

基于热-流-固多物理场耦合的薄片激光器 温度场研究

杨火木¹ 冯国英^{1*} 魏泳涛¹ 母健¹ 王树同¹ 王绍朋¹ 唐淳² 周寿桓^{1,3}

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065; ² 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

³ 华北光电技术研究所, 北京 100015

摘要 基于热-流-固多物理场耦合模型, 仿真分析了高功率大口径薄片激光器冷却和抽运过程中的流动、对流扩散和热传导过程, 对冷却液流场分布和工作物质温度场分布进行了分析, 研究了抽运功率、冷却液流速对激光工作物质温度场分布的影响。仿真结果表明: 冷却液流动、热传导和对流扩散引起冷却液温度在流动方向上逐渐升高, 激光工作物质的温度在冷却液流动方向呈非对称分布, 对称轴上的最高温度点在冷却液流动方向偏离激光工作物质轴心。激光工作物质在冷却液流动方向的对称轴的入口段与出口段的温差随抽运功率呈线性变化, 随冷却液流速呈非线性变化。实验测量结果与模拟结果相一致。

关键词 激光器; 薄片激光器; 温度场分布; 冷却液流场; 热-流-固多物理场耦合

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0902004

Study on Temperature Distribution of Disk-Type Laser Based on Heat-Fluid-Solid Multiphysics Coupling Method

Yang Huomu¹ Feng Guoying¹ Wei Yongtao¹ Mu Jian¹ Wang Shutong¹

Wang Shaopeng¹ Tang Chun² Zhou Shouhuan^{1,3}

(¹ Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China
² China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
³ North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract Based on the heat-fluid-solid multiphysics coupling method, the fluid flow, convective diffusion and thermal conduction, which occur in the pumping and cooling processes of high power disk-type laser, are simulated and analyzed. Influences of pumping power and fluid flowing velocity on the temperature distribution of disk gain medium are studied. Simulation results reveal that the temperature of cooling fluid gradually increases in the fluid flowing direction under the interaction of flowing, heat conduction and convective diffusion. Temperature distribution of the laser gain medium is asymmetrical in the direction of fluid flowing direction. The highest temperature position on the flowing direction is shifted from the axis of gain medium. A linear variation of temperature differences on the flowing direction of gain medium between the inlet and outlet is showed with the pump power increasing. A nonlinear variation of temperature difference on the flowing direction of gain medium between the inlet and outlet is showed with the fluid flowing velocity increaseing. Experimental results are in agreement with the simulation results.

Key words lasers; disk-type laser; temperature distribution; fluid flow field; heat-fluid-solid multiphysics coupling method

OCIS codes 140.3430; 140.3460; 140.6810

1 引言

激光二极管抽运全固态激光器具有寿命长、效

率高、结构紧凑和光束质量好等优点, 在工业、科学研究和国家安全等领域有重要的应用^[1]。薄片全固

收稿日期: 2013-01-10; 收到修改稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(60890200)、四川大学青年教师科研启动基金(2011SCU11068)

作者简介: 杨火木(1983—), 男, 博士, 主要从事新型激光技术方面的研究。E-mail: scuyhm@163.com

* 通信联系人。E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn

态激光器具有大的冷却面积/体积比,一维热传导且与光传输方向共路等优点,使得薄片激光器具有同时实现高效率、高功率和高光束质量激光输出的潜力,为全固态激光领域的一个研究热点^[2-4]。1994年,德国斯图加特大学的 Giesen 等^[5]提出了薄片激光器概念。随后,薄片激光器技术得到不断的发展^[6-8]。2008年,美国波音公司^[9]采用多片薄片 Yb:YAG 介质,实现了 27 kW 激光输出。目前,工业上使用的薄片激光器输出功率达到 16 kW,光束质量因子 $M^2 \approx 24$ ^[10]。

尽管薄片激光器具有以上优点,但研究显示,高平均功率运行的薄片激光器中依然存在严重的热效应^[11-13]。解决热效应的一个技术路线是“用最有效、不良影响最小的方法导出无用热”^[14],如采用液氮冷却工作物质在低温下工作^[15],采用特殊的夹持方式^[16],改进抽运均匀性^[17]等。在大多数薄片激光工作物质温度分布研究分析中,假设冷却液温度均匀分布。这种假设在低/中平均功率激光器中是合理的,但是在高平均功率激光器中,工作物质产热量非常大,冷却液吸收热量,在流动方向上冷却液的温度变化非常明显,导致激光工作物质在冷却液流动方向上形成不均匀温度分布^[18],引起工作物质变形和高阶热畸变。在高平均功率薄片激光器中,需要考虑该因素对激光工作物质温度分布的影响,尽量减小该因素的“不良影响”。

本文针对高平均功率薄片激光器,建立热-流-固多物理场耦合分析模型,排除了不精确的换热系数设定对计算结果的影响,采用有限元软件 Ansys 仿真分析了冷却及抽运过程中的流动、对流扩散和热传导过程,分析研究在不同抽运光功率、不同冷却液流速条件下冷却液流场特性和激光工作物质的温度分布。为验证仿真分析结果的有效性,在千瓦级薄片激光器上开展了实验研究。

2 理论研究

在激光晶体抽运和冷却过程中,涉及热传导、流动和对流扩散等过程。水/去离子水是目前用得比较多的是冷却液,它们可视为不可压缩粘性流,其运动方程为^[18]

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_f \mathbf{v} \cdot (\nabla \mathbf{v}) - \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\tau}') = \mathbf{b}_f, \quad (2)$$

式中 \mathbf{v} 是冷却液流速, ρ_f 是冷却液密度, \mathbf{b}_f 是单位体积冷却液所承受的体力, $\boldsymbol{\tau}'$ 为考虑湍流效应的

Reynolds 应力张量, $\boldsymbol{\sigma}$ 是 Cauchy 应力张量。在本文仿真分析中,采用标准的 $k-\epsilon$ 模型。在层流状态下, $\boldsymbol{\tau}' = 0$ 。在湍流状态下

$$\boldsymbol{\tau}' = -\frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} + 2\mu_t \mathbf{S}, \quad (3)$$

式中 k 为湍流动能, μ_t 为湍流粘性系数, \mathbf{I} 为二阶单位张量, \mathbf{S} 是形变速率张量。根据实际冷却通道结构、仿真模型和冷却液流速,主要针对湍流状态下的冷却进行分析。

冷却液的温度分布由对流-扩散方程决定

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T_f \right) = k_f \nabla^2 T_f + 2\mu_0 \mathbf{S} : \mathbf{S} + Q_f, \quad (4)$$

式中 T 为温度, c_f 为冷却液的比热, k_f 为冷却液的导热系数, μ_0 为动力粘度, $Q_f = 0$ 为冷却液体内的体热源。若(4)式中速度为零,则其变为固体中的热传导微分方程

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s + Q_s, \quad (5)$$

式中 ρ_s 和 c_s 分别为固体的密度和比热, k_s 为固体的导热系数。在流-固边界上,热耦合条件为^[18]

$$T_s = T_f, \quad (6)$$

$$k_s (\nabla T_s) \cdot \mathbf{n}_s = k_f (\nabla T_f) \cdot \mathbf{n}_f, \quad (7)$$

式中下标 s 和 f 分别表示固体和冷却液, \mathbf{n} 为耦合边界上的外法线矢量。在以往大多数研究中,将流-固耦合边界采用对流冷却边界

$$k_s (\nabla T_s) \cdot \mathbf{n}_s = -h(T_s - T_\infty), \quad (8)$$

式中 h 为换热系数, T_∞ 为冷却流体温度。(8)式的缺点在于难以准确地确定换热系数 h 的值。针对该问题,采用(4)式进行分析,避免了确定换热系数 h 的问题。综合以上各式,可对热-流-固多物理场进行耦合分析,同时得出冷却液流场分布和固-液整个系统的温度分布。由于空气自然对流换热能力远小于冷却液强制对流换热能力,忽略空气自然对流冷却的影响。对于冷却液,需要指定冷却液入口温度和出口相对压强。针对文中物理模型的复杂性,采用有限元软件 Ansys 进行仿真分析。

3 仿真分析

仿真中的模型如图 1 所示,铜热沉的尺寸为 40 mm×40 mm×21 mm,冷却通道的尺寸为 28 mm×2 mm,冷却液为纯净水,动态粘度为 $8.899 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$,增益介质为 Nd:YAG,焊接在热沉上端面,直径为 20 mm,厚度为 1 mm,

与冷却通道的距离为 1 mm。计算中用到的参数如表 1 所示。

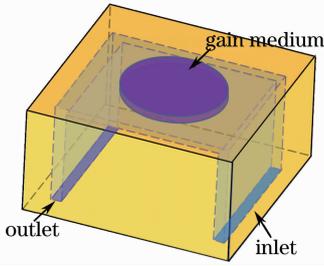


图 1 薄片激光器模型

Fig. 1 Model of disk-type laser

表 1 模拟分析中的各物理参量

Table 1 Physical parameters used in the simulation

Parameters	Tungsten-copper	Nd:YAG	Cooling water
Molar mass / (g/mol)	123.693	594	18.02
Density / (kg/m ³)	15500	4560	997
Specific heat / (J · kg ⁻¹ · m ⁻¹)	188	590	4181.7
Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	221	11	0.6069

3.1 冷却液流动特性

采用图 1 中的模型,假设工作物质总产热量为 300 W,分析结果对于 Yb:YAG 和 Nd:YAG 两种工作物质同样适用。假设工作物质内各点产热量均匀。冷却通道进出口条件中,假设冷却通道入口冷却液流速为 2 m/s,出口参考静压为 0 个大气压。模拟结果如图 2 所示。由图 2(a)可见,在两个流道转接口处,冷却液的流动速度较大。在激光器设计中应该关注这个问题。图 2(b)为流场的矢量图,反应了冷却通道中各点冷却液的流动方向。比较图 2(b)和图 2(c),在流道入口的外拐角处,冷却液流动速度相对比较慢,导致该点(A 点)冷却液温度比更靠近工作物质位置(B 点)的温度还要高些,如图 2(c)所示。冷却液在流动过程中逐渐吸收热量,此时,与冷却液的热扩散作用相比,工作物质向固液界面冷却液的传热占主导地位,导致冷却液温度逐渐升高(C 点)。在工作物质冷却末端(D 点)后方,工作物质向固液界面冷却液传递的热量减小,热扩散作用占据主导地位,所以冷却液温度在上升到最高点后又逐渐降低。

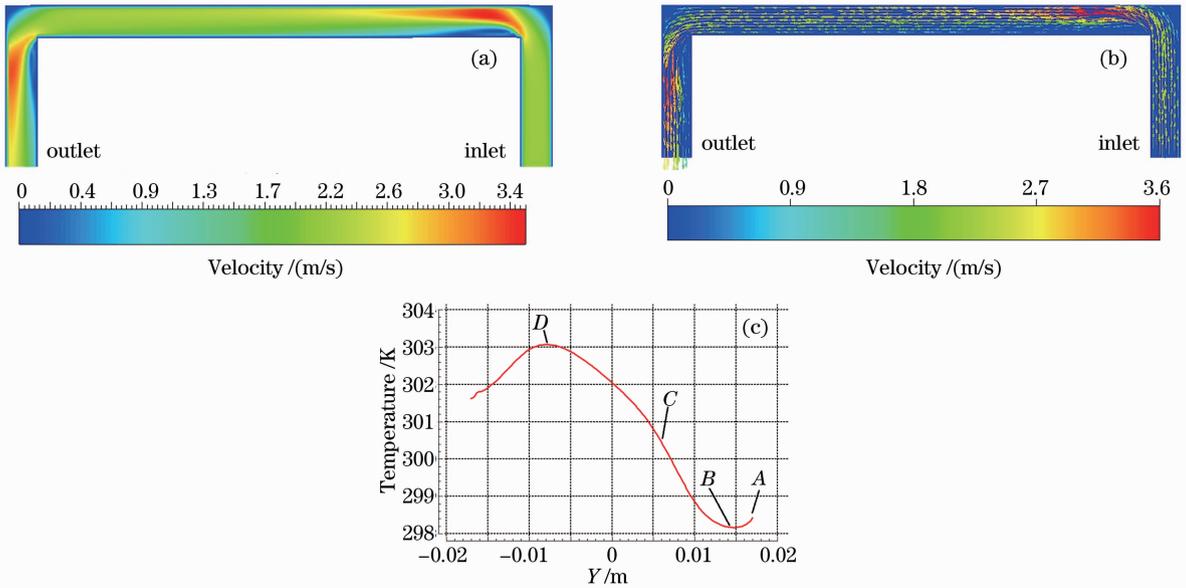


图 2 冷却液流动轴切面上冷却液流场分布及温度分布。(a) 冷却液流速分布图; (b) 冷却液流场矢量图; (c) 冷却液在固-液界面上的温度分布图

Fig. 2 Fluid flow field and temperature distributions on axial section of cooling channel.

(a) Cooling fluid velocity distribution; (b) cooling fluid flow field; (c) temperature distribution on fluid-solid interface

3.2 激光工作物质温度分布

在理论上,如果忽略冷却液温度的变化,且对薄片冷却面进行均匀冷却,那么对于各点均匀产热的薄片工作物质。其温度分布应该是工作物质轴上温度较高(考虑热沉的横向热传导)。在实际的高平均

功率薄片激光器中,产生的热量非常大,冷却液在流动过程中逐渐吸热导致温度升高的现象变得比较显著,使热沉和冷却液之间的热交换量也发生明显变化,导致工作物质的温度分布不再是与抽运光能量沉积分布相一致,在冷却液流动方向上呈现不对称

分布,工作物质的最高温度点在冷却液流动方向上出现移动,如图 3(a)所示。温度的不对称分布导致工作物质折射率不对称分布,引起高阶热畸变和复杂的热应力及热变形,对激光器性能存在影响。该负面作用在高平均功率激光器中会变得更加显著。

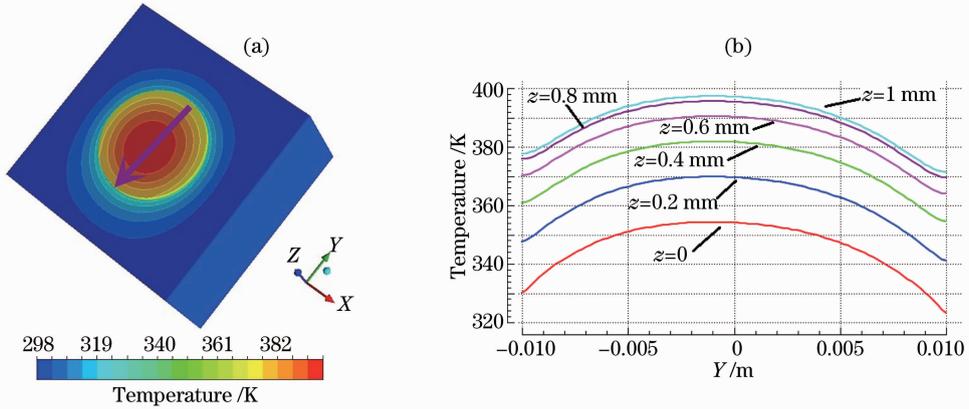


图 3 工作物质温度分布。(a) 模型的三维温度分布;(b)激光工作物质各层的温度分布 (介质厚度为 1 mm,冷却液由 Y 轴正方向流向负方向)

Fig. 3 Temperature distribution of gain medium. (a) Three-dimensional temperature distribution; (b) temperature distribution along fluid flowing direction on every slice of gain medium (thickness of gain medium is 1 mm, cooling fluid flow from positive direction of Y axis to negative direction)

3.3 抽运功率对激光工作物质温度分布的影响

模拟分析了不同抽运功率下工作物质的温度分布,产热量由 100 W 增加到 1000 W,其冷却液流速等条件保持不变。比较工作物质端面上的 Y 轴正方向上各点温度与负方向上对应各点温度的温差,模拟结果如图 4 所示。由图可见,随产热量的增加,工作物质温度分布在 Y 方向上的不对称性更加

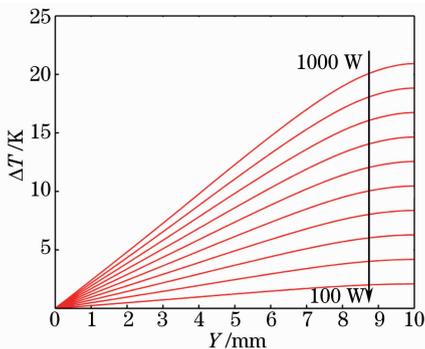


图 4 工作物质抽运端面上的 Y 轴正方向上各点温度与负方向上对应各点温度的温差(产热量由 100 W 增至 1000 W,每条曲线的产热量递增 100 W)

Fig. 4 Temperature difference along flowing direction on gain medium between positive direction and negative direction of Y axis (heat power increases form 100 W to 1000 W with increment of 100 W)

此外,仿真结果显示,由于薄片激光器增益介质厚度薄,薄片激光工作物质横截面上的温度相对分布基本一致,各层的最高温度点基本处于一条与薄片轴心平行的轴上,如图 3(b)所示。

显著,各点温差变化呈现出与产热递增量近线性递增的关系。由于热沉热传导和冷却液热扩散的作用,各条曲线在边缘处温差变化变得平缓。仿真结果还显示,在不同产热量条件下,如果其他条件保持不变,工作物质中最高温度点的位置基本不变。

3.4 冷却液流速对激光工作物质温度分布的影响

由(8)式可知,冷却液和热沉之间的热交换系数对工作物质温度分布有重要影响,冷却液流速是决定换热系数大小的一个重要因素。假设冷却通道入口处冷却液流速由 1 m/s 递增至 6 m/s(间隔为 0.5 m/s),产热量为 1000 W,其他条件保持不变。模拟得出的工作物质 Y 轴正方向上各点温度与负方向上对应各点温度的温差(抽运端面上)如图 5(a)所示。由图可见,当冷却液流速增至 3 m/s 后, Y 轴上的温差曲线呈现新的变化趋势,如图 5(a)所示。随着冷却液流速的增大,温差变化逐渐趋于一个固定的分布,当流速增大到 5 m/s 后,温差分布基本保持不变。模拟结果还显示,增大冷却液流速,最高温度点位置偏离薄片中心轴的距离逐渐减小,如图 5(b)所示。冷却液流速为 1 m/s 时,最高温度点偏离薄片中心轴 1.1 mm,冷却液流速为 6 m/s 时,最高温度点偏离薄片中心轴 0.3 mm,且近似线性变化,约流速每提升 1 m/s,偏离距离减小 0.16 mm。

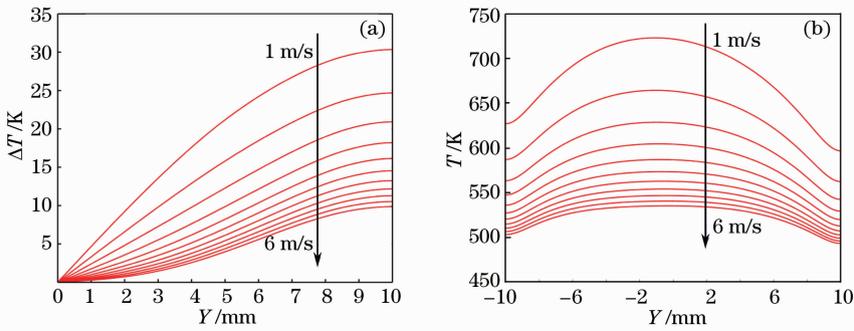


图5 冷却液流速对薄片工作物质温度分布的影响。(a) 工作物质Y轴正方向上各点温度与负方向上对应各点温度的温差;(b) Y轴上的温度分布

Fig. 5 Influence of cooling fluid flowing velocity on temperature on the gain medium. (a) Temperature difference along flowing direction on the gain medium between positive and negative directions of Y axis; (b) temperature difference on Y axis

4 实验结果

为验证理论分析结果,对千瓦级薄片激光器工作物质温度分布进行了测量。薄片工作物质直径为40 mm,厚度为1.3 mm。抽运源为 4×55 个二极管激光器阵列模块。采用柱透镜对二极管阵列快慢轴进行准直压缩,通过观察荧光分布保证抽运光沉积在冷却液流动方向上呈对称分布。抽运电流为80 A,通过调节抽运频率增加产热功率。采用红外热像仪测量温度分布,测量期间激光器未出光,避免激光振荡对实验结果的影响,实验结果如图6所示。可见,随着产热量的增加,工作物质温度分布在冷却液流动方向上呈非对称分布,出口段的温度分布明显高于入口段对应点的温度分布,最高温度点偏离薄片轴心位置。图中横坐标大于40 mm是由于测量时,红外热像仪镜头与激光工作物质端面之间存在一定倾斜角所致。

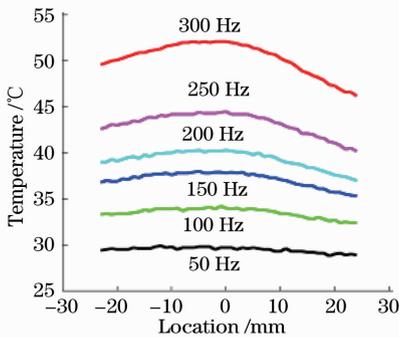


图6 薄片激光工作物质温度分布测量图

Fig. 6 Temperature distribution on disk gain medium

5 结论

针对大口径高功率薄片激光器,建立了热-流-

固多物理场耦合分析模型,仿真分析了不同抽运功率和不同冷却液流速下激光工作物质的温度分布和冷却液流场分布。采用该方法,获得了冷却液流场特性和温度分布。仿真结果表明,由于冷却液流场温度在流动方向上的变化引起薄片工作物质温度分布在冷却液流动方向上呈不对称分布,冷却液入口段的工作物质温度要相对低于对应的出口段温度,工作物质最高温度点偏离薄片中心轴。冷却液流速为2 m/s,产热量由100 W增至1000 W时,工作物质最高温度点位置不变,以薄片中心轴为原点,Y轴上各对应点温差随产热量的递增呈线性变化。保持其他条件不变,冷却液流速由1 m/s递增至6 m/s,以薄片中心轴为原点,Y轴上各对应点温差随冷却液流速变化呈非线性变化,温差分布逐渐趋于一固定分布,且最高温度点偏离距离随冷却液流速变化近线性变化。

参考文献

- 1 W Koechner. Solid State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer, 1999.
- 2 Q Liu, X Fu, D Ma, *et al.*. Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk laser[J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(10): 719-721.
- 3 A Giesen, J Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- 4 H Furuse, J Kawanaka, K Takeshita, *et al.*. Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG ceramics[J]. Opt Lett, 2009, 34(21): 3439-3441.
- 5 A Giesen, H Hügel, A Voss, *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1994, 58(5): 365-372.
- 6 C Stewen, K Contag, M Larionov, *et al.*. A 1 kW CW thin disc laser[J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(4): 650-657.
- 7 D C Brown, J M Singley, E Yager, *et al.*. Kilowatt class high-

- power CW Yb:YAG cryogenic laser[C]. SPIE, 2008, 6952: 69520k.
- 8 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo, *et al.*. 1.5 kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 35-38.
姚震宇, 蒋建锋, 涂波, 等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 35-38.
- 9 P V Avizonis, D J Bossert, M S Curtin, *et al.*. Physics of high performance Yb:AG thin disk lasers[C]. CLEO/QEC, 2009.
- 10 J Mende, E Schmid, J Speiser, *et al.*. Thin disk laser; power scaling to the kW regime in fundamental mode operation[C]. SPIE, 2009, 7931: 7931V.
- 11 A J Kemp, G J Valentine, D Burns. Progress towards high-power, high-brightness neodymium-based thin-disk lasers[J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(6): 305-344.
- 12 V Sazegari, M R J Milani, A K Jafari. Structural and optical behavior due to thermal effects in end-pumped Yb:YAG disk lasers[J]. Appl Opt, 2010, 49(36): 6910-6916.
- 13 Li Gang, Feng Guoying, Li Wei, *et al.*. Stress birefringence and thermal depolarization in Nd:YAG square thin slice laser media[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 38-43.
李刚, 冯国英, 李玮, 等. Nd:YAG 方形薄片激光介质应力双折射及退偏损失[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 38-43.
- 14 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- 15 S Tokita, J Kawanaka, M Fujita, *et al.*. Sapphire-conductive end-cooling of high power cryogenic Yb:YAG lasers[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2005, 80(6): 635-638.
- 16 Y Liao, R J D Miller, M R Armstrong. Pressure tuning of thermal lensing for high-power scaling[J]. Opt Lett, 1999, 24(19): 1343-1345.
- 17 Cai Zhen, Wang Xiaojun, Jiang Jianfeng, *et al.*. Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2437-2440.
蔡震, 王小军, 蒋建锋, 等. 薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2437-2440.
- 18 Wei Yongtao, Zhang Yuming, Tang Chun, *et al.*. Coupled analysis of temperature distribution in laser crystals pumped by repetitive pulses[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 912-916.
魏泳涛, 张玉明, 唐淳, 等. 重复脉冲抽运下激光晶体温度场的耦合分析[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 912-916.

栏目编辑: 宋梅梅