

高光束质量高功率激光二极管抽运固体激光器

靳全伟¹ 蔡震¹ 蒋建锋¹ 涂波¹ 王亚丽¹ 李密¹ 王晓军² 唐淳¹ 张凯¹

(¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)
²北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要 利用 Nd:GGG 晶体开展了非稳腔的设计研究,通过对抽运系统的优化设计,使抽运均匀性提高到 94%;建立了热力学计算模型,计算得到了激光介质的温度分布,实验验证了计算模型的可靠性;利用非稳腔理论分析模型优化了非稳腔的设计参数,实现了输出功率大于 10 kW、平均光束质量为 5.84 倍衍射极限的激光输出。

关键词 激光器;荧光分布;固体激光器;光束质量;非稳腔;温度分布

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1202001

High Beam Quality and High Power LD Pumped Solid-State Laser

Jin Quanwei¹ Cai Zhen¹ Jiang Jianfeng¹ Tu Bo¹ Wang Yali¹ Li Mi¹
Wang Xiaojun² Tang Chun¹ Zhang Kai¹

(¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
²Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract The design of unstable resonator has carried out by Nd:GGG. Coupling system is optimistically designed to get the uniform of gain distribution to 94%. Thermal simulation module is established and temperature-distribution of laser medium is calculated. The simulation module is attested by the experimental results. Then the design parameters of unstable resonator are optimized by theoretically analytical module of unstable resonator. The experimental results show that the output power is more than 10 kW and the average beam quality is 5.84 times diffraction limit.

Key words lasers; solid-state laser; fluorescence distribution; beam quality; unstable resonator; temperature-distribution

OCIS codes 140.2010; 140.3480; 140.3538; 140.6810; 140.3580

1 引言

近年国内外全固态激光器的功率水平虽已得到显著提高,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,严重制约了高平均功率固体激光技术的进一步快速发展,迫切需要深入开展相关基础问题研究和创新性研究。如以热容模式运转的高功率固体激光器,在工作过程中不冷却激光介质,因而随着激光运转,激光介质的温度大幅度变化,温升达到上百度。另外,由于实际中难以实现理想的均匀抽运和激光增益,激光介质的热效应是随着激光工作时间不断动态变化的过程,这使得热容

激光器的谐振腔设计完全不同于常规的热稳定激光器。2003 年激光二极管(LD)抽运激光器研制实现了 10 kW 平均功率输出,2004 年进一步报道了超过 30 kW 的功率输出^[1~4],2006 年 4 月劳伦斯·利弗莫尔国家实验室在研究中实现输出功率和光束质量的重大突破,报道了 67 kW 输出功率,并已开始研制 100 kW 级的移动装置。为了减少抽运不均匀对激光介质波前畸变带来的影响^[5],本文开展了对抽运系统的优化设计,进一步进行了非热稳定大模体积腔技术理论和实验研究,理论分析了不同放大倍率对激光器光束质量带来的影响,明确了非稳腔的

收稿日期: 2011-07-30; 收到修改稿日期: 2011-09-06

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890201)资助课题。

作者简介: 靳全伟(1981—),男,助理研究员,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: angeliqw@163.com

设计参数,使用 Nd:GGG 晶体作为激光介质进行了非稳腔实验研究,4 片 Nd:GGG 介质串联实现大于 10 kW 的激光输出,光束质量小于 6 倍衍射极限,与理论分析结果吻合。

2 数值计算

2.1 热力学计算

激光工作物质、光学元件等因吸收抽运光或激光而形成非均匀温升,引起动态光学畸变,造成激光

输出功率下降、光束质量变差^[6],因此必须深入分析高平均功率激光器中各元件非线性热动力学过程。首先假定激光介质处于绝热状态,激光介质吸收的抽运光能量为其唯一热源,吸收的抽运光能量一部分转化为激光输出,部分能量形成热沉,引起介质内部的温升^[7]。利用 LD 抽运激光器的吸收效率公式,由激光介质的瞬态导热微分方程得到纵向 Z 处厚度为 dz 的微元段的热沉积功率:

$$dP(x, y, z) = P(x, y)_{\text{pump}} \{ \exp(-\alpha_D z) + \exp[-\alpha_D(l - z - dz)] \} [1 - \exp(-\alpha_D dz)] \chi, \quad (1)$$

式中 α_D 为吸收系数, l 为介质厚度, χ 为产热比, $P(x, y)_{\text{pump}}$ 为传输到介质端面的抽运功率分布。

激光介质的抽运光强分布可以通过测量激光介质的荧光分布获得,然后归一化,得到抽运光强面分布的比例因子 $t(x, y)$,根据比例因子得到抽运光强分布的数值解:

$$P(x, y)_{\text{pump}} = P_{\text{av}} t(x, y) / 2, \quad (2)$$

式中 P_{av} 为平均抽运功率面密度,可表示为

表 1 端面抽运 Nd:GGG 晶体的热和应力分析

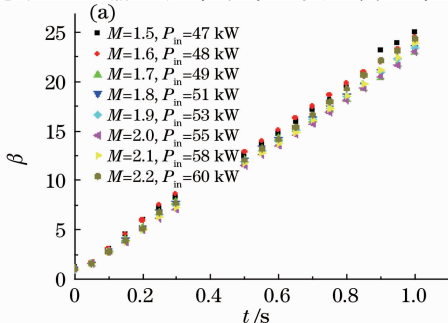
Table 1 Analysis of thermal and stress for LD pumped Nd:GGG

Size of medium $\varphi \times l / \text{cm}^3$	Efficient pumping power of LD / kW	Pumping period / s	Uniformity of pumping light / %	Highest temperature / K	The most von Mises stress / MPa
8.0 × 1.8	10.0	2.0	50	375	120
			85	337	60
			90	334	51
			95	332	49

模拟结果如表 1 所示,当均匀性优于 85% 后,抽运均匀度的较小提升对增益介质的温度场和应力场影响不大,但对光束畸变量、特别是热透镜^[8]焦距产生较大的影响,连续抽运 2 s 后,材料的热应力约为 50 MPa,远低于破坏极限(220 MPa)。

2.2 非稳腔的优化设计

激光器要想在万瓦输出功率水平上实现高光束



质量输出,采用正支虚共焦非稳腔是一个合理的选择^[9]。研究中针对激光器动态热效应带来的动态热聚焦现象,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,图 1 为不同放大率下光束质量和光-光效率随时间的变化曲线。

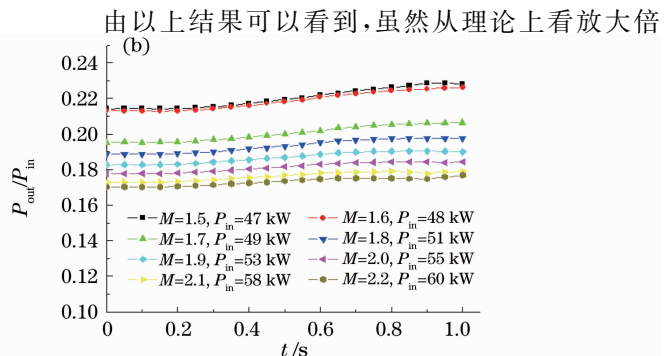


图 1 不同谐振腔放大率对光束质量(a)和光-光效率(b)的影响

Fig. 1 Influence of different M on (a) beam quality and (b) optical-optical efficiency

率 M 越大越有利于激光器模式的控制,但放大倍率越大则谐振腔的损耗也会越大,这意味着为了保证激光器大于万瓦的激光输出所需的抽运功率越高,由此带来热效应的加剧弱化了放大倍率提高对光束质量改善带来的效果,如果单纯追求光束质量,放大率应该在 1.9 以上($M > 1.9$ 时由于需要提高抽运功率以满足输出功率需求,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);如果单纯追求光-光效率,并且激光器运行时间较短(小于 0.8 s)可以使用小放大率的腔,建议 $M = 1.5$;在综合考虑放大倍率对光束质量及光-光效率二者影响的基础上确定谐振腔的放大倍率为 $M = 1.6$,具体腔参数为腔长 3.75 m,凹镜曲率半径为 20 m,凸镜曲率半径为 12.5 m,模拟结果显示此时激光器的输出功率约为 12 kW,在初始时间内光束质量小于 6

倍衍射极限。

3 实验光路设计

激光器的光路布局如图 2 所示,采用 4 片串联的直径 80 mm、厚度为 18 mm 的 Nd:GGG 激光介质,谐振腔采用放大率为 1.6 倍的非稳腔,腔长 3.75 m,凹镜曲率半径为 20 m,凸镜曲率半径为 12.5 m,腔镜为全反镜,激光采用遮拦孔径输出。抽运源采用 8 个自研 LD 叠阵,每个 LD 叠阵由 5×55 个 LD 条组成,每个 LD 叠阵峰值功率为 50 kW,占空比为 15%,LD 叠阵与激光器光轴成 90° 放置,抽运光通过 45° 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,激光介质掺杂原子数分数为 0.6%,其通光面镀 808,1064 nm 的消反膜。

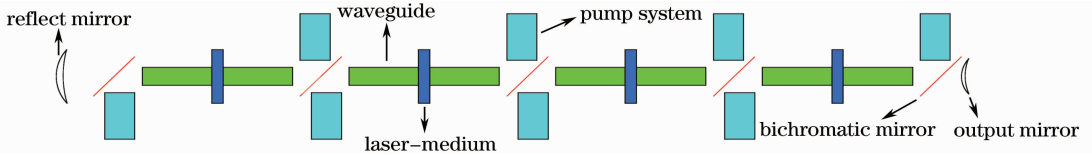


图 2 激光器实验布局

Fig. 2 Schematic diagram of laser

由于抽运均匀性直接影响激光介质的温度分布、应力分布,因此它直接影响到激光器能否实现高光束质量的激光输出以及激光器的输出功率,同时由于 Nd:GGG 介质的热分布是动态变化的,当抽运均匀性较差时会增加激光器光学畸变补偿的难度,因此开展了抽运系统优化设计。抽运耦合系统如图 3 所示,由于单个激光二极管自身结构上的特点导致出射光的远场发散角大、出射光束平行性差及衍射效应较强,且快慢轴两个方向上不对称的发光特性(LD 叠阵快轴发散角 40° ,慢轴发散角 10°)严重影响了激光二极管叠阵的直接应用,首先使用微透镜阵列将激光二极管叠阵快轴发散光准直成平

行光束,采用快轴柱透镜将快轴方向上光束进行压缩,再使用慢轴柱透镜将光束进一步压缩,通过波导匀化实现了对激光介质的外切全口径均匀抽运。波导匀化的基本原理是光束在通过波导后根据发射角的不同被分割成多个子光束,每个子光束经波导反射传输后将充满波导出口端面并相互叠加,从而在波导的输出端得到一个高边缘陡度和高均匀性的耦合光斑,在片状激光器耦合系统中采用的是空心波导,折射率为 1,在设计中主要通过优化波导的长度 L 来实现均匀耦合光斑输出。均匀抽运有利于提高

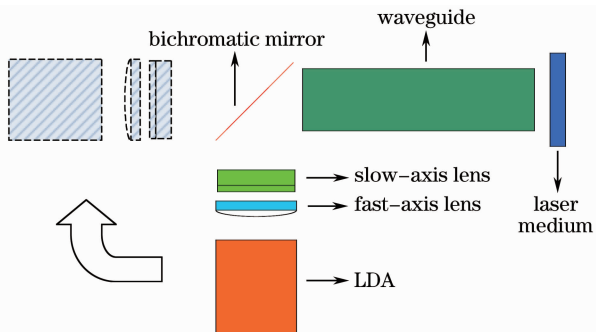


图 3 耦合系统

Fig. 3 Coupling system

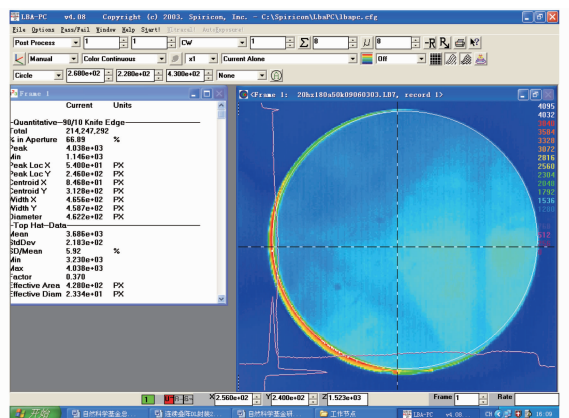


图 4 激光介质的荧光分布

Fig. 4 Fluorescence-distribution of laser medium

激光器的输出功率和光束质量^[10],减小介质内部的温度梯度和应力的影响^[11],降低介质因应力引起的断裂风险。

图4为抽运光均匀加载的荧光分布图,荧光分布比较均匀,均匀性为94%,对下一步开展实验具有重要意义。

4 实验结果

4.1 介质温度测量

温度分布的不均匀会导致介质产生应力,严重时会引起介质断裂,为使晶体安全运行,测量介质温

度分布就十分必要。实验中测量了加载时晶体的温度分布,使用红外热像仪测量了介质表面的温度分布(红外热像仪的测温范围为50℃~150℃,精度为±2℃),外循环水温25℃,加载电流为180A,脉宽为300μs,重复频率为100~500Hz,抽运时间2s,实验结果如表2所示。

对比表1和表2温度分布数据可以看出,抽运光在最大功率加载时,晶体的最高温度在330K左右,模拟结果得到了验证,温度分布均匀性优于95%均方根(RMS)值,大大降低了介质断裂的风险。

表2 Nd:GGG晶体的表面温度(抽运时间2s)

Table 2 Temperature of Nd:GGG surface (pump time is 2 s)

Electric current /A	Frequency /Hz	Highest temperature /K	Temperature difference /K	Average temperature /K	RMS
180	100	307.7	5.6	301.2	1.0
180	200	310.3	9.2	302.0	1.8
180	300	315.7	13.4	304.1	2.8
180	400	321.6	18.2	305.5	3.7
180	500	328.3	25.1	307.0	4.8

4.2 波前畸变测量

介质的均匀温度分布会减小介质热致波前畸变,而波前畸变减小能提高激光的光束质量,实验中为了评价激光介质热致波前畸变随连续工作时间的

变化情况,采用哈特曼对抽运加载下激光介质的透射波前进行了测量,加载电流为180A,脉宽为300μs,重复频率为100~500Hz,结果见表3。

表3 热致波前畸变与抽运频率的对应关系(抽运时间2s)

Table 3 Thermal wavefront distribution versus pumped frequency (pump time is 2 s)

Electric current /A	Frequency /Hz	Temporal pulsewidth /μs	Wavefront distortion RMS /μm	Wavefront distortion RMS (μm, eliminate slope)	Wavefront distortion RMS (μm, eliminate slope and out-of-focus)
180	100	300	0.27	0.26	0.23
180	200	300	0.32	0.28	0.25
180	300	300	0.375	0.30	0.28
180	400	300	0.45	0.35	0.32
180	500	300	0.47	0.375	0.35

当占空比为15%时,热致波前畸变随时间的变化关系如图5所示,实验结果显示RMS值在最初的0.5s内小于0.3μm,根据经验公式^[12]判断如果采用4片介质串接可实现优于6倍衍射极限的激光输出。

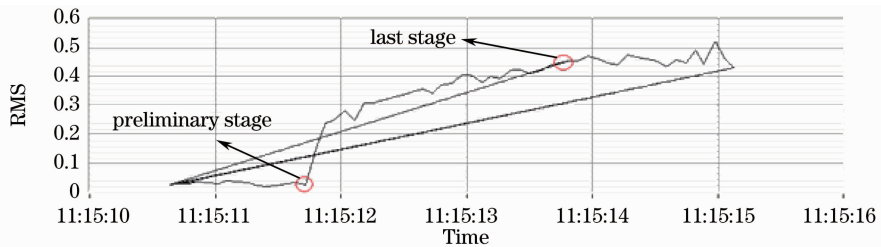


图5 热致波前畸变随时间的变化(抽运时间2s)

Fig. 5 Thermal wavefront distribution versus time (pump time is 2 s)

4.3 非稳腔实验

在上述实验的基础上开展非稳腔的实验,脉宽

为300μs,抽运重复频率500Hz,此时占空比为15%,测量得到平均功率大于10kW的激光输出,

初始阶段平均光束质量为 5.84 倍衍射极限(未去除低阶相差)。由于 Nd:GGG 晶体本身静态透射波前畸变为 RMS 值 $0.15\sim 0.20\ \mu\text{m}$, 在空腔中加入 4 片介质后, 不加载时使用种子光扩束穿过谐振腔后, 测量光束质量为 5.35 倍衍射极限。随着工作时间的增加, 热透镜效应越来越严重, 使得在光斑的中心附

近强度迅速变大, 从而提高了能量提取效率, 但是当热透镜效应随着工作时间的延长变得非常严重时, 输出效率将大大降低, 同时光束质量迅速下降^[13]。由于输出光斑带有严重的球差, 随着废热的持续积累, 光斑在焦点处会迅速发散, 导致光束质量快速下降。实验结果如图 6 所示。

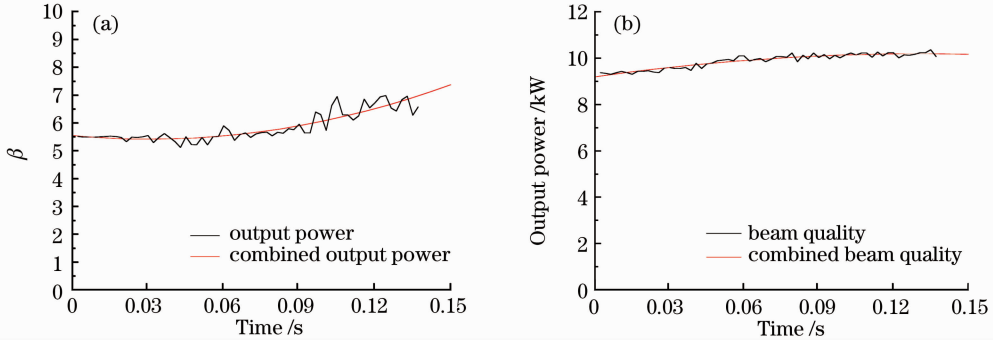


图 6 激光器(a)光束质量及(b)输出功率实验结果

Fig. 6 Experimental result of (a) beam quality and (b) output power

5 结 论

利用 Nd:GGG 介质开展了非稳腔的优化设计研究, 对耦合系统进行优化设计使抽运均匀性提高到 94% 的水平; 建立了热力学计算模型, 实验测量结果热力学计算模型是比较可靠的; 建立了有源非稳腔的计算模型, 并对非稳腔进行了优化设计, 选取了非稳腔的最佳参数, 实验实现了输出功率大于 10 kW、光束质量小于 6 倍衍射极限的激光输出。

参 考 文 献

- 1 C. T. Walters, J. L. Dulaney, B. E. Campbell *et al.*. Nd-glass burst laser with kW average power output[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(2): 293~299
- 2 C. B. Dane, L. Flath, M. Rotter *et al.*. Army solid-state laser program: design, operation, and mission analysis for heat-capacity laser [C]. 14th Annual Solid-State and Diode Laser Technology Review, 2001, UCRL-JC-143964
- 3 M. D. Rotter, C. B. Dane, S. Fochs *et al.*. Solid-state heat capacity lasers: good candidates for the marketplace [J]. *Photonics Spectra*, 2004, **38**(8): 44~52
- 4 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser[J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4): 605~625
- 5 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. 300 W diode-pumped solid state heat capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 49~52
蔡震, 胡浩, 蒋建锋等. 二极管泵浦 300 W 热容固体激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 49~52
- 6 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Kilowatt class laser diodes-pumped solid state heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 153~156
蔡震, 胡浩, 蒋建锋等. 千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 153~156

- 7 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. 高效率高功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 8 Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin *et al.*. Influences of heat-dissipation methods on thermal distortion of laser rods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 351~357
宋小鹿, 过振, 李兵斌等. 散热方式对激光晶体热畸变效应的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 351~357
- 9 Cai Zhen, Jiang Jianfeng, Hu Hao *et al.*. Kilowatt high power heat capacity laser with 3 times diffraction limit [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2266~2271
蔡震, 蒋建锋, 胡浩等. 千瓦级 3 倍衍射极限的高功率热容激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2266~2271
- 10 Qi Yan, Gong Wupeng, Li Huan *et al.*. Effects of aberrations of coupling systems on the end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 47~50
亓岩, 宫武鹏, 李欢等. 耦合系统的成像质量对端面抽运固体激光器的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 47~50
- 11 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
- 12 Li Xinyang, Xian Hao, Wang Chunhong *et al.*. Relationship between beam quality factor β and wavefront error [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 798~802
李新阳, 鲜浩, 王春鸿等. 波相差与光束质量 β 因子的关系 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 798~802
- 13 Wang Xiaobo, Xu Xiaojun, Lu Qisheng. Effect of thermally induced change of stimulated emission cross section in heat capacity lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 43~46
汪晓波, 许晓军, 陆启生. 热容激光器中热致受激发射截面改变对输出功率的影响 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 43~46