

# LD 侧面抽运 Nd :YAG 陶瓷激光器运转条件下 归一化热参数优化理论及实验研究

朱洪涛<sup>†</sup> 楼祺洪 漆云凤 董景星 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2006 年 2 月 24 日收到 2006 年 3 月 6 日收到修改稿)

考虑激光提取对介质内非辐射跃迁的抑制作用, 建立和完善 LD 侧面抽运 Nd :YAG 陶瓷激光器运转条件下增益介质的发热模型, 通过实验测量激光器斜率效率和增益介质吸收的抽运功率来推导出归一化热参数. 通过归一化热参数, 讨论了影响 Nd :YAG 陶瓷介质内热沉积的主要因素, 研究结果表明: 增益介质内热沉积对激光提取效率、交叠效率以及掺杂浓度的变化比较敏感. 为有效减少热沉积, 对所研究的掺杂原子百分比浓度为 1.0% 的 Nd :YAG 陶瓷多模激光器的输出耦合镜进行优化选择, 激光提取效率提高到 0.905, 归一化热参数降低到 0.474. 研究结果可为进一步研究陶瓷激光器中热效应以及冷却方案设计等提供一定参考.

关键词: 热沉积, 归一化热参数, Nd :YAG 陶瓷

PACC: 4255R, 4260

## 1. 引 言

由于量子亏损、浓度猝灭以及非辐射跃迁等原因, 在激光器运转过程中增益介质内存在热沉积, 而散热又要求对其表面进行冷却, 这两者使增益介质产生不均匀的温度分布. 这种不均匀的温度分布将导致增益介质内产生应力, 当温度梯度导致的应力超过材料的抗张强度时, 增益介质就会出现应力断裂<sup>[1]</sup>. 即使在应力断裂不可能发生的情况下, 由于温度和应力的改变使折射率发生变化, 从而导致激光束畸变<sup>[2-4]</sup>, 光束质量受到严重影响. 因此, 激光介质内的热沉积成为制约固体激光器输出功率的重要因素. 精确的预测增益介质内的热沉积对保证固体激光器安全稳定运转以及冷却方案的设计等是非常重要的. 同时, 对热沉积的定量计算也是进一步研究热效应的基础, 从而为补偿光束畸变提供依据.

国内外对半导体抽运稀土离子的增益介质中的热沉积已经开展了大量研究, 但是多数实验研究都是在无激光提取条件下进行的<sup>[5-8]</sup>. 归一化热参数  $\chi$  被广泛的用来定量研究介质内的热沉积, 其定义为: 热沉积功率与激光上能级存储功率之比. 增益介质内的热沉积通常是通过量热、干涉测量以及热

电偶<sup>[5-7]</sup>等方法来获得. 最近, 二次谐波的热致消偏振<sup>[9]</sup>以及临界猝灭抽运功率<sup>[10, 11]</sup>等方法也用来推导增益介质内的热沉积.

本工作研究激光提取条件下增益介质内的热沉积问题. 根据 Brown<sup>[12]</sup>的研究结果, 我们把激光提取对增益介质内非辐射跃迁的抑制作用引入到发热模型, 通过实验测量激光器斜率效率来推导出激光器运转条件下增益介质内的热沉积. 同时, 通过实验测量增益介质吸收的抽运功率, 并只考虑斯托克斯量子亏损和抽运量子效率, 可以得到激光上能级存储功率. 这样, 我们就能够从实验上得到激光提取条件下 Nd :YAG 陶瓷中的归一化热参数. 通过归一化热参数, 我们进一步研究影响增益介质内热沉积的主要因素: 激光提取效率、交叠效率以及掺杂浓度. 本实验工作中, 通过对激光器的输出耦合镜优化选择, 获得了 62% 的斜率效率, 归一化热参数降低到 0.474.

## 2. 理论分析

### 2.1. 激光提取条件下发热模型

在前期工作<sup>[13]</sup>基础上, 我们在本研究工作中把

<sup>†</sup> E-mail: zhht\_1975@yahoo.com.cn

激光提取对激光介质内非辐射跃迁的抑制作用引入到发热模型中,使得发热模型得到进一步发展和完善.尽管增益介质内的能量转换转移过程是复杂的,但是根据能量守恒定律,增益介质吸收的抽运功率  $P_{ab}$  最终分为三个部分:荧光辐射功率  $P_f$ 、受激辐射功率  $P_{out}$  和增益介质内的热功率  $P_h$ ,它们分别为

$$P_f = \eta_p \eta_{f-withlaser} \eta_b \eta_{average} P_{ab} + \eta_p \eta_{f-nolaser} (1 - \eta_b) \eta_{average} P_{ab}, \quad (1)$$

$$P_{out} = \eta_p \eta_b \eta_l \eta_s P_{ab}, \quad (2)$$

$$P_h = P_{ab} - \eta_p \eta_{f-withlaser} \eta_b \eta_{average} P_{ab} - \eta_p \eta_{f-nolaser} (1 - \eta_b) \eta_{average} P_{ab} - \eta_p \eta_b \eta_l \eta_s P_{ab}, \quad (3)$$

其中,  $\eta_l$  是激光提取效率,定义为受激辐射粒子数与可能激光提取的上能级总粒子数之比;  $\eta_p$  是抽运量子效率,定义为激活离子从抽运带跃迁到激光上能级概率;  $\eta_b$  为光束交叠效率,定义为抽运模与谐振腔模之间交叠的积分;  $\eta_s$  是斯托克斯损失因子,定义为激光光子能量与抽运光子能量之比,即:  $\eta_s = \lambda_p / \lambda_l$  ( $\lambda_l$  是激光辐射波长,  $\lambda_p$  是抽运光波长);  $\eta_{average}$  是平均荧光辐射光子能量与抽运光子能量之比,即:  $\eta_{average} = \lambda_p / \lambda_{average}$  ( $\lambda_{average}$  是平均荧光辐射波长);  $\eta_{f-withlaser}$  是激光提取条件下荧光辐射效率,定义为处于激光上能级  $^4F_{3/2}$  态的  $Nd^{3+}$  通过荧光辐射跃迁到  $^4I_j$  态的概率;  $\eta_{f-nolaser}$  是无激光提取下荧光辐射效率.

根据(3)式,计算热沉积需要知道的物理量有:

$\eta_l, \eta_p, \eta_b, \eta_s, \eta_{average}, \eta_{f-withlaser}$  以及  $\eta_{f-nolaser}$ . 下面将讨论如何获得  $\eta_{f-withlaser}, \eta_{f-nolaser}$  以及  $\eta_l$  其他物理量数值的确定将在后面讨论中给出. 根据 Brown<sup>[12]</sup> 的研究结论, 荧光辐射效率  $\eta_f$ 、激光提取效率  $\eta_l$  和非辐射跃迁效率  $\eta_{non}$  分别为

$$\eta_f = \frac{1}{F(\rho) + 1 + \xi}, \quad (4)$$

$$\eta_l = \frac{\xi}{F(\rho) + 1 + \xi}, \quad (5)$$

$$\eta_{non} = \frac{F(\rho)}{F(\rho) + 1 + \xi}, \quad (6)$$

其中,  $\eta_{non}$  定义为处于激光上能级  $^4F_{3/2}$  态的  $Nd^{3+}$  通过非辐射跃迁(如:浓度猝灭和上转换等过程)最终跃迁回基态的概率;  $\rho$  是  $Nd^{3+}$  的掺杂原子百分比浓度;  $\xi = \varphi / \varphi_s$  是谐振腔内光子密度与饱和光子密度之比. 当  $\xi = 0$  时,  $\eta_f = \eta_{f-nolaser}$ ; 当  $\xi \neq 0$  时,  $\eta_f = \eta_{f-withlaser}$ . 令  $\xi = 0$ , 可以得到:  $F(\rho) = (1 - \eta_{f-nolaser}) / \eta_{f-nolaser}$ . 下面我们将据此给出  $F(\rho)$  的具体表达形式. Lupei 等<sup>[14]</sup>对 Nd:YAG 陶瓷中  $Nd^{3+}$  的  $^4F_{3/2}$  能级的辐射动力学已开展了深入研究. 根据他们的实验研究结果, 在无激光提取条件下荧光辐射效率可表示为  $\eta_{f-nolaser} = 0.98 \exp(-20C_A)$ , 其中  $C_A$  是相对掺杂浓度, 即:  $C_A = \rho / (100 - \rho)$ .  $F(\rho)$  的具体表达式为

$$F(\rho) = 1.02 \exp(20C_A) - 1. \quad (7)$$

如果  $\eta_l$  已知, 就可以根据(5)式计算出  $\xi$ , 进而根据(4)式计算出  $\eta_{f-withlaser}$ . 然而, 激光提取效率  $\eta_l$  不是一个可实验直接测量的物理量. 下面, 我们将建立激光器斜率效率与激光提取效率的关系, 从而通过实验测量激光器斜率效率来计算出激光提取效率.

## 2.2. 斜率效率与激光提取效率的关系

需要指出的是: 在文献[13]所报导的研究工作中, 我们没有考虑激光提取对非辐射跃迁的抑制作用, 而是假定非辐射跃迁效率是不变的. 因而, 根据本文所建立的发热模型, 文献[13]中所建立的斜率效率与激光提取效率的关系将变化为

$$\eta_l \approx \frac{\sigma_s}{\eta_p \eta_b \eta_s}, \quad (8)$$

其中  $\sigma_s$  为激光器斜率效率, 定义为输出功率与吸收的抽运功率关系曲线的斜率.

## 2.3. 归一化热参数

如前所述, 激光上能级存储功率为:  $P_{st} = \eta_p \eta_s P_{ab}$ . 根据本文建立的发热模型, 归一化热参数可表示为

$$\chi = \frac{P_h}{P_{st}} = \frac{1 - \eta_p \eta_{f-withlaser} \eta_b \eta_{average} - \eta_p \eta_{f-nolaser} (1 - \eta_b) \eta_{average} - \eta_p \eta_b \eta_l \eta_s}{\eta_p \eta_s}. \quad (9)$$

此外, 因为相同掺杂浓度的 Nd:YAG 陶瓷和单晶具有极其相似的吸收谱和荧光发射谱<sup>[15]</sup>, 可认为

它们  $Nd^{3+}$  能级结构和抽运量子效率是相同的. 根据实验研究结果, 抽运量子效率和  $Nd^{3+}$  掺杂浓度之间

存在一个简单关系<sup>[12]</sup>:  $\eta_p = 1 - K\rho$ . Fan<sup>[7]</sup>根据掺杂原子百分比浓度为 1.04% 的 Nd:YAG 单晶实验结果计算出  $\eta_p = 0.9$ . 与此相一致, 我们选取  $K = 0.096$ .

### 3. 实验与结果分析

实验装置如图 1(a)所示<sup>[16]</sup>. Nd:YAG 陶瓷棒的掺杂原子百分比浓度为 1.0%, 陶瓷棒长度为 75mm, 直径为 5mm. 陶瓷棒两个端面都镀以 1064nm 减反膜以减少内腔损耗. 平-平谐振腔腔长为 195mm. 为了提高抽运耦合效率以及优化抽运均匀性, 陶瓷棒侧面经过了打磨处理. 激光器后腔镜是 1064nm 的高反平面镜; 可以选择不同透过率的输出耦合镜(1064nm 处的透过率变化范围: 从 10% 到 80%)作为激光器前腔镜. 作为抽运源的半导体激光器工作波长为 808nm. 为了进一步优化抽运的均匀性, 我们使用紧凑的侧面抽运激光头, 其截面示意图如图 1(b)所示. 陶瓷棒被放置在液体冷却管中进行冷却, 冷却水的温度维持在 16°C.

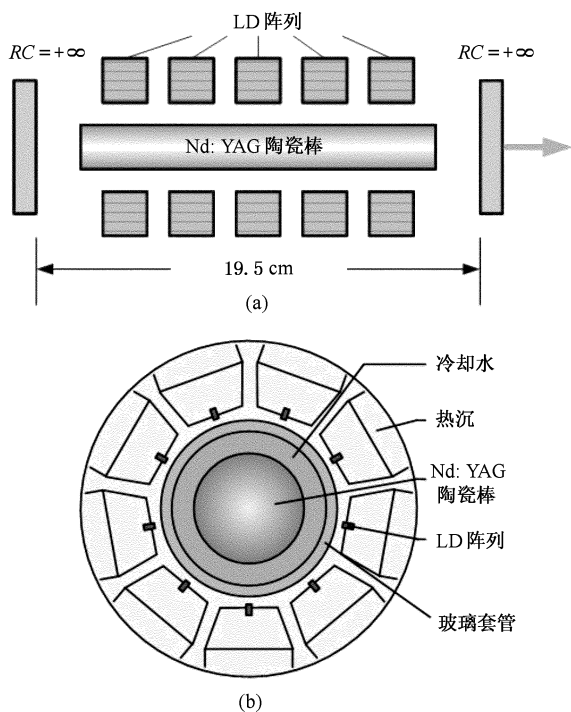


图 1 LD 侧面抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器实验装置示意图(a)及激光头截面示意图(b)

因为激光提取效率对输出耦合镜的透过率变化很敏感<sup>[17]</sup>, 所以通过使用具有不同透过率的输出耦合镜, 我们可以方便的研究激光提取效率对增益介质内热沉积的影响. 图 2 给出了使用不同透过率的

输出耦合镜条件下, 激光器输出功率与吸收抽运功率的依赖关系. 在输出耦合镜透过率分别为 10%, 17%, 22%, 38%, 50%, 70% 和 80% 时, 激光器斜率效率(对吸收的抽运功率)分别为 42%, 52%, 62%, 51%, 47%, 45% 和 37%.

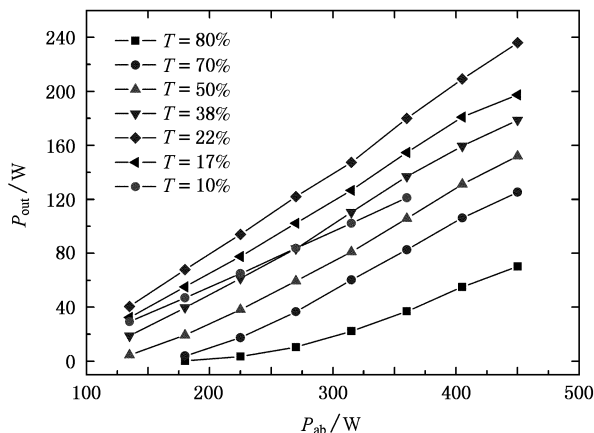


图 2 陶瓷激光器输出功率与吸收的抽运功率变化关系

下面作为一个例子, 在输出耦合镜透过率为 22%, 激光器斜率效率为 62% 的条件下, 我们来推导 Nd:YAG 陶瓷棒内的归一化热参数. 因为本实验装置是多模激光器, 抽运模与谐振腔模之间有一定的空间交叠效率, 因此可以认为  $\eta_b \approx 1$ . 根据 Brown 假设, 掺杂原子百分比浓度为 1.0% 的 Nd:YAG 陶瓷的抽运量子效率  $\eta_p = 0.904$ . 由于本陶瓷激光器的抽运波长为 808nm, 激光输出波长为 1064nm, 所以斯托克斯损失因子为 0.76. 根据(8)式, 当斜率效率为 62% 时, 可计算出激光提取效率为 0.905. 从(7)式, 可以得到  $F(\rho) = 0.248$ , 进一步根据(5)式可以得到  $\xi = 11.9$ . 最后根据(4)式可以得到:  $\eta_{f-w/laser} = 0.076$ ,  $\eta_{f-nolaser} = 0.801$ . 此外, 根据 Nd:YAG 中  $Nd^{3+}$  荧光分之比<sup>[18]</sup>可计算出平均荧光辐射波长为 1.038 $\mu m$ , 因此  $\eta_{average} = 0.778$ . 最后根据(9)式计算出归一化热参数为 0.474.

按上述过程计算不同激光提取效率下的归一化热参数, 计算结果如图 3 所示. 通过对激光器输出耦合镜的优化选择, 当其透过率为 22% 时, 归一化热参数达到最小值.

### 4. 影响热沉积的因素

我们通过归一化热参数分别研究掺杂浓度、光束交叠效率和激光提取效率对 Nd:YAG 陶瓷激光器

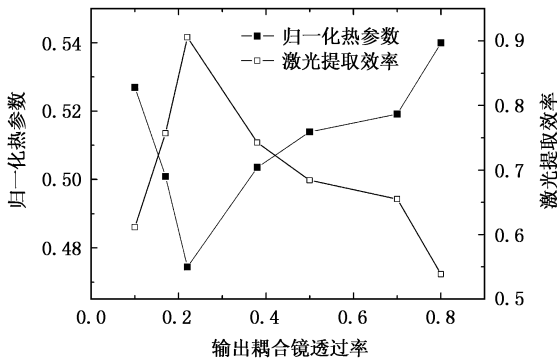


图3 陶瓷激光器归一化热参数及激光提取效率与输出耦合镜透过率的变化关系

中热沉积的影响。

设定光束交叠效率为 1,原子掺杂百分比浓度为 1.0%,讨论激光提取效率对归一化热参数的影响,结果如图 4 所示。图 4 表明,随着激光提取效率的提高,归一化热参数将减少。这意味着在同样的抽运条件下,较高的激光提取效率将有效降低介质内的热沉积。

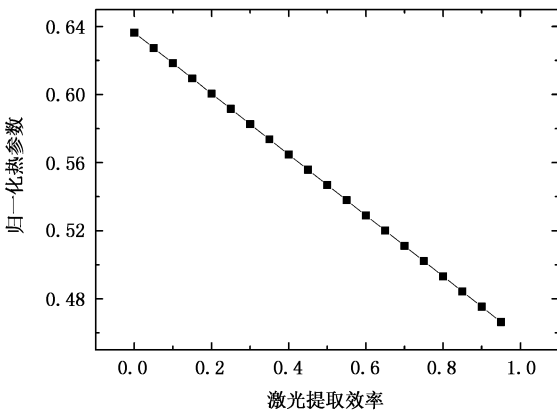


图4 归一化热参数与激光提取效率的变化关系  $\eta_b = 1, \rho = 1.0\%$

归一化热参数与激光提取效率的变化关系可以从发热模型得到解释:在激光提取条件下,介质内非辐射跃迁过程得到了有效的抑制,如图 5 所示。需要指出的是,尽管激光光子能量与抽运光子能量之间的斯托克斯亏损大于平均荧光辐射光子能量与抽运光子能量之间的亏损,但是由于激光提取对非辐射跃迁的抑制作用,随着激光提取效率的提高,增益介质内的热沉积仍然会减少。此外,从图 4 可以知道,当  $\eta_1$  分别为 0,1 时,归一化热参数分别为:0.636,0.457。这分别略小于文献[6]的实验结果 0.7 和理论预期结果 0.53。

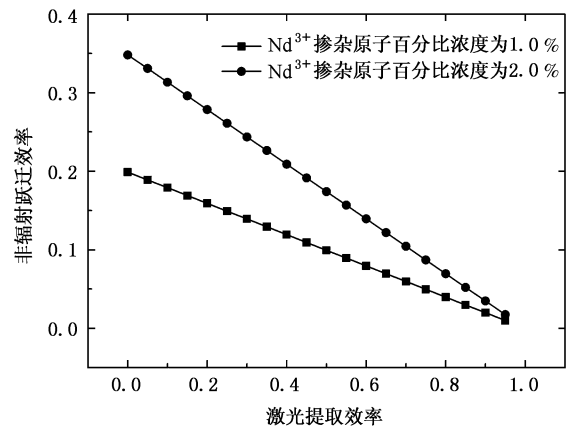


图5 非辐射跃迁效率与激光提取效率的变化关系  $\eta_b = 1, \rho$  分别为 1.0% 2.0%

图 6 给出归一化热参数与  $Nd^{3+}$  掺杂浓度的变化关系。如图所示,随着掺杂浓度的提高,归一化热

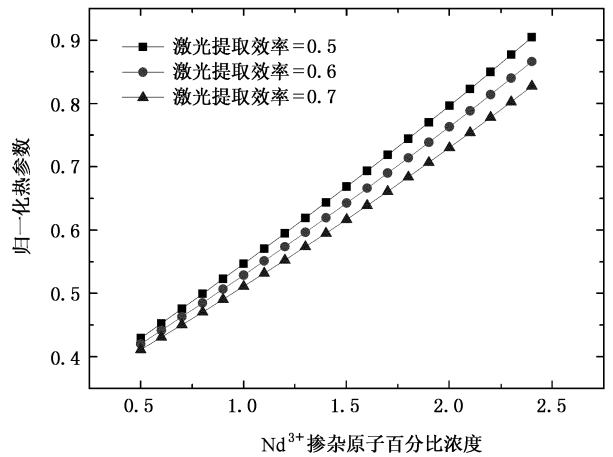


图6 归一化热参数与掺杂浓度的变化关系  $\eta_b = 1, \eta_1$  分别为 0.5 0.6 0.7

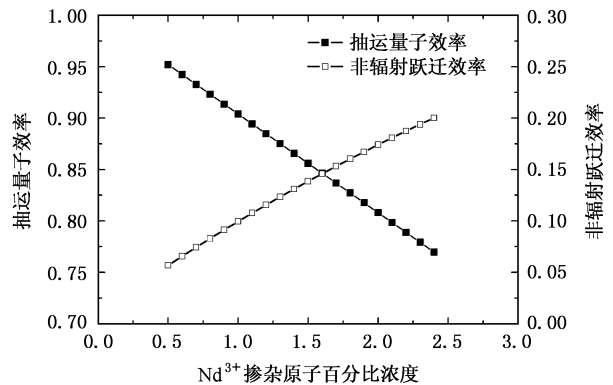


图7 抽运量子效率及非辐射跃迁效率与掺杂浓度的变化关系  $\eta_b = 1, \eta_1 = 0.5$

参数也将增大. 这种变化趋势可以通过掺杂浓度对抽运量子效率以及非辐射跃迁效率的影响得到解释. 如图 7 所示, 而抽运量子效率的降低和非辐射跃迁效率的提高都将增加增益介质内的热沉积.

归一化热参数和光束交叠效率的变化关系如图 8 所示. 结果表明随着交叠效率的增大, 归一化热参

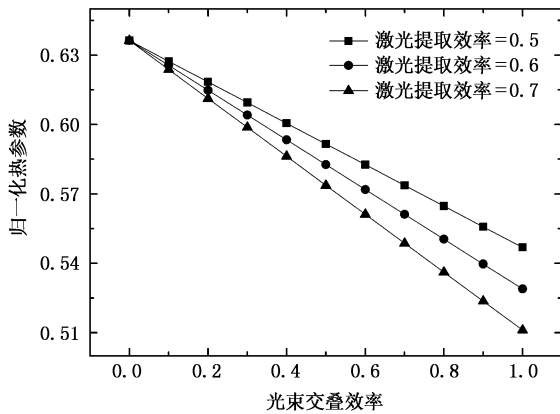


图 8 归一化热参数与光束交叠效率的变化关系  $\rho = 1.0\%$ ,  $\eta_1$  分别为 0.5, 0.6, 0.7

数将显著减小. 这种变化趋势, 与文献 [11] 的实验研究结果是一致的. 因此在激光器设计过程中, 为有效

抑制热效应, 提高激光器腔模与抽运模的交叠率具有重要意义. 此外, 激光器腔模与抽运模的交叠情况也将会影响到输出光束质量<sup>[19, 20]</sup>.

## 5. 结 论

本文通过归一化热参数研究激光提取条件下 LD 侧面抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器中热沉积问题. 我们把激光提取对介质内非辐射跃迁的抑制作用引入到增益介质发热模型, 通过实验测量激光器斜率效率(对吸收的抽运功率)来计算归一化热参数. 进一步讨论了影响增益介质内热沉积的主要因素. 研究表明: 归一化热参数对 Nd:YAG 陶瓷的掺杂浓度、交叠效率以及激光提取效率的变化都比较敏感. 本文指出通过激光器优化设计来提高激光提取效率以及增加抽运模与激光腔模之间的交叠效率对抑制激光器热效应具有重要的意义. 在本工作中通过对掺杂原子百分比浓度为 1.0% 的 Nd:YAG 陶瓷多模激光器的输出耦合镜优化选择, 激光提取效率提高到 0.905, 归一化热参数降低到 0.474. 研究结果将为进一步开展 Nd:YAG 陶瓷激光器热效应研究提供一定参考.

[1] Eggleston J M, Kane T J, Kuhn K *et al* 1984 *IEEE J. Quantum Elect.* **20** 289

[2] Guan J, Li J P, Cheng G H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1804 (in Chinese)[关俊、李金萍、程光华等 2004 物理学报 **53** 1804]

[3] Zhang G Y, Song F, Feng Y *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1495 (in Chinese)[张光真、宋峰、冯衍等 2000 物理学报 **49** 1495]

[4] Ichiro S, Yoichi S, Sunao K *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 234

[5] Mangir M S, Rockwell D A 1986 *IEEE J. Quantum Elect.* **22** 574

[6] Chen T S, Anderson V L, Kahan O 1990 *IEEE J. Quantum Elect.* **26** 6

[7] Fan T Y 1993 *IEEE J. Quantum Elect.* **29** 1457

[8] Zhu H T, Lou Q H, He S B 2005 *Opt. Eng.* **44** 094205

[9] Chen Y, Kuo H 1998 *Opt. Lett.* **23** 846

[10] Sennaroglu A 1999 *Appl. Opt.* **38** 3253

[11] Chen Y 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1835

[12] Brown D C 1998 *IEEE J. Quantum Elect.* **34** 560

[13] Zhu H T, Lou Q H, Qi Y F *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5648 (in Chinese)[朱洪涛、楼祺洪、漆云凤等 2005 物理学报 **54** 5648]

[14] Lupei V, Lupei A 2000 *Phys. Rev. B* **61** 8087

[15] Ma H X, Lou Q H, Qi Y F *et al* 2004 *J. Laser Technol.* **28** 488 (in Chinese)[马海霞、楼祺洪、漆云凤等 2004 激光技术 **28** 488]

[16] Qi Y H, Zhu X L, Lou Q H *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 8725

[17] Koechner W 1999 *Solid-state Laser Engineering* (Berlin: Springer) p107

[18] Kaminskii A A 1981 *Laser Crystals* (Berlin: Springer)

[19] Wang S Y, Guo Z, Fu J M *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2995 (in Chinese)[王石语、过振、傅君眉等 2004 物理学报 **53** 2995]

[20] Shang L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1408 (in Chinese)[尚连聚 2003 物理学报 **52** 1408]

# Experimental and theoretical study on the optimization of the normalized heating parameter in the operating LD side-pumped Nd :YAG ceramic lasers

Zhu Hong-Tao<sup>†</sup> Lou Qi-Hong Qi Yun-Feng Dong Jing-Xing Wei Yun-Rong

( *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China* )

( Received 24 February 2006 ; revised manuscript received 6 March 2006 )

## Abstract

The suppressing effect of laser extraction on the non-radiation transition process is taken into account when the heat model of gain media is developed. Based on the developed heat model , the heat generation in the operating LD side-pumped Nd :YAG ceramic lasers is quantified through using the normalized heating parameter , which can be deduced from the experimental results of the slope efficiency and the absorbed pumping power of the gain media. The main factors which influence on the heat generation are investigated by studying the normalized heating parameter , and the results show that the changes of the laser extraction efficiency , the beam overlap efficiency and the Nd<sup>3+</sup> concentration will result in obvious variations of the normalized heating parameter. In this work , the laser extraction efficiency increases to 0.905 by the optimization of the transmission of the output coupling , and the normalized heating parameter decrease to 0.474 , correspondingly.

**Keywords** : heat generation , normalized heating parameter , Nd :YAG ceramic

**PACC** : 4255R , 4260

<sup>†</sup> E-mail : zhht\_1975@yahoo.com.cn