

准连续激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 薄片瞬态温度场

栗红霞¹, 李 隆², 聂建萍², 史 霞², 甘安生²

(1. 黄河科技学院, 河南 郑州 450063; 2. 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 准连续激光二极管(LD)泵浦的激光晶体中存在着温度升降的变化过程。为解决准连续 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片时变热效应问题, 基于热传导方程, 采用特征函数法和常数变异法得到了准连续超高斯光束端面泵浦 Nd:YAG 薄片的瞬态温度场一般解析表达式。定量分析了准连续泵浦光脉宽和占空比对 Nd:YAG 薄片瞬态温度场的影响。研究表明, 准连续 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片时, 薄片内温度场随时间呈波浪状分布, 再经过一段时间后呈现出稳定周期性分布, 此时的瞬态温度场围绕连续 LD 泵浦时稳态温度波动, 波动幅度为 12.1 °C, 薄片的瞬态温升量将随准连续 LD 泵浦脉宽与占空比的增大而升高。研究方法和所得结果还可以应用到激光系统的其他瞬态热问题研究中, 对解决激光系统热问题具有理论指导作用。

关键词: 激光器; 瞬态温度场; 解析分析; Nd:YAG 薄片

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.04.005

Transient temperature filed of Nd:YAG microchip end-pumped by quasi-CW diode laser

LI Hong-xia¹, LI Long², NIE Jian-ping², SHI Xia², GAN An-sheng²

(1. Huanghes & Tcollege, Zhengzhou 450063, China;

2. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The transient processes of temperature rise and fall exist in laser crystal pumped by quasi-CW laser diode (LD). Based on the heat conducting equation, a general analytical transient temperature filed expression of Nd:YAG microchip end-pumped by the quasi-CW supper-Gaussian beam was obtained by the methods of the eigen-function and the constant variation. Meanwhile, the influence of the quasi-CW pump beam with different waist radius and pulse widths on the transient temperature filed of Nd:YAG microchip were quantitatively analyzed. The results show that when quasi-CW LD end-pumps the Nd:YAG microchip, the temperature distribution of Nd:YAG microchip will undulate with pump pulse. And after a period of time, the temperature field will present stable periodic distribution. The transient temperature field of microchip will undulate around the temperature field end-pumped by CW LD. The fluctuant amplitude of temperature field is 12.1 °C. And the temperature rise of microchip increases with the pump width or duty cycle of the quasi-CW LD. The research methods and results can also be used to analyze other transient thermal problems in laser systems.

Key words: laser; transient temperature filed; analytical analysis; Nd:YAG microchip

1 引 言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器(DPSSL)具有高效率、紧凑、寿命长、可靠性高等特点,在工业、军事、科研、医疗等诸多领域有着广泛的应用^[1-3]。采用激光二极管端面泵浦形式,由于泵

基金项目: 西安市科技局创新支撑项目(No. CXY1015(6)); 陕西省工业攻关项目(No. 2008K05-15)资助。

作者简介: 栗红霞(1978-),女,讲师,硕士研究生,主要研究方向为电子技术。E-mail:1272902842@qq.com

收稿日期: 2011-08-22

浦光与激光材料内的振荡光有充分的空间交叠,因此端泵的 DPSSL 不仅易于实现 TEM_{00} 模输出,而且有着较低的阈值泵浦功率和高的斜效率。与此同时,由于泵浦光被准直聚焦成为几百微米的光斑,产生的废热导致激光材料温度升高,引起的折射率梯度、机械应力以及退偏等效效应影响了激光器谐振腔稳定性,降低了光束质量,减小了输出功率,甚至造成激光材料的断裂^[3-4]。采用薄片材料,配合相适应的热沉冷却装置,可使得薄片温度分布近似均匀,大大降低了激光材料的热透镜效应和热致双折射,既实现了大功率泵浦的需求,又避免了激光材料的热折裂,因此薄片激光器不仅输出功率可以标定到很高的功率水平,而且可获得接近衍射极限的输出光束质量^[5-6]。

高功率准连续 LD 的出现也推动了 DPSSL 技术的新发展。对于准连续与连续泵浦方式而言,激光材料内热累积效果迥然不同^[7-9]。由于准连续泵浦与强制冷却共同作用,在激光材料内形成了脉冲泵浦升温与脉冲间隔期间降温这两个瞬态过程。目前,对于准连续 LD 泵浦激光材料瞬态热效应的研究处于初期阶段,而且大多利用有限元法对其瞬态温度分布及其影响因素进行数值研究^[10]。本文通过准连续 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片实际工作特点分析,建立符合薄片激光器实际的热分析模型,使用特征函数法和常数变易法求解热传导方程,得到了准连续超高斯光束端面泵浦 Nd:YAG 薄片瞬态温度场的一般解析表达式。分析了准连续泵浦 Nd:YAG 薄片温度场的变化规律,定量计算了泵浦脉宽、占空比对 Nd:YAG 薄片瞬态温场的影响。

2 准连续 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片瞬态温度场解析计算

2.1 端面泵浦 Nd:YAG 薄片结构模型及其棒内热源分布状态

薄片激光器采用端面泵浦方式时,泵浦光与谐振腔近乎同轴,增益介质对泵浦光得以吸收充分,所以端面泵浦的薄片激光器具有阈值泵浦功率低,斜效率高的特点^[6]。LD 阵列发出的光经微透镜整形后,耦合进入到光纤,再经耦合器聚焦到 Nd:YAG 薄片的泵浦端面,其光束分布用不同阶次的超高斯分布近似^[11]。耦合器由两个平凹透镜组合而成,不改变泵浦光的能量分布。准连续激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 薄片的镀膜结构及工作方式如图 1 所示,其中, r 和 z 分别为 Nd:YAG 薄片径向和轴向坐标, R 为 Nd:YAG 薄片半径, L 为薄片厚度。

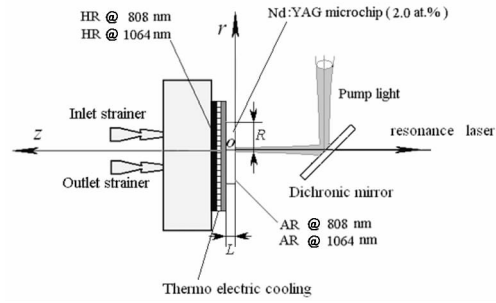


图 1 准连续激光二极管端泵 Nd:YAG 薄片模型简图

Fig. 1 schematic of quasi-CW diode laser end-pumped

Nd:YAG Microchip

Nd:YAG 薄片泵浦面镀 808 nm 和 1064 nm 双波长增透膜 (AR @ 808 nm & 1064 nm, $R < 0.2\%$), 其冷却面镀 808 nm 和 1064 nm 双波长高反膜 (HR @ 808 nm & 1064 nm, $R > 95\%$), 再在其冷却面镀 Ti, Pt, Au, 以实现其金属化, 最后用钎焊工艺将薄片焊接在热沉紫铜块上, 紫铜块内掏微循环水通道, 水冷方式对 Nd:YAG 薄片进行降温冷却。准连续 LD 出射的泵浦光垂直入射到 Nd:YAG 微片泵浦面 ($z = 0$ 面), 又因 Nd:YAG 薄片冷却面镀有 808 nm 和 1064 nm 双波长高反膜, 泵浦光经微片冷却面反射回来会被晶体再次吸收利用。这样在 Nd:YAG 微片内产生的热功率密度为:

$$q_v(r, z, t) = \alpha \eta_{co} \eta \frac{PG(t)}{2\pi \int_0^\infty e^{-\frac{r^2 k}{\omega_p^2}} r dr} e^{-\frac{r^2 k}{\omega_p^2}} [e^{-\alpha z} + \zeta e^{-\alpha(2L-z)}] \quad (1)$$

式中, α 为 Nd:YAG 晶体对波长为 808 nm 泵浦光的吸收系数; η_{co} 为耦合系统的耦合效率; η 为光热系数; P 为泵浦光总功率; ω_p 为超高斯泵浦光的束腰半径; k 为超高斯泵浦光的阶次; ζ 为 Nd:YAG 微片冷却面镀波长为 808 nm 高反膜的反射率; $G(t)$ 为准连续 LD 出射泵浦光的时间包络, 设 LD 脉宽为 τ 、周期为 T 的准连续波, 如图 2 所示。

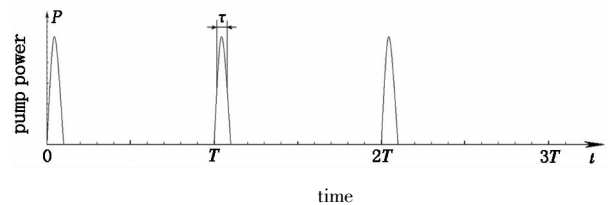


图 2 准连续激光二极管泵浦 Nd:YAG 薄片时序波形图

Fig. 2 waveform diagram of quasi-CW diode-laser output pulse

Nd:YAG 微片冷却面与热沉有着良好的热接触, 温度保持相对恒定。泵浦面与空气相接触, 微片产生的热量大多经冷却面以热传导方式散失, 可假设微片泵浦面及其侧面处于绝热状态。建立柱坐标

系,坐标原点 O 处于 Yb:YAG 微片泵浦面中心。准连续 LD 端面抽运、背向冷却 Nd:YAG 微片热边界条件数学表达式为:

$$\begin{aligned} u(r, \varphi, z) \Big|_{z=-L} &= 0 \\ \frac{\partial u(r, \varphi, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0 \\ \frac{\partial u(r, \varphi, z)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 准连续 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片瞬态温度解析分析

由于 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片内部热源分布具有轴对称性,则其温度分布便于角度无关。设 Nd:YAG 薄片泵浦升温阶段的温度场为 $u_{\text{I}}(r, z, t)$, 在脉冲间隔期间降温阶段的温度场为 $u_{\text{II}}(r, z, t)$,

$$\begin{aligned} u_{\text{I}i}(t, r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{M_{m0}}{2} \left\{ \left(\sum_{h=0}^{i-1} (e^{F_{m0}(hT+\tau)} - e^{hF_{m0}T}) - e^{F_{m0}[(i-1)T+\tau]} \right) e^{-F_{m0}t} + 1 \right\} \cos\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z\right) + \\ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} M_{mn} \left[\left(\sum_{h=0}^{i-1} (e^{F_{mn}(hT+\tau)} - e^{hF_{mn}T}) - e^{F_{mn}[(i-1)T+\tau]} \right) e^{-F_{mn}t} + 1 \right] J_0\left(\frac{\beta_n r}{R}\right) \cos\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z\right) \end{aligned} \quad (5)$$

同时,可得 LD 第 i 个脉冲泵浦 Nd:YAG 薄片降温阶段温度场解析表达式为:

$$\begin{aligned} u_{\text{II}i}(t, r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2} M_{m0} \sum_{h=0}^{i-1} (e^{F_{m0}(hT+\tau)} - e^{hF_{m0}T}) e^{-F_{m0}t} \cos\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z\right) + \\ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} M_{mn} \sum_{h=0}^{i-1} (e^{F_{mn}(hT+\tau)} - e^{hF_{mn}T}) e^{-F_{mn}t} J_0\left(\frac{\beta_n r}{R}\right) \cos\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, J_0 为零阶第一类 Bessel 函数; β_n 为 J_0 的一阶导数的第 n 个零点,而:

$$\begin{cases} F_{m0} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{2m-1}{2L}\pi z \right)^2, F_{mn} = \frac{\lambda}{\rho c} \left[\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z \right)^2 + \left(\frac{\beta_n}{R} \right)^2 \right] \\ M_{m0} = \frac{4}{F_{m0} \rho c L R^2} \int_0^R r \int_0^L q_v \cos\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z\right) dz dr \\ M_{mn} = \frac{4}{F_{mn} \rho c L R^2 [J'_0(\beta_n)]^2} \int_0^R r J_0\left(\frac{\beta_n r}{R}\right) \int_0^L q_v \cos\left(\frac{2m-1}{2L}\pi z\right) dz dr \end{cases} \quad (7)$$

3 准连续 LD 端面泵浦 Nd:YAG 薄片瞬态温场变化规律

3.1 Nd:YAG 薄片泵浦面不同位置处温场分布

掺 Nd^{3+} 质量分数为 2.0% 的 Nd:YAG 晶体对波长 808 nm 泵浦光的吸收系数为 14.9 cm^{-1} [12];耦合系统的效率和光热效率分别取 0.80 和 0.32 [2];二极管激光器阵列由 25 个二极管 bar 组成,每个 bar 的峰值功率为 80 W,占空比为 15% [13-15],即泵浦光峰值功率为 2000 W,频率为 100 Hz、束腰半径为 $320 \mu\text{m}$ 的具有四阶超高斯分布的准连续泵浦光端面泵浦到 $\Phi 13 \times 1 \text{ mm}^3$ Nd:YAG 薄片上,薄片端面不同位置的瞬态温度分布如图 3 所示。可以看出,薄片的泵浦中心处温升很快,而边缘温度变化相对平

遵从热传导方程分别为:

$$\rho c \frac{\partial u_{\text{I}}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 u_{\text{I}}}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\text{I}}}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_{\text{I}}}{\partial^2 z} \right) + q_v \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial u_{\text{II}}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 u_{\text{II}}}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\text{II}}}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_{\text{II}}}{\partial^2 z} \right) \quad (4)$$

式中, ρ, c, λ 分别为晶体密度、比热容和热导率。Nd:YAG 晶体密度为 4560 kg/m^3 , 比热容为 $590 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 热导率为 $13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由于 Nd:YAG 薄片冷却面温度保持相对恒定,在热模型的数学处理中将其设为零(相对),待得出温度场后,再叠加冷却环境温度 u_0 (实验室中循环水冷机温度设定为 20°C)。经过求解,得到 LD 第 i 个脉冲泵浦 Nd:YAG 薄片升温阶段的温度场解析表达式为:

缓,而且温度波动幅度也较小。

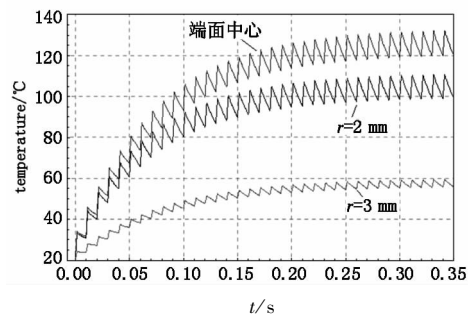


图3 准连续激光二极管管泵 Nd:YAG 薄片不同位置处的温场变化与分布

Fig.3 transient temperature field variation and distribution at different position of Nd:YAG Microchip end-pumped by quasi-CW diode laser

3.2 Nd:YAG 薄片在连续和准连续 LD 泵浦下的温度对比

图4为薄片在准连续和连续LD泵浦下温度变化的对比图,其中LD连续输出的泵浦功率为300 W。可以看出:激光薄片无论在连续泵浦状态还

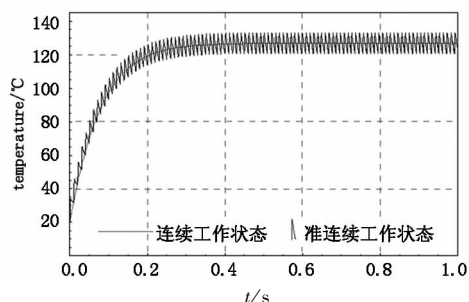


图4 准连续和连续LD端泵Nd:YAG薄片温度场分布图
Fig.4 temperature field distribution of Nd:YAG Microchip end-pumped by CW and quasi-CW diode laser

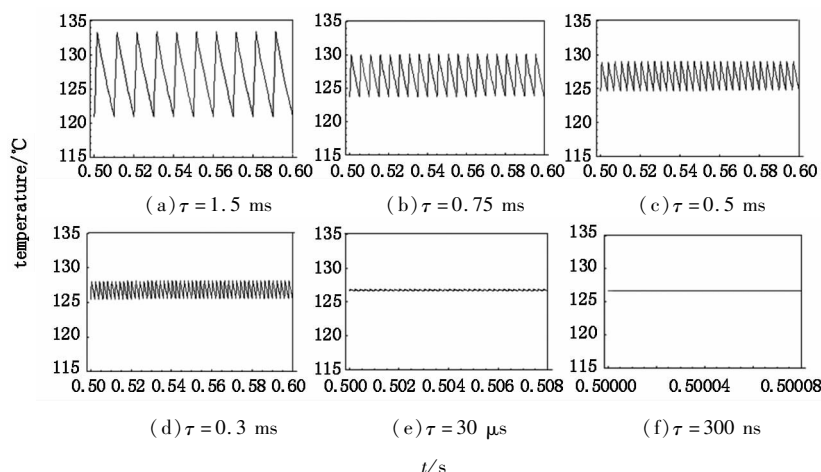


图5 相同占空比、不同脉宽准连续LD端泵Nd:YAG薄片稳态温度分布图
Fig.5 steady-state temperature distribution of Nd:YAG Microchip end-pumped by quasi-CW diode laser with same duty ratio and different pulse width

图6为占空比分别为10%,15%,5%的准连续LD泵浦Nd:YAG薄片时,薄片端面中心的瞬态温度分布对比图。可以看出薄片内最终达到的稳态温度主要由占空比决定,占空比越大,晶体温度升得越高。

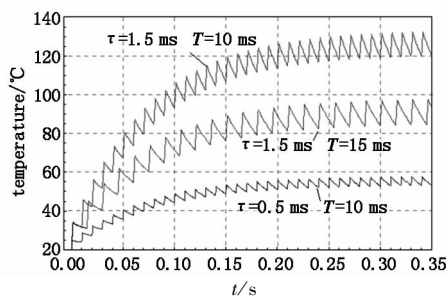


图6 不同占空比的准连续LD端泵Nd:YAG薄片瞬态温场分布图

Fig.6 transient temperature field distribution of Nd:YAG Microchip end-pumped by quasi-CW diode laser with different duty ratio

是在准连续泵浦状态,大约在经过0.5 s后达到稳定温度场分布平衡态。薄片在准连续泵浦状态工作时的温度围绕连续泵浦工作时的温度做锯齿状波动,波动幅度为12.1 °C,平均温度为126.7 °C。

3.3 准连续泵浦脉宽、占空比对Nd:YAG薄片瞬态温度的影响

调整激光二极管驱动电源工作模式使其输出光脉冲的占空比为15%。图5为相同占空比、不同脉宽的Nd:YAG薄片内温度达到稳态后温度分布对比图。从图中可以看出:薄片温度的波动幅度主要由脉宽决定;脉宽越窄时,晶体温度波动的幅度越小;当泵浦脉宽只有纳秒量级时,晶体温度的波动性可以忽略,从而可以认为与连续泵浦时的温度分布相同。

4 总结

对准连续LD端面泵浦薄片激光器工作状态分析,建立了端面绝热、背向冷却、温度随时间变化的瞬态热分析模型,利用特征函数法和常数变异法得到了Nd:YAG薄片在准连续超高斯光束端面泵浦时的瞬态温度场的一般解析表达式。定量分析了LD准连续泵浦与连续泵浦时Nd:YAG薄片温度分布情况,研究了激光二极管泵浦脉宽和占空比对Nd:YAG薄片内时变温度场的影响。当准连续泵浦光的峰值功率一定时,薄片达到稳态平衡后的平均值温度主要取决于占空比,占空比越大,晶体温度升得越高。泵浦光的脉宽决定了薄片稳态温场的波动幅度,脉宽越宽,波动幅度越大。

参考文献:

- [1] Wang Shuxiang, Chen Yunlin, Yan Caifan, et al. Survey of microchip lasers[J]. Quantum Electronics, 2007, 24(4): 401-406. (in Chinese)
王淑香, 陈云琳, 颜彩繁, 等. 微片激光器的最新研究进展[J]. 量子电子学报, 2007, 24(4): 401-406.
- [2] Yao Zhenyu, Lü Baida, Tu Bo, et al. 100 W diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(9): 1116-1118. (in Chinese)
姚震宇, 吕百达, 涂波, 等. 100 W 二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1116-1118.
- [3] Gan Ansheng, Li Long, Shi Peng. Thermal effect of Yb:YAG slice laser by diode laser end-pumped[J]. Acta Phot on Ica Sinica, 2008, 37(4): 631-635. (in Chinese)
甘安生, 李隆, 史彭. 激光二极管端面泵浦 Yb:YAG 薄片激光器的热效应[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 631-635.
- [4] Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali, et al. QCW-LD pumped Yb:YAG microchip lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(2): 97-100. (in Chinese)
吴海生, 闫平, 巩马理, 等. 准连续激光二极管抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 97-100.
- [5] Wang Qiuming, Lin Yongqin, Wang Xin, et al. High repetition rate LD-end-pump acousto-optic Q-switched intracavity frequency doubling green laser[J]. Acta Phot on Ica Sinica, 2010, 39(6): 1078-1081. (in Chinese)
王秋明, 林永钦, 王鑫, 等. 高重复频率 LD 端面抽运声光调 Q 腔内倍频绿光激光器[J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1078-1081.
- [6] Chen Jun, Li Dongming, Zhou Tao. Experimental study on LD end-pumped microchip solid laser[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(5): 312-314. (in Chinese)
陈军, 李东明, 周涛. LD 端面泵浦微片固体激光器实验研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(5): 312-314.
- [7] Liu Quanxi, Zhou Ming. Temperature and thermal stress distribution in thin disk laser end-pumped by LD[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(4): 636-640. (in Chinese)
刘全喜, 钟鸣. LD 端面泵浦薄片激光器的温度和热应力分布研究[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 636-640.
- [8] Shi Peng, Li Jinping, Li Long, et al. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(5): 643-646. (in Chinese)
史彭, 李金平, 李隆, 等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 643-646.
- [9] Zhang Shenjin, Ou Qunfei, Feng Guoying, et al. Analysis of transient temperature distribution in laser rod pumped by repetitively pulsed high-power ring LDA[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(2): 145-148. (in Chinese)
张申金, 欧群飞, 冯国英, 等. 高功率环形激光二极管阵列重复脉冲抽运激光器中棒的瞬态温度分布[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 145-148.
- [10] Song Xiaolu, Li Bingbin, Wang Shiyu, et al. Transient thermal effect in pulsed laser diode end-pumped solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(11): 1476-1482. (in Chinese)
宋小鹿, 李兵斌, 王石语, 等. 脉冲激光二极管端面抽运全固态激光器热效应瞬态过程[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1476-1482.
- [11] Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong. Analysing the light intensity distribution of super-gaussian mirror resonator by fast fourier-transform[J]. Chinese J. Lasers, 2004, 31(11): 1317-1322. (in Chinese)
王宁, 陆雨田, 孔勇. 用快速傅里叶变换法分析超高斯反射镜腔的光场分布[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1317-1322.
- [12] Li Feng, Fan Ting, Bai Jintao, et al. Investigation on temperature and thermal lens effects of laser diode end-pumped quadrate composite YAG crystal[J]. Acta Phot on Ica Sinica, 2008, 37(3): 425-429. (in Chinese)
李锋, 范婷, 白晋涛, 等. 端面抽运方形复合 YAG 温度场及热透镜研究[J]. 光子学报, 2008, 37(3): 425-429.
- [13] J Dong, P Deng, F Gan, et al. Highly doped Nd:YAG crystal used for microchip lasers[J]. Optics Communications, 2001, 10(1): 413-418.
- [14] Tu Bo, Jiang Jianfeng, Zhou Tangjian, et al. Numerical simulation of medium temperature and stress for high power disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 17(4): 121-124. (in Chinese)
涂波, 蒋建峰, 周唐建, 等. 高功率薄片激光介质温度与应力数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 121-124.
- [15] Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo, et al. Study on diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(Supplement): 15-18. (in Chinese)
姚震宇, 蒋建峰, 涂波, 等. 二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(增刊): 15-18.