

文章编号: 1001-3806(2004)03-0271-04

## 固态激光介质的热效应与光泵浦极限研究

高俊超, 朱长虹, 李正佳

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 计算了固体激光介质的光泵浦功率极限, 综述了现有主要的解决热效应的方法, 提出了减小热效应、提高介质泵浦功率密度的措施。

关键词: 光泵浦极限; 热效应; Nd:YAG 固体激光器; 光纤激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

### Study on the thermal effect and the optical pump limit about solid-state laser medium

GAO Jun-chao, ZHU Chang-hong, LI Zheng-jia

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper, the pump limit has been calculated, and the methods that resolve the thermal effect have been summarized. At last, a new method to solve thermal effect has been brought forward.

**Key words:** pump limit; thermal lens; Nd:YAG solid state laser; fiber laser

#### 引 言

众所周知, 激光介质通常为固态、气态和液态, 在泵浦作用下不可避免的产生热效应, 影响了激光输出功率的提高, 降低了光束质量。因此, 减少热效应的负面影响、提高激光的输出功率和光束质量一直是激光器件应用研究的重要课题。对于气态和液态激光介质, 通常采用循环流动、扩散冷却等措施(例如横流、纵流 CO<sub>2</sub> 激光器等), 获得了良好的效果。而对于光泵浦下的晶体、玻璃等固态激光介质不能采用气态和液态激光器的冷却方式, 只能对介质表面冷却, 从而在介质内部形成极高的温度梯度和热应力, 严重制约了固态激光介质泵浦功率密度的提高, 降低了光束质量和输出功率。本文中对固体激光介质的热效应和光泵浦极限进行了研究, 并综述了当前解决热效应的重要的方法, 提出了一些提高光泵浦功率密度和改善光束质量的措施。

#### 1 固态激光介质光泵浦极限

激光器的输出功率与泵浦功率大小直接相关,

作者简介: 高俊超(1977), 男, 硕士研究生, 现从事固体激光及其应用和激光医疗方面的研究工作。

E-mail: al199@163.com

收稿日期: 2003-06-24; 收到修改稿日期: 2003-08-27

而泵浦功率的大小又受限于介质的极限泵浦功率密度。当不考虑热效应的影响时, 介质中所有掺杂离子被泵浦至上能级时就达到了介质的泵浦功率密度吸收极限, 这一极限泵浦功率密度  $P_0$  仅仅与介质中粒子的掺杂浓度  $\rho$ 、泵浦光子的能量  $e$  和能级的寿命  $\tau$  有关。这种关系由以下关系式给出:

$$P_0 = \rho e / \tau \quad (1)$$

实际上由于量子亏损热和激光介质吸收了位于泵浦吸收带之外的红外和紫外光谱等原因<sup>[1]</sup>, 大量的泵浦能量转化为热量。而介质的导热率是个有限值, 于是在热量传导的过程中, 激光介质中形成了温度梯度, 产生了热应力, 其中热应力过大就有可能使介质炸裂。所以在这种情况下, 介质的极限泵浦功率密度  $P_{\max}$  受限于材料能够承受的最大热功率密度  $Q_{\max}$  和介质中泵浦光转化为热量的比例  $\eta$  即:

$$P_{\max} = Q_{\max} / \eta \quad (2)$$

式中,  $\eta = \frac{\text{介质中产生的热量}}{\text{位于介质泵浦吸收带的光能量}} \quad (3)$

下面以常用的固态激光介质 Nd:YAG 为例计算其极限功率密度  $P_0$  和  $P_{\max}$ 。

如果以 Nd 离子的典型掺杂原子数分数 1% 作为计算标准, Nd:YAG 介质的密度为  $4.56\text{g}/\text{cm}^3$ , 计算知 Nd 离子密度为  $c = 1.38 \times 10^{20}$  个/ $\text{cm}^3$ 。根据 Nd:YAG 泵浦吸收带实际情况, 因为每个 808nm 泵浦

光子能量为  $e = 2.46 \times 10^{-19} \text{ J}$ , 又由于 Nd 离子的上能级寿命为  $\tau = 230 \mu\text{s}$ , 所以在不考虑热效应情况下, 由(1)式可求得 Nd:YAG 激光介质吸收 808nm 泵浦光的极限功率密度为  $P_0 = 1.476 \times 10^5 \text{ W/cm}^3$ 。

对于高平均功率运转的棒状激光介质的激光器, 采用连续泵浦, 或者高重复频率泵浦时, 由文献[1]中热应力表达式得到棒状介质最大热应力为:

$$\sigma_{\text{rod, max}} = \frac{Q}{8M_s} b^2 \quad (4)$$

式中,  $M_s = (1 - \nu)K / \alpha E$ ,  $\nu$  为泊松比,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $E$  为杨氏模量,  $Q$  为热功率密度,  $K$  为导热系数,  $b$  为棒的半径。可见热功率密度越高, 棒的最大热应力也越大。当最大热应力达到 Nd:YAG 的材料断裂极限应力时, 棒状激光介质中的热功率密度  $Q$  也达到其所能承受的极限, 这一极限热功率密度为:

$$Q_{\text{max}} = \frac{8M_s}{b^2} [\sigma] \quad (5)$$

把 Nd:YAG 相关参数:  $K = 0.14 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{C}$ ;  $\nu = 0.25$ ;  $\alpha = 7.5 \times 10^{-6} / \text{C}$ ;  $E = 3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ ;  $[\sigma] = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  代入(5)式, 并且取  $b = 3 \text{ cm}$ , 可以求得  $Q_{\text{max}} = 1.037 \times 10^4 \text{ W/cm}^3$ , 这就是由于材料断裂应力极限限制所能达到的最大热功率密度。

采用 808nm 的光源泵浦时, 介质中的热量主要由量子亏损产生, 即激光介质每吸收 1 个 808nm 的光子, 产生一个 1064nm 的激发光子, 期间无辐射跃迁的能量损失全部转化为热量, 由(3)式可求得  $\eta_{808} = 0.24$ 。对于闪光灯或弧光灯泵浦, 介质中热量除了量子亏损热外, 主要由分布在紫外和红外光谱带的成分被基质吸收后转化而来。闪光灯的泵浦光中, 808nm 光的比重约为 30%, 其它频率的光占 70% [2], 由(3)式求得  $\eta_{\text{flash}} = 2.57$ 。于是可利用(2)式由介质中最大热功率密度求得材料断裂应力极限所对应的 808nm 光子的功率密度极限  $P_{\text{max}}$ 。对于闪光灯泵浦其值为  $P_{\text{max, flash}} = 0.404 \times 10^4 \text{ W/cm}^3$ 。对于激光二极管泵浦其值为  $P_{\text{max, diode}} = 4.32 \times 10^4 \text{ W/cm}^3$ 。

## 2 提高介质中光泵浦功率密度极限的方法和措施

比较 1 节中的  $P_0 = 1.476 \times 10^5 \text{ W/cm}^3$ ,  $P_{\text{max, flash}} = 0.404 \times 10^4 \text{ W/cm}^3$  和  $P_{\text{max, 808}} = 4.32 \times 10^4 \text{ W/cm}^3$ , 可以看出由于材料断裂应力极限的限制, 介质中 808nm 光子功率密度没能达到不考虑热效应时介质可以吸收的 808nm 光子功率密度的极限  $P_0$ , 事

实上也正是受材料断裂应力极限的限制, 泵浦功率才能达到其应有的高度。考查(2)式可知, 只要能够提高  $Q_{\text{max}}$  和减小  $\eta$  项就可提高  $P_{\text{max}}$  值。由于激光二极管的单色性好, 所以, 采用激光二极管泵浦是降低  $\eta$  因子比较有效的解决方法。而且由于激光二极管泵浦光的光谱结构与介质的泵浦吸收带匹配性好, 泵浦效率高, 故可以在不降低输出功率的情况下, 掺杂较低原子数分数的 Nd 离子, 如 0.5%, 这样就可以提高其晶体光学均匀性, 从而提高激光光束质量。因此, 采用激光二极管泵浦是减小热效应, 提高泵浦功率密度, 获得高功率与高光束质量输出的一个有效方法。下面主要就提高  $Q_{\text{max}}$  的方法加以综述。

### 2.1 几何构型对提高 $Q_{\text{max}}$ 的作用

在介质承载热功率密度  $Q_{\text{max}}$  的能力方面, 管状固体激光器和板条固体激光器(见图 1)要优于棒状固体激光器。管状固体激光器的概念在 20 世纪 70 年代提出, 其物理思想很简单, 主要是采用内、外壁同时冷却, 增大冷却面积, 改善冷却效果, 减少热程, 从而减小了热应力, 使管状激光介质能承受更大的热功率密度。

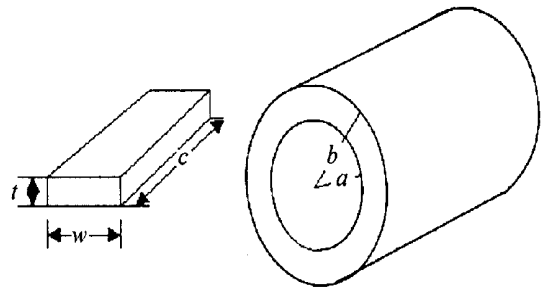


图 1 板条和管状几何构型的激光介质

板状激光介质的基本物理思想是利用其几何对称性和之字形光路。当实现了均匀面泵浦和均匀面冷却, 激光在介质内以之字形光路全反射式传输时, 光束的不同部分在厚度方向上都以同样的方式经历温度分布的各个区域。这样, 在理想情况下, 厚度方向上的一阶热效应得以消除, 热透镜效应也就不存在了, 板条激光介质仅仅受材料应力断裂极限的限制 [1, 3]。而板条激光介质在保证一定的宽厚比时, 冷却效果要好于棒状激光介质, 所以其极限热功率密度就高于棒状激光介质。

由文献[4]中所得的公式, 同时考虑激光器光轴的“热稳性” [4], 即考虑  $T_o = T_i$ , 可以得到管状激光介质内部最大热应力为:

$$\sigma_{\text{tube, max}} = \frac{Q(b^2 - a^2)\alpha E}{16(1 - \nu)K} \times$$

$$\left[ \frac{4b^2}{b^2 - a^2} - \frac{2\ln(b/a) + 1}{\ln \sqrt{b/a}} + 2 \right] \quad (6)$$

式中,  $a$  为管的内径,  $b$  为管的外径, 如图 2 所示。

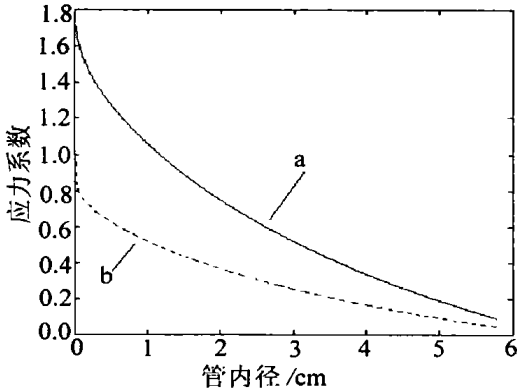


图 2 不同几何构型激光器最大热应力比值变化曲线

a—管状与板条介质最大热应力比值 b—管状与棒状介质最大热应力比值

板条中最大热应力为<sup>[4]</sup>:

$$\sigma_{\text{slab, max}} = Qt^2/12M_s \quad (7)$$

式中,  $t$  为板条的厚度。把(4)式、(6)式和(7)式统一表示为:

$$\sigma_{\text{max}} = cQ\xi \quad (8)$$

式中,  $c = s/8\pi M_s$ ,  $s$  为激光介质横截面积。 $\xi$  对于不同几何构型分别表示如下:

$$\xi = \begin{cases} \frac{2b^2}{b^2 - a^2} - \frac{\ln(b/a) + 0.5}{\ln \sqrt{b/a}} + 1 & \text{管状介质} \\ 1 & \text{棒状介质} \\ 2\pi/3m & \text{板条} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $m$  为板条宽厚比  $w/t$ 。

考虑不同几何构型介质的横截面积相等, 介质中热功率密度也相等时, 由于  $\frac{2b^2}{b^2 - a^2} - \frac{\ln(b/a) + 0.5}{\ln \sqrt{b/a}} + 1 < 1$ , 所以由(8)式可知, 管状介质的最大热应力始终小于棒状介质的最大热应力。当  $m > 2$ , 即板条宽厚比大于 2 时,  $2\pi/3m < 1$ , 此时板条的最大热应力也小于板条, 这正是许多文献中给出的结论<sup>[1,3]</sup>。这些关系也可以由图 2 看出。正由于此, 当提高不同几何构型介质中的热功率密度达到介质的材料断裂极限时, 必然有:  $Q_{\text{tube, max}} > Q_{\text{rod, max}}$ ,  $Q_{\text{slab, max}} > Q_{\text{rod, max}}$ 。

## 2.2 减少介质的半径对提高光泵浦功率密度的作用

管状和板条激光器虽然有助于提高介质承受的最大热功率密度, 但是管状激光器的光束质量较差, 板条激光器的效率比较低, 而且管状和板条加工起

来也比较困难, 所以管状和板条激光器的研制和运用受到一定的限制。考察(5)式, 随着棒半径  $b$  的变小,  $Q_{\text{max}}$  变大,  $P_{\text{max}}$  也同时变大, 可见减小棒半径也有助于提高其承受热泵浦功率的能力。当  $b$  足够小时,  $P_{\text{max, flash}}$ ,  $P_{\text{max, diode}}$  就大于  $P_0$ , 这种情况下提高泵浦功率密度即使达到介质吸收极限, 棒也不会炸裂, 这时候制约泵浦功率水平提高的不再是材料断裂应力极限, 而是  $P_0$ ,  $P_0$  的提高仅仅受粒子掺杂浓度的限制。利用  $P_{\text{max}} = P_0$  和  $P_{\text{max}} = Q_{\text{max}}/\eta$  求得晶体介质和玻璃介质的临界半径值见表 1。

表 1 激光介质的临界半径

激光器类型	Nd:YAG 激光器		掺 Nd 玻璃介质激光器	
掺杂浓度/ $\text{cm}^{-3}$	$1.38 \times 10^{20}$	$0.69 \times 10^{20}$	$1.0 \times 10^{20}$	$1.0 \times 10^{19}$
闪光灯泵浦	0.886	1.25	—	—
激光二极管泵浦	1.62	2.29	0.202	0.64

但是为了达到一定的激光模体积, 减小晶体半径的同时, 就要提高晶体的长度, 而晶体太长就降低了激光器结构稳定性, 所以, 减少晶体棒的半径仍然不能从根本上解决问题。玻璃介质也是一种常用的激光介质, 其导热率远远低于晶体介质, 求得的临界半径(见表 1)也小于晶体介质, 可见块状玻璃介质激光器受热效应影响更严重, 故块状玻璃介质的激光器仅仅运行在脉冲状态下。玻璃可以拉制成光纤, 制作成光纤激光器。光纤激光器作为一种波导介质可以拉得很细, 由于其柔软性故不存在结构不稳定的问题, 这样虽然工作介质的横截面变小了, 但是可以通过增加增益介质的长度来获得很大的激光模体积。实际上, 综合考虑阈值、斜率效率和模式匹配等因素使光纤激光器性能最佳时, 仅仅为微米量级<sup>[5]</sup>, 远小于表 1 中的厘米量级, 所以, 光纤激光器提高泵浦功率密度就不受热效应的限制, 从而实现高功率、高光束质量的激光输出。双包层光纤激光器的发明<sup>[6,7]</sup>, 如图 3 所示, 可以极大地提高输出

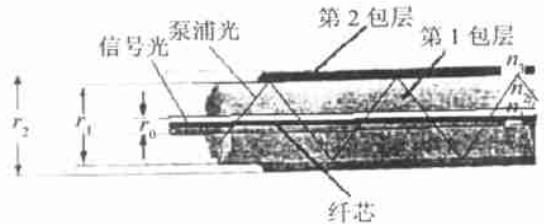


图 3 光纤激光器双包层结构

功率, 现已达到上千瓦的水平, 而这一水平如果要非光纤激光器, 例如 Nd:YAG 激光器来实现的话, 却要采用多棒串接, 热稳定性差, 输出光束质量差。由此

可见, 光纤激光器凭借其受热效应影响小、体积小、结构紧凑、光束质量好、光纤耦合效率高等优势, 必将在医疗、材料加工、通信等领域起到越来越重要的作用。

### 3 讨 论

由于固态激光器特有的特点, 减小热效应的影响一直是一个重要的努力方向。采用单色性较好的激光二极管泵浦, 总是可以提高泵浦效率、减小热效应, 从而提高其泵浦功率密度, 实现高功率、高光束质量输出。从介质几何构型加以改进, 采用散热性较好的管状激光器和板条激光器也可以提高介质中的功率密度。而且管状激光器由于可以采用内部泵浦, 可以获得较高的泵浦效率, 从而提高其总效率。但是管状激光器光束质量较差, 所以, 可以用在对光束质量要求不高, 仅仅需要高功率输出的场合。对于既要求高功率同时要求高光束质量场合, 可以考虑板条激光器。另外, 减小棒的半径也是提高介质中泵浦功率密度, 防止棒炸裂的好方法。只是对于

晶体介质, 减小棒半径受到结构稳定性和激光模体积的限制, 不能太小。而对于玻璃介质, 可以拉制成光纤, 制成光纤激光器, 这样既可以克服热效应, 又可以采用较长的增益介质来增加模体积, 再加上双包层光纤激光器的发明, 从而实现高功率, 高光束质量的激光输出。

### 参 考 文 献

- [1] 吕百达. 固体激光器件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 94~95.
- [2] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 343~344.
- [3] KANE T J, EGGLESTON J M, BYER R L. The slab geometry laser — part II: Thermal effects in a finite slab [J]. IEEE J Q E, 1985, 21(8): 1195~1209.
- [4] 朱长虹, 李正佳. 管状激光介质的热透镜效应 [J]. 激光杂志, 1997, 18(6): 17~21.
- [5] 聂秋华. 光纤激光器和放大器技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997. 219.
- [6] 赵珂. 高功率光纤激光器与放大器 [J]. 光电子技术与信息, 1999, 12(6): 19~23.
- [7] 杨云龙. 千瓦级光纤激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2000, (6): 25~29.

• 简 讯 •

### 敬告作者

根据“美国工程信息公司(EI)数据库”的要求, 请作者在投稿时注意:

1. 为了方便联系, 请提供确切的通信地址、单位名称、部门、电话、E-mail 等信息。

2. 应加强对摘要的撰写! 摘要是文章的真正概要, 应该全面、简要: 减少背景类的知识介绍; 不要用修饰语; 不要有实验数据; 不要出现方程、图、表、参考文献、特殊字符等。作者应组织好文章的主要概念并清楚、简要地表达出来, 才能实现摘要应有的作用, 传达重要的可检索信息。

一般的研究性论文其摘要必须包括被报道的研究项目的目的、使用方法、结果和结论, 不应太短; 也不要重复标题中已给出的内容; 不要使用多余的词语, 如“据报道……”, 或“大量的研究表明”; 摘要中不要写作者将来的打算。

对于文献综述, 只需简要说明文章的内容, 而不报道文章中使用的方法及得出的结果。

对于发展现状综述, 除了陈述文章的主题范围外, 还要给出文章得出的结论。

3. 英文摘要相当重要! 最好是中英文一致。原则是平铺直叙。

4. 英文版稿件中应有中文题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、中图分类号。

投稿时请注明“投稿”字样! 谢谢合作!

《激光技术》编辑部