全固态激光实验平台,利用 Nd:GGG 介质开展相位板补偿介质静态畸变的实验研究,激光光束质量由补偿前的 5.48 倍衍射极限提升到补偿后的 2.46 倍衍射极限,输出功率为 12.1 kW。研究结果对下一步验证高功率激光功率定标放大能力、进一步提高输出功率并保持良好光束质量具有一定的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 P V Avizonis, D J Bossert, M S Curtin, *et al.*. Physics of high performance Yb:YAG thin disk lasers [C]. Baltimore, 2009, CThA2.
- 2 M D Rotter, B Bhachu, S Gonzales, *et al.*. Recent progress in diode-pumped, solid-state heat-capacity lasers [C]. 17th Solid State and Diode Laser Technology Review Technical Digest. Albuquerque, New Mexico, 2004. 48.
- 3 A Mandl, D E Klimek. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, CA, 2010.
- 4 M D Perry, P S Banks, J Zweiback, *et al.*. Laser Containing a Distributed Gain Medium [P]. US Patent 6937629, 2003.

- 5 Wang Chao, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun, *et al.*. Experimental investigation on 8.7 kW laser-diode pumped solid state heat capacity laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 77-78.  
王超,周寿桓,唐晓军,等. LD泵浦 8.7 kW 固体热容激光器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 77-78.
- 6 Jin Quanwei, Cai Zhen, Jiang Jianfeng, *et al.*. High beam quality and high power LD pumped solid-state laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202001.  
靳全伟,蔡震,蒋建锋,等. 高光束质量高功率激光二极管抽运固体激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202001.
- 7 Liu Yang, Wang Chao, Tang Xiaojun, *et al.*. Laser diode-pumped four Nd:YAG disks laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202007.  
刘洋,王超,唐晓军,等. 激光二极管抽运四片串联 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202007.
- 8 S J McNaught, C P Asman, H Injeyan, *et al.*. 100-kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array [C]. Conference on Frontiers in Optics, San Jose, CA, OCT, 2009.
- 9 Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, *et al.*. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202001.  
高清松,胡浩,裴正平,等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202001.
- 10 Cai Zhen, Wang Xiaojun, Jiang Jianfeng, *et al.*. Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2437-2440.  
蔡震,王小军,蒋建锋,等. 薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2437-2440.
- 11 Wang Xiaojun, Cai Zhen, Jiang Jianfeng, *et al.*. Thermal unbalance by amplified spontaneous emission absorber in an Nd:YAG thin-disk laser [J]. Opt Lett, 2010, 35(20): 3381-3383.
- 12 Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high peak power Yb:YAG pulsed lasers with high efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2278-2283.  
王建磊,施翔春,朱小磊. 高效率大功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2278-2283.

栏目编辑:张 腾