

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0089-04

热容模式下激光介质工作条件的优化

蔡 震^{1,2}, 胡 浩¹, 蒋建锋¹, 涂 波¹, 周唐建¹, 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中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

摘要 初步开展了热容激光器激光介质工作条件的优化研究, 数值模拟了不同吸收厚度、不同掺杂浓度下介质内部温度分布和应力分布, 从极小化激光介质内部温度梯度、应力梯度的角度出发给出了激光介质参量的优化原则, 并进一步对激光介质的抽运耦合方式进行了分析。最后简单介绍了在实验研究中取得的最新进展。

关键词 激光技术; 固体激光器; 激光二极管; 热容; 温度分布; 应力分布

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

Operation Condition Optimization of Laser Media Heat-Capacity Laser

CAI Zhen^{1,2}, HU Hao¹, JIANG Jian-feng¹, TU Bo¹, ZHOU Tang-jian¹,
TANG Chun¹, ZHANG Kai¹

(¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract In order to optimize the operation condition of laser media employed in the heat capacity laser, numerical simulation about temperature distribution and stress distribution within the media are carried out according to different thickness and doping concentration. The principle to optimize parameters of lasing media have been gotten by minimizing the gradient of temperature and stress. Then the pumping coupling way of laser media is analyzed and some current progress in heat capacity laser system is introduced.

Key words laser technique; solid-state laser; diode laser; heat-capacity; thermal distribution; stress distribution

1 引 言

理想条件下, 热容激光器工作时介质内部不存在显著的温差、热应力, 并且由于断裂极限带来的限制得到了缓解, 因此可实现高功率、高光束质量的激光输出^[1~4]。然而在实际工作条件下要实现工作介质内部温度梯度、应力梯度的极小化, 不仅要求抽运源能提供均匀的激励, 并且对抽运方式及工作介质的掺杂浓度、几何尺寸、连续工作时间都有着相应的参量匹配要求, 因此工作中必须对激光介质的工作条件做出相应的优化。针对上述问题, 本文进行了初步的理论研究, 数值模拟了激光介质在不同匹配参量条件下的温度场、应力场分布, 确定了工作物质的优化运行条件。

2 激光介质热力学特性的计算模型

图 1 为热容激光器示意图, 厚为 l 的激光介质

置于绝热装置中, 激光二极管阵列(LDA)分别从两端抽运。 M_1 为全反镜, M_2 为输出镜。

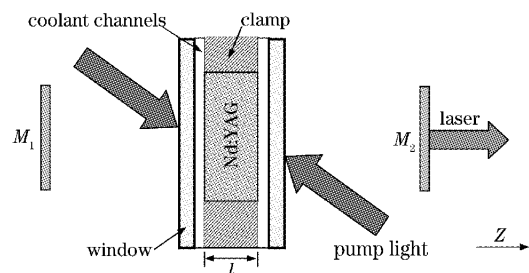


图 1 激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser

热力学模型建立中假设激光介质与外界不存在热交换, 属于绝热情况, 抽运光在激光介质内沿纵向分布的热沉积作为热量的唯一来源。

由于斯托克斯效率及无辐射跃迁等原因, 激光介质吸收的抽运能量不能全部作为激光输出, 其中

基金项目: 国家 863 计划和中国工程物理研究院重大基金资助课题。

作者简介: 蔡 震(1970—), 男, 中国工程物理研究院应用电子学研究所博士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术研究。E-mail: caizhen513@sohu.com

约百分之三十的能量转化为废热沉积在激光介质中。激光介质的瞬态导热微分方程可描述为^[5]

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

式中 T 为介质的瞬态温度场; t 为时间; κ 为介质的热导率; q_v 为介质沿纵向不同位置微元段的热沉积功率密度, 受到抽运光沿 z 方向的热沉积功率和抽运区的影响, q_v 在介质内部的分布并不一致; ρ 为材料密度; $C_p(T)$ 为热容值。

考虑如图 1 所示的抽运方式, 利用激光二极管抽运激光器的吸收效率公式, 可以得到纵向 z 不同位置厚为 dz 的微元段的热沉积功率

$$dP_z(z) = \frac{P_{\text{pump}}}{2} \{ \exp(-\alpha_D z) + \exp[-\alpha_D(l-z-dz)] \} \times [1 - \exp(-\alpha_D dz)] h, \quad (2)$$

其中 α_D 为吸收系数, h 为产热比, P_{pump} 为传输到介质端面的总抽运功率。

激光介质的热容值 $C_p(T)$, 热导率 $\kappa(T)$ 都是温度的函数, 可分别表示为

$$\begin{cases} C_p(T) = \frac{3nR(\Theta_D/T)^2 \exp(\Theta_D/T)}{M_{\text{mol}} [\exp(\Theta_D/T) - 1]^2}, \\ \kappa(T) = \frac{1.9 \times 10^8}{[\ln(5.33 \times T)]^{7.14}} - \frac{33100}{T}, \end{cases} \quad (3)$$

式中 Θ_D 为德拜温度, R 为气体常数, n 为晶体分子式含有的原子个数, M_{mol} 为摩尔质量。

由于在热容工作模式下激光介质存在的是一个随时间变化的瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$, 因此应力场也是时间变化的函数。根据胡克定律求应力分量, 可得^[6]:

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial i \partial j} - \Delta \phi \delta_{ij} \right) + \rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \delta_{ij}, \quad (4)$$

式中 G 为剪切弹性模量, $2G = E/(1+\nu)$, E 为弹性模量, ν 为介质的泊松比; δ_{ij} 是克鲁尼彻-迪尔塔符号, 当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$, 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$ (式中 $i, j = x, y, z$); ϕ 为热弹性位移势, 对于动态热应力, 关于 ϕ 的泊松方程表示为^[6]

$$\Delta \phi - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha T, \quad (5)$$

式中 α 为介质的热膨胀系数。

3 不同厚度、不同掺杂浓度介质热力学数值模拟

激光介质内部的温度分布、应力分布与激光介质的能量吸收过程直接相关, 要实现温度分布、应力

分布的极小化首先应该保证激光介质能量吸收过程是均匀的。在均匀抽运的前提下将平均抽运功率面密度归一化, 根据公式(2)计算了不同厚度、不同掺杂浓度下激光介质内部的热沉积。图 2(a), (b) 分别为当介质厚度为 10 mm, 18 mm 时不同掺杂浓度下介质内部沿纵向热沉积功率分布图。

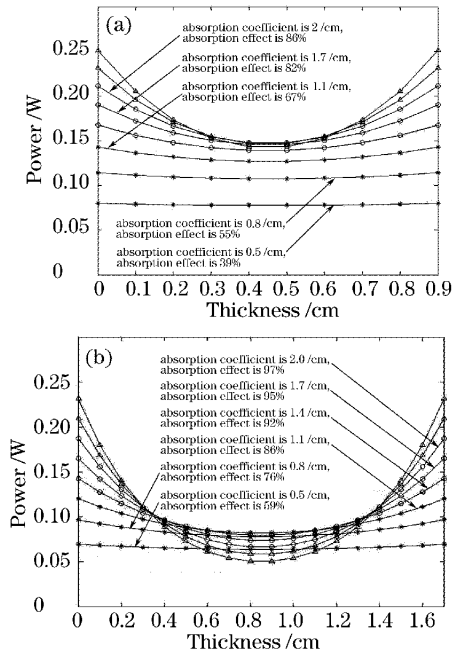


图 2 介质厚度为 10 mm(a) 和 18 mm(b) 时沿纵向热沉积功率分布

Fig. 2 Longitudinal thermal distribution of 10 mm (a) and 18 mm (b) thick media

从图中可以看出在厚度一定的情况下, 随着掺杂浓度的增加(吸收效率增加)介质内部热沉积的均匀性越差, 并且在相同的抽运功率密度及吸收效率下, 当材料越厚时沿纵向的吸收不均匀性就越强, 这意味着介质内部沿纵向的应力就越大。图 3(a), (b) 为弱约束状态下当吸收能量相同时两种厚度介质的应力分布(平均抽运面密度均为 4 kW/cm^2), 可以看出, 当吸收效率相同时, 在弱约束条件下材料越薄对应力场的分布越有利, 但显然同样时间里薄材料的温升要高些。因此在保证连续出光的时间范围内热容激光器不因介质温度升高造成输出功率大幅下降的前提下, 材料越薄越有利于激光器获得高质量光束的输出, 也有利于减少应力破坏带来的威胁, 另外从冷却的角度上看, 材料越薄导热阻也就越小, 对出光间隔期的冷却也越有利。

在厚度一定的情况下, 当介质的掺杂浓度越低对于吸收的均匀化越有利, 但这意味着要牺牲能量

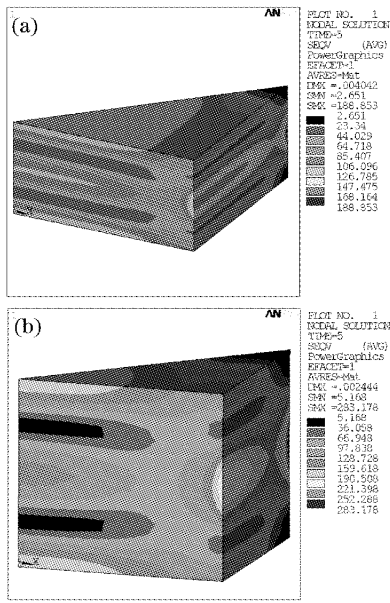


图 3 10 mm (a)和 18 mm (b)介质的应力分布
Fig. 3 Stress distribution of 10 mm (a) and 18 mm (b) thick media

的吸收效率,显然是不合适的。通过进一步分析发现,采取双通的抽运耦合方式可以大大缓解这一矛盾,设计中使单通吸收 80%左右的能量,再通过反射二次吸收使整个吸收效率达到 96%左右,图 4(a)为抽运功率密度相同状态下双通吸收 96%时介质内部的温度分布,图 4(b)为单通吸收 96%时介质内部的温度分布,图 5(a)为抽运功率密度相同状态下双通吸收 96%时介质内部的应力分布,图 5(b)为单

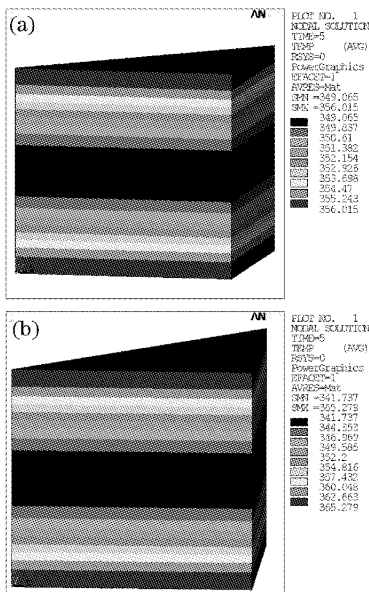


图 4 双通抽运(a)和单通抽运(b)的温度分布
Fig. 4 Temperature distribution two-pass pumping (a) and one-pass pumping (b)

通吸收 96%时介质内部的应力分布,比较两种情况可以看到,与单通耦合方式相比,采用双通耦合后介质内部温差减小、最高温度降低,同时双通耦合时介质内部的最大应力不到单通耦合时介质内部最大应力的三分之一,因此采取双通的耦合方式不仅可改善介质内部的温度分布、应力,也可有效降低介质内部最高温度和应力,这无论对于获得高光束质量的激光输出及提高热容激光器的能量转换效率都是十分有利的。

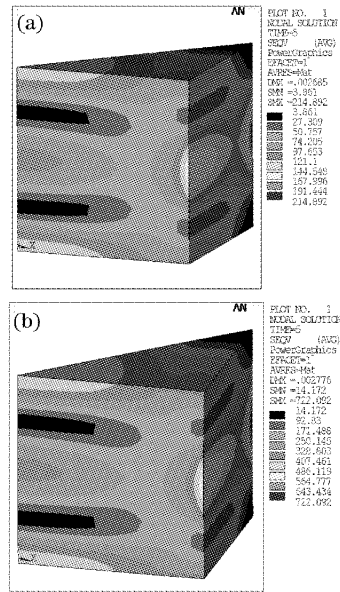


图 5 双通抽运(a)和单通抽运(b)的应力分布
Fig. 5 Stress distribution two-pass pumping (a) and one-pumping (b)

根据数值模拟的结果可以进一步推断出如采用四通、八通的耦合方式对于改善激光介质的温度分布、应力分布会更加有利,然而这会大大增加光学设计及激光器光路布局的复杂程度,降低热容激光器的可靠性,因此不是一个合理的选择。

4 激光介质工作参量的确定原则

采用双通的抽运耦合方式对于改善激光介质的温度分布、应力分布是有利的。然而对于激光介质本身而言,如何最终确定其厚度仍然需要展开进一步的分析(在确定厚度后可根据单通吸收 80%的能量进一步确定出材料的吸收系数和掺杂浓度)。根据前期对激光介质输出特性的研究成果,我们知道当激光介质的工作温度控制在 400 K 以内时,由于粒子数玻尔兹曼分布造成的热容激光器输出功率下降可以忽略。根据前面的分析结果可知,在单通吸收效率及通光口径一定的情况下片面增加介质的厚

度会造成应力分布状况的恶化,因此介质的厚度应控制在设计工作时间内使介质的温度接近 400 K。

5 激光二极管抽运固体热容激光器实验研究最新进展

热容激光器实验布局如图 1 所示,利用两个 220 Bar 激光二极管面阵成 30° 角对称布置对 1 个厚度为 18 mm,直径为 50 mm 的 Nd:GGG 片进行抽运,连续抽运时间为 2 s,耦合方式采用微透镜加正交柱透镜组的结构,耦合光斑尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,激光介质的掺杂浓度为 0.6%。谐振腔采用腔长为 76 cm 的平凹腔,耦合输出镜的曲率半径为 5 m,反射率为 80%,实验测量了激光介质内部的增益分布如图 6 所示。图 7 为在不同占空比状态下激光器的输出功率变化曲线,当占空比为 15%、平均抽运功率为 7400 W 时获得了 1530 W 的激光输出,图 8 为不同重复频率下的远场输出光斑。计算结果表明在连续出光时间段内激光器光束质量保持相对稳定, β 值的变化量小于 5%,这说明在出光时间段内激光介质的热效应没有产生剧变,这对于进一步开展光束质量控制技术研究是十分有利的。

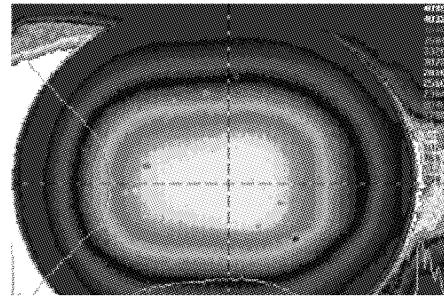


图 6 激光介质内部的增益分布
Fig. 6 Gain distribution of laser media

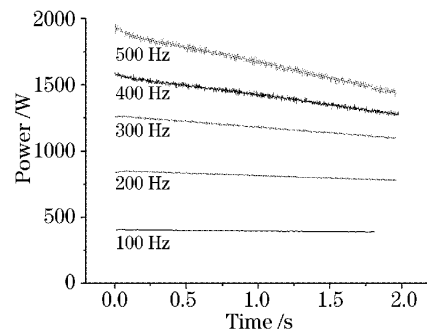


图 7 单模块在不同重复频率下的输出功率
Fig. 7 Output power of single model under different frequency

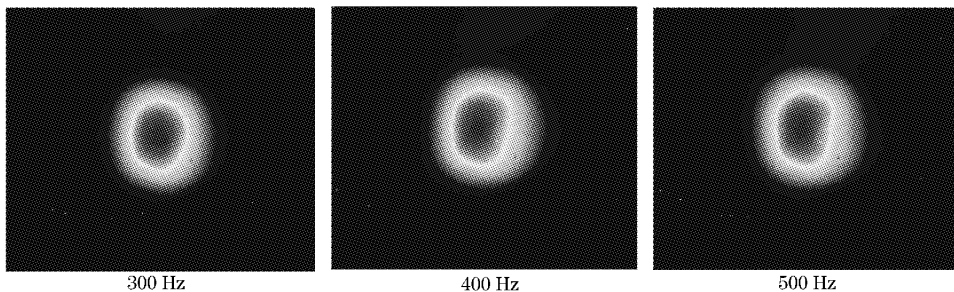


图 8 不同重复频率下激光器的输出光束
Fig. 8 Output light spot under different frequency

在上述实验的基础上进一步开展了定标放大实验研究,验证了随工作介质几何尺寸增大的功率可定标放大性(当平均抽运功率为 1250 W 时,在直径为 28 mm 的激光介质上获得了 350 W 的激光输出),同时开展了多片介质串接的定标放大实验研究,利用两片厚度为 18 mm,直径为 50 mm 的 Nd:GGG 片串接定标放大实现了 3500 W 功率激光输出,光-光转换效率大于 23%。

参 考 文 献

- 1 M. D. Rotter, C. Brent Dane. Solid-state Heat-capacity-laser Review [C]. SSDLTR 2002 Technical Digest. 21~25
- 2 Wang Weiming, Yao Zhenyu, Pang Yu *et al.*. Study on DPL technology of hectowatt green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(suppl): 5~7
- 3 王为民,姚震宇,庞毓等. 百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(增刊): 5~7
- 3 Tang Chun, Tu Bo, Jiang Jianfeng *et al.*. High power Nd:YAG thin disk laser pumped by 2D-stacks diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(suppl): 38~40
- 4 唐淳,涂波,蒋建峰等. 二维阵列二极管抽运的高功率 Nd:YAG 薄片激光器 [J]. *中国激光*, 2004, 31(增刊): 38~40
- 4 Brent Dane C. World's most powerful solid-state laser. www.llnl.gov. 2002
- 5 Zhao Zhennan. Heat Rransfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002
- 5 赵镇南. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- 6 Guo Tingwei, Li Anding transl. Thermal Stress [M]. Beijing: Science Press, 1977
- 6 竹内洋一郎. 热应力 [M]. 郭廷玮 李安定译. 北京: 科学出版社, 1977