

# 钛宝石激光器端面抽运 Nd :YAG 陶瓷 激光器热沉积理论和实验研究

朱洪涛<sup>†</sup> 楼祺洪 漆云凤 马海霞 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)

(2005 年 4 月 6 日收到, 2005 年 7 月 11 日收到修改稿)

通过热沉积系数研究在激光提取条件下掺杂原子分数为 1.0% 的 Nd :YAG 陶瓷激光器中热沉积问题. 热沉积系数定义为热沉积功率与激光器输出功率之比. 在理论分析基础上, 通过测量激光器斜率效率来间接测定热沉积系数. 实验测定的热沉积系数值为 0.63. 建立激光提取条件下 Nd :YAG 陶瓷发热模型, 讨论了影响热沉积系数的主要因素. 结果表明, 热沉积系数对 Nd :YAG 陶瓷的辐射量子效率、交叠效率以及激光提取效率的变化非常敏感. 为有效减少介质内热沉积, 在激光器优化设计中交叠效率和激光提取效率是需要着重考虑的参数. 所得结果可为进一步研究陶瓷激光器中热效应提供参考.

关键词: 热沉积, Nd :YAG 陶瓷, 固体激光器

PACC: 4255R, 4260

## 1. 引 言

早在 20 世纪 70 年代, 人们就已经对陶瓷激光器开展了研究. 但由于当时多晶陶瓷的制造工艺水平所限, 作为激光介质, 陶瓷光学性能比单晶和玻璃差, 因而没有在固体激光器研究领域引起更广泛的兴趣. 自 20 世纪 80 年代以来, 人们在制造能够与掺稀土离子的单晶竞争的多晶陶瓷方面做了大量的研究. 1999 年, 透明陶瓷的制造工艺取得突破性进展. 采用纳米技术, 用液相法制备的透明陶瓷的颗粒边界小、气孔率极低, 因而具有很低的散射损耗. 此外, 新型 Nd :YAG 透明陶瓷的吸收光谱、荧光发射光谱以及荧光寿命等与相同掺杂浓度 Nd :YAG 单晶的这些特性都非常接近. 同时, 与单晶、玻璃相比, 掺稀土离子的透明陶瓷还具有容易制造、费用低、尺寸大、多功能性和适于大批量生产等优点. 近来, 陶瓷激光器已经成为固体激光器领域中一个研究热点, 其输出功率已从最初的 499 mW 迅速提高到 1460 W<sup>[1]</sup>. 增加陶瓷介质尺寸还可以进一步提高陶瓷激光器的

输出功率, 近期有望实现 10 kW 激光输出.

激光增益介质热效应始终是制约固体激光器发展的一个重要原因. 尽管透明陶瓷热导率几乎和单晶一样高, 热性能远比玻璃好, 但是随着激光器运行功率提高, 陶瓷激光器中热沉积也将越来越多. 固体激光器激光介质中的热沉积将引起一系列热效应 (如热应力、热透镜、热致双折射等<sup>[2-5]</sup>), 从而影响激光器效率和光束质量, 严重的热沉积甚至会造成工作介质损伤. 国内外对掺稀土离子的单晶、玻璃等固体激光增益介质中热效应已经进行广泛详尽的研究. 然而, 就热沉积这个根本问题, 多数实验研究都是在无激光提取条件下进行的<sup>[6-8]</sup>. Nd :YAG 陶瓷作为一种新型固体激光增益介质, 对其热效应研究还没有充分开展, 而对陶瓷介质内热沉积研究是进一步分析热效应的基础. 本文通过建立发热模型, 定义热沉积系数, 研究在激光提取条件下 Nd :YAG 陶瓷中热沉积问题, 并对影响热沉积的因素进行讨论. 所得结果可为进一步开展陶瓷激光器热效应研究、提高输出功率以及设计冷却方案等提供参考.

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

## 2. 理论分析

### 2.1. 热沉积系数

根据 Eggleston 等<sup>[9]</sup>建立的热应力分析模型,在均匀抽运条件下,受限于介质断裂极限,激光介质所能承受最大的热沉积功率密度为

$$Q = 1\chi(1-\nu)\kappa \frac{\sigma_{\max}}{\alpha E \delta^2}, \quad (1)$$

式中,  $\nu$  为泊松比,  $\kappa$  为热导率,  $\sigma_{\max}$  是断裂前所能承受最大表面应力,  $\alpha$  是热膨胀系数,  $E$  为杨氏模量,  $\delta$  为激光介质厚度. 定义热沉积系数  $H_c$  为热沉积功率  $P_h$  与激光器输出功率  $P_{\text{out}}$  之比, 即  $H_c = P_h/P_{\text{out}}$ . 若增益介质体积为  $V$ , 在断裂极限下, 激光器最大输出功率

$$P_{\text{out-max}} = 1\chi(1-\nu)\kappa \frac{\sigma_{\max}}{\alpha E \delta^2 H_c} V. \quad (2)$$

从(2)式可以看出, 在热损伤限制下, 较小的热沉积系数, 可以获得更大的激光输出功率. 而在热应力损伤没有可能发生的情况下, 根据热沉积系数定义, 较大的热沉积系数的负面影响是: 激光器输出同样的功率, 激光介质内将会有更多的热沉积, 因而热效应将更显著. 我们通过热沉积系数量化陶瓷激光器运转时 Nd:YAG 陶瓷内热沉积, 并通过它研究影响热沉积的因素.

### 2.2. 发热模型

在激光器运转时, 激光输出功率  $P_{\text{out}}$  与吸收的抽运功率  $P_{\text{ab}}$  的关系是<sup>[10]</sup>

$$P_{\text{out}} = \sigma_s(P_{\text{ab}} - P_{\text{th}}), \quad (3)$$

式中,  $\sigma_s$  表示输出功率与吸收功率关系曲线的斜率效率,  $P_{\text{th}}$  为激光器阈值吸收功率.

在激光输出条件下介质吸收的抽运功率  $P_{\text{ab}}$  的转移、转换过程可以通过图 1 来说明. 当激活离子从抽运带跃迁到激光上能级时, 吸收的抽运功率只有一部分转移成激光上能级储存功率  $P_{\text{st}}$ , 其余部分因量子亏损以及浓度猝灭等原因转换成介质内热沉积功率. 当激光器连续运转时,  $P_{\text{st}}$  一部分转换成激光输出功率  $P_{\text{out}}$ , 而其余部分功率则被损耗掉, 损耗功率中的一部分也将转换成介质内的热沉积功率. 激光器输出功率则为

$$P_{\text{out}} = \eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s P_{\text{ab}}, \quad (4)$$

式中,  $\eta_q$  是量子效率, 定义为激活离子从抽运带跃迁到激光上能级概率;  $\eta_b$  为光束的交叠效率;  $\eta_r$  是辐射量子效率, 定义为上激光能级粒子辐射跃迁概率;  $\eta_e$  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;  $\eta_s$  是斯托克斯损失, 定义为激光光子能量与抽运光子能量之比, 即  $\eta_s = \nu_1/\nu_p$  ( $\nu_1$  为激光光子频率,  $\nu_p$  为抽运光子频率).

由(3)(4)式可得

$$\eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s = \sigma_s \left(1 - \frac{P_{\text{th}}}{P_{\text{ab}}}\right). \quad (5)$$

当  $P_{\text{ab}} \gg P_{\text{th}}$  时,

$$\eta_e \approx \frac{\sigma_s}{\eta_q \eta_b \eta_r \eta_s}. \quad (6)$$

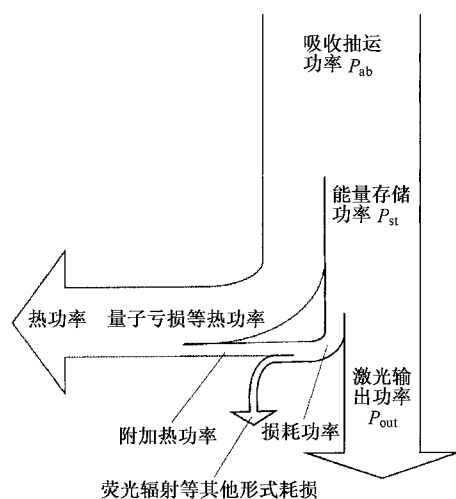


图 1 增益介质吸收的抽运功率转移、转换流程示意图

根据图 1, 量子亏损等热功率和附加热功率构成激光介质内总热沉积功率  $P_h$  约为

$$P_h = P_{\text{ab}} - \eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s P_{\text{ab}} - (1 - \eta_b \eta_e) \eta_r \eta_q P_{\text{ab}} \frac{\lambda_p}{\lambda_f}, \quad (7)$$

式中,  $\lambda_p$  为抽运光波长(808 nm),  $\lambda_f$  为平均荧光波长<sup>[4]</sup>(1038 nm). 根据热沉积系数的定义, 则有

$$H_c = \frac{P_h}{P_{\text{out}}} = \frac{1 - \eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s - (1 - \eta_b \eta_e) \eta_r \eta_q \frac{\lambda_p}{\lambda_f}}{\eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s}. \quad (8)$$

通过比较相同掺杂浓度的单晶和陶瓷荧光光谱<sup>[11]</sup>, 我们可以认为相同掺杂浓度的 Nd:YAG 单晶和陶瓷具有极其相近的能级结构和量子效率. Nd:YAG 晶体量子效率比较高, 通常可假设<sup>[4, 12]</sup>  $\eta_q \approx$

1. 文献 [12] 给出  $\eta_r$  与掺杂浓度的关系, 掺杂原子分数为 1.0% 的 Nd:YAG 陶瓷,  $\eta_r = 0.82$ ; 根据抽运光波长 (808 nm) 和激光发射波长 (1064 nm), 可以计算出  $\eta_s = 0.76$ . 交叠效率可根据增益分布和光束分布推得, 多模激光器  $\eta_b$  值一般在 0.8—0.9 之间. 通过优化激光器设计以及抽运方式, 在本文实验条件下,  $\eta_b = 1$ . 这样, 只要通过实验得出 Nd:YAG 陶瓷激光器斜率效率  $\sigma_s$ , 就可根据 (6) 式得出激光器提取效率  $\eta_e$ . 再根据 (8) 式即可计算出陶瓷激光器连续输出时热沉积系数. 显然, 即使使用相同工作介质, 不同激光器的热沉积系数也会存在差异.

### 3. 实验结果与分析

#### 3.1. 实验装置及结果

实验装置如图 2 所示<sup>[13]</sup>, 波长为 808 nm 的钛宝石激光器作为抽运源, 经耦合透镜把抽运光束聚焦到掺杂原子分数为 1.0% 的 Nd:YAG 陶瓷片上, 聚焦光斑直径约为 50  $\mu\text{m}$ . 陶瓷薄片厚度为 1.24 mm, 直径 20 mm. 陶瓷片被固定在冷却块上, 通过水冷方式对其进行冷却. 采用平凹腔结构作为激光器谐振腔, 陶瓷片相对的两个端面为通光面, 一个端面镀 1064 nm 的减反膜以减少光损耗, 另一个端面镀 808 nm 高透/1064 nm 高反双色膜作为一个谐振腔镜; 曲率半径为 50 mm 的凹面镜镀 1064 nm 的高反膜作为耦合输出镜, 其透过率为 5%.

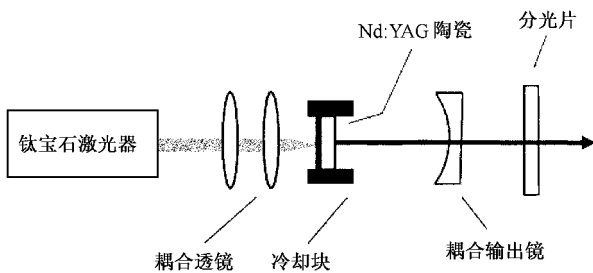


图 2 陶瓷激光器实验装置示意图

图 3 给出陶瓷激光器吸收抽运功率与输出功率的关系, 阈值功率为 13 mW, 斜率效率为 59.8%.

#### 3.2. 热沉积系数

根据 (6) 式, 激光提取效率为 0.96. 再根据 (8) 式, 我们可以得到在激光提取条件下, 本工作所研究

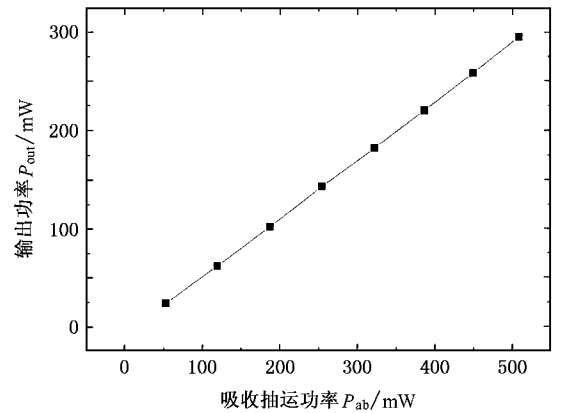


图 3 陶瓷激光器输出功率与吸收抽运功率的变化关系

的 Nd:YAG 陶瓷激光器的热沉积系数为 0.63.

基于上述分析, 我们可以方便地研究其他陶瓷激光器的热沉积系数. 文献 [14] 报道掺杂原子分数分别为 1.0% 和 2.0% 的 Nd:YAG 陶瓷激光器斜率效率 (对抽运光功率) 分别为 53% 和 34%. 如果用吸收功率表示 (考虑到耦合损耗), 斜率效率分别约为 55.2% 和 35.4%. 对于掺杂原子分数为 2.0% 的 Nd:YAG 陶瓷, 辐射量子效率  $\eta_r = 0.67$ . 我们可以计算出这两个激光器提取效率分别为 0.89 和 0.70, 热沉积系数分别为 0.68 和 1.40. 文献 [14] 中掺杂原子分数为 1.0% 的 Nd:YAG 陶瓷激光器热沉积系数比本文的激光器热沉积系数略高, 这是因为本文实验中陶瓷片上镀有减反膜, 从而降低激光器谐振腔损耗. 掺杂原子分数为 1.0% 和 2.0% 的 Nd:YAG 陶瓷荧光寿命分别为 237.6 和 184.2  $\mu\text{s}$ , 显然, 后者在工作时发生显著的浓度猝灭, 这是掺杂原子分数为 2.0% 的 Nd:YAG 陶瓷激光器热沉积系数较大的主要原因.

#### 3.3. 热参数、热载效率

如上所述, 热沉积系数适合用于研究在激光提取条件下增益介质内的热沉积问题. 另外两种常用的考察激光介质热沉积的方法是使用热参数  $\chi$ <sup>[7]</sup> 以及热载效率  $\eta_h$ <sup>[8]</sup>, 它们分别被定义为

$$\chi = P_h / P_{st},$$

$$\eta_h = P_h / P_{ab}.$$

从热参数及热载效率定义看, 它们更方便用于考察无激光提取条件下激光介质内的热沉积问题. 但是, 在激光提取条件下, 我们仍然可以根据定义来计算这两个参数. 根据本文发热模型、热参数及热载效率定义, 可以得到

$$\chi = \frac{1 - \eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s - (1 - \eta_b \eta_e) \eta_r \eta_q \frac{\lambda_p}{\lambda_f}}{\eta_q \eta_r \eta_s} \quad (9)$$

$$\eta_h = 1 - \eta_q \eta_b \eta_r \eta_e \eta_s - (1 - \eta_b \eta_e) \eta_r \eta_q \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \quad (10)$$

根据各参量数值,在激光提取条件下, $\chi = 0.60$ ;在无激光提取条件下( $\eta_e = 0$ ), $\chi = 0.58$ . 同样,可以计算出在激光提取条件下 Nd :YAG 陶瓷热载效率为 0.37;在无激光提取条件下,陶瓷热载效率为 0.36. 这与文献 [8] 的实验测量结果 (0.37—0.43) 非常接近. 在本文建立的热沉积模型基础上,根据  $\eta_r$  与掺杂浓度的关系<sup>[12]</sup>,我们还可以研究无激光提取条件下热载效率与 Nd :YAG 掺杂浓度的关系,并与实验测量结果<sup>[8]</sup>进行了比较,如图 4 所示. 需要指出的是:文献 [8] 中建立的热载效率模型与实验结果存在较大的差异,而图 4 表明,本文所建立的热沉积模型与实验测量结果符合较好.

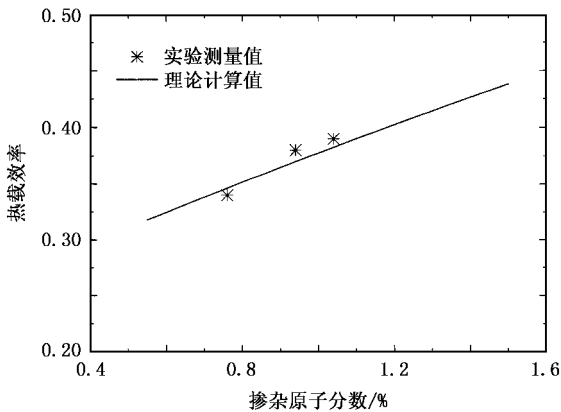


图 4 热载效率与 Nd :YAG 掺杂浓度的关系

### 3.4. 影响热沉积系数的因素

根据 (8) 式,可以知道影响热沉积系数的参数有五个,即  $\eta_q$ ,  $\eta_b$ ,  $\eta_s$ ,  $\eta_r$  和  $\eta_e$ . 在低抽运条件下  $\eta_q \approx 1$ , 而抽运波长、激光振荡波长一旦确定,  $\eta_s$  是个定值. 因此,  $\eta_b$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_e$  将是影响热沉积系数的三个主要因素.  $\eta_r$  与 Nd :YAG 陶瓷掺杂浓度相关,而  $\eta_b$ ,  $\eta_e$  是与整个激光器的设计以及抽运方式等相联系. 下面,我们分别研究它们对热沉积系数的影响.

图 5、图 6、图 7 分别给出  $H_c$  与  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $\eta_e$  的依赖关系. 可以看出热沉积系数对辐射量子效率、交叠效率以及能量提取效率的变化都非常敏感,尤其是辐射量子效率对热沉积系数的影响最为突出. 这可以从热沉积系数的定义来得到解释: 根据发热模型,

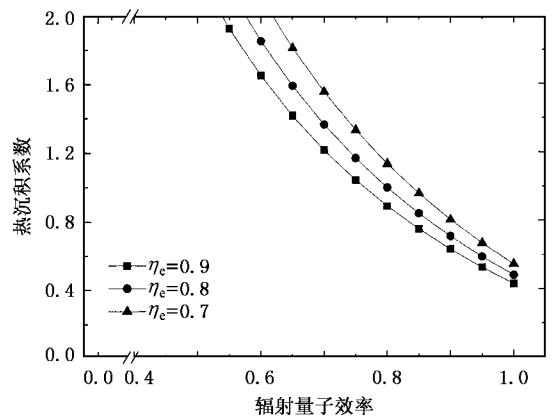


图 5 热沉积系数与辐射量子效率的变化关系  $\eta_b = 0.8$

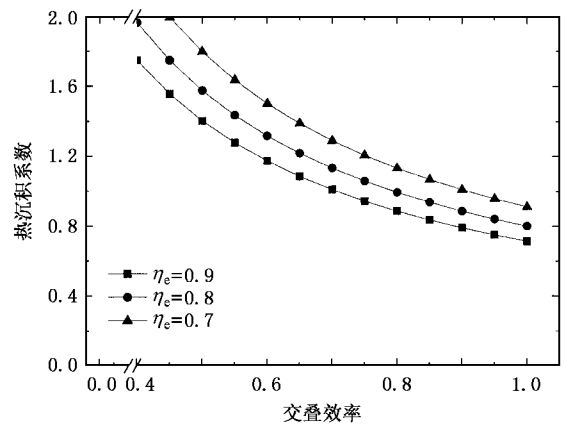


图 6 热沉积系数与交叠效率的变化关系  $\eta_r = 0.9$

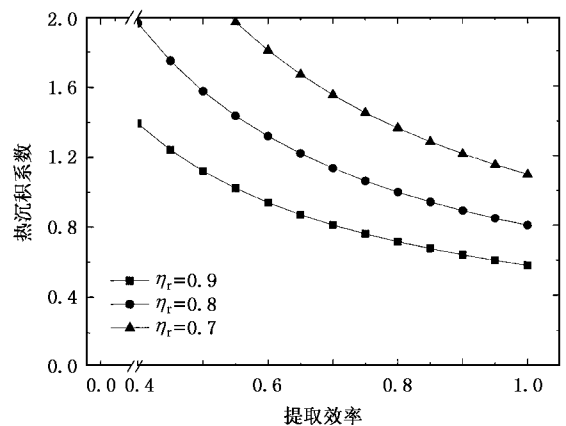


图 7 热沉积系数与提取效率的变化关系  $\eta_b = 0.8$

$\eta_b$ ,  $\eta_e$  的变化对热沉积功率  $P_h$  的影响非常小,而对激光器输出功率  $P_{out}$  影响较大,因而它们的变化对热沉积系数的影响将很显著. 而  $\eta_r$  的变化使  $P_h$  和  $P_{out}$  存在明显的此消彼长的关系,因而热沉积系数

对辐射量子效率的变化最为敏感.

如上所述,交叠效率、提取效率是与激光器结构以及抽运方式等相关联的,因此,为减少热沉积、提高激光器输出功率,在激光器优化设计中 $\eta_b$ 和 $\eta_e$ 是两个需着重考虑的参数.需要指出的是,抽运光模式与腔模的匹配情况不仅会影响激光器的热沉积,还将影响到激光光束质量等<sup>[15,16]</sup>.

## 4. 结 论

本文通过热沉积系数研究了激光提取条件下Nd:YAG陶瓷中热沉积问题.我们建立发热模型,在理论分析的基础上,通过实验测量激光器斜率效率

来间接测定热沉积系数.在我们的实验条件下,热沉积系数为0.63.如用热参数和热载效率来描述热沉积,它们分别为0.60和0.37.本文还对影响热沉积系数的主要因素进行了讨论.结果表明,热沉积系数对Nd:YAG陶瓷辐射量子效率、交叠效率以及激光提取效率的变化非常敏感,相对而言辐射量子效率的变化对热沉积系数的影响尤其显著.由于交叠效率和提取效率与激光器的结构以及抽运方式相关,因而为减少热沉积,在对激光器优化设计中 $\eta_b$ 和 $\eta_e$ 是需要着重考虑的参数.本文工作是对Nd:YAG陶瓷激光器运转条件下热沉积问题的初步探讨,研究结果可为进一步开展陶瓷激光器热效应研究、提高输出功率以及冷却方案的设计等提供参考.

- 
- [ 1 ] Lu J, Ueda K, Yagi H *et al* 2002 *J. Alloy Compd.* **341** 220
- [ 2 ] Zhang G Y, Song F, Feng Y *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1495 (in Chinese)[张光寅、宋峰、冯衍等 2000 物理学报 **49** 1495]
- [ 3 ] 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]
- [ 4 ] Ichiro S, Yoichi S, Sunao K *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 234
- [ 5 ] Efim A K 2002 *Opt. Lett.* **27** 716
- [ 6 ] Metin S M, David A R 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 574
- [ 7 ] Chen T S, Anderson V L, Kahan O 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 6
- [ 8 ] Fan T Y 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 1457
- [ 9 ] Eggleston J M, Kane T J, Kuhn K *et al* 1984 *IEEE J. Quantum Electron.* **20** 289
- [ 10 ] Koechner W 1999 *Solid-state Laser Engineering* (Berlin: Springer) p105
- [ 11 ] 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]
- [ 12 ] Lupei V, Lupei A 2000 *Phys. Rev. B* **61** 8087
- [ 13 ] Qi Y F, Lou Q H, Ma H X *et al* 2005 *Chin. Opt. Lett.* **3** 89
- [ 14 ] Lu J, Prabhu M, Song J *et al* 2000 *Phys. Rev. B* **71** 469
- [ 15 ] Shang L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1408 (in Chinese)[尚连聚 2003 物理学报 **52** 1408]
- [ 16 ] 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]

# Experimental and theoretical study of heat generation in Ti :sapphire end-pumped Nd :YAG ceramic lasers

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

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

( Received 6 April 2005 ; revised manuscript received 11 July 2005 )

## Abstract

The heat generation in Nd :YAG ceramic lasers under the conditions of laser extraction was investigated through the heat generation coefficient , which was defined as the ratio of heat generation power to laser output power. The heat generation coefficient of the 1.0% neodymium-doped YAG ceramic laser was calculated to be 0.63. The main factors which influences the heat generation coefficient were discussed in this paper , and the results showed that the heat generation coefficient was very sensitive to the changes in quantum emission efficiency , overlap efficiency and laser extraction efficiency. This work provides a reference for further research of thermal effect of Nd :YAG ceramic lasers.

**Keywords** : heat generation , Nd :YAG ceramic , solid-state laser

**PACC** : 4255R , 4260

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