

千瓦级低透射波前畸变端抽运板条增益模块 技术研究

胡 浩 唐 淳 雷 军 李建民 李 密 石 勇 赵 娜 郭映臣 武德勇 吕文强 李 弋

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于端抽运板条增益模块的主振荡器功率放大(MOPA)是高平均功率激光二极管抽运激光器(DPL)发展的有效途径之一,近年来受到广泛关注。通过理论分析和数值模拟,建立了板条增益模块的设计模型,分析了板条增益模块的小信号增益系数、输出特性、温度和热应力等关键参数。研制的模块尺寸为 50 cm(长)×30 cm(宽)×20 cm(等),静态波前畸变为 0.22 μm(不包括倾斜),实验研究获得了均匀性约 94%的荧光分布,在占空比为 60%条件下,输出平均功率 1086.3 W,斜率效率 41.7%。

关键词 激光器;板条增益模块;端抽运;千瓦级

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102006

Study on kW-Class Small Wavefront Distortion End Pumped Slab Gain Module

Hu Hao Tang Chun Lei Jun Li Jianmin Li Mi Shi Yong Zhao Na Wu Yingchen
Wu Deyong Lü Wenqiang Li Yi

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The master oscillator power amplifier (MOPA) based on end pumped slab gain medium is one way to develop high average power laser diode pumped laser (DPL), attracts widespread attention in recent years. By using theoretical analysis and numerical simulation, the design models of slab gain module are established, and then the small-signal gain coefficient, the output characteristics, the temperature and the thermal stress of the slab gain module are obtained. The size of module is 50 cm(length)×30 cm(width)×20 cm(height). The static wavefront distortion is 0.22 μm (excluding tilt). The uniformity of fluorescence distribution is achieved by 94%. The average output power is achieved by 1086.3 W at duty cycle of 60%, and the slope efficiency is 41.7%.

Key words lasers; slab gain module; end pumped; kW-class

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3530

1 引 言

增益模块的均匀抽运、高效热管理和低透射波前畸变是困扰高平均功率固体激光器发展的关键因素,为解决该问题,相关科研人员发展了板条、薄片、光纤、热容等技术途径,并取得了重大进展^[1~9]。基于端抽运板条增益模块的主振荡器功率放大(MOPA)是高平均功率激光二极管抽运激光器(DPL)发展的有效途径之一,近年来受到广泛关注。2005年 Northrop Grumman 公司的两路相干合成

Nd:YAG 板条 MOPA DPL 获得了 27 kW 的平均输出功率,工作时间达 350 s,在输出功率 19 kW 时,光束质量(BQ)优于 2 倍衍射极限^[8]。2008 年采用 7 路相干合成获得了 105 kW 平均输出功率,光束质量约 3 倍衍射极限^[9]。该激光器的每路放大器链由 4 个传导冷却、端抽运的 Nd:YAG 板条增益模块组成,端抽运板条增益模块透射波前畸变峰谷(PV)值约 2.5 μm,稳腔输出功率约 4 kW^[8,9]。

为此,本文建立了板条增益模块的设计模型,分

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-09-20

作者简介: 胡 浩(1979—),男,助理研究员,主要从事激光二极管抽运高平均功率固体激光器方面的研究。

E-mail: haozilpp@sohu.com

析了板条增益模块的小信号增益系数、输出特性、温度和热应力等关键参数,并通过实验研究验证了系统的特性。

2 端抽运板条增益模块设计模型

图 1 为增益模块示意图。介质采用键合板条,

板条中间为掺杂 Nd:YAG 作为增益区,板条两端键合白 YAG,白 YAG 对抽运光不吸收,因此允许从端面抽运;板条端面切角 45° ,抽运光从板条端面抽运,抽运光经端面反射后进入板条。板条两表面对称焊接在两冷却器上进行冷却。

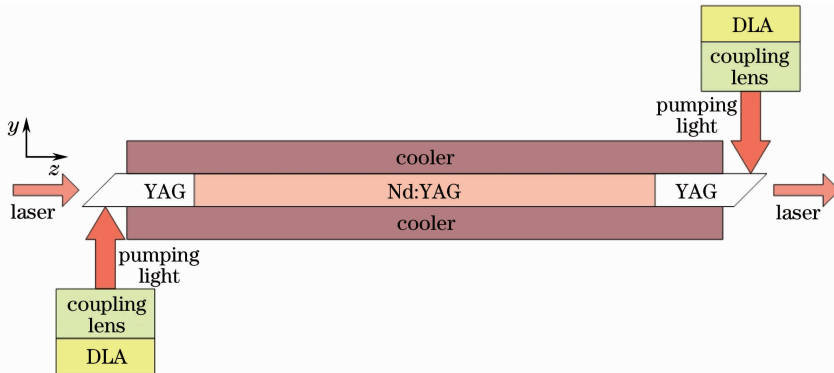


图 1 端抽运板条增益模块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of end pumped slab laser

3 板条增益模块理论分析

3.1 几何尺寸关系

激光在板条内的传播示意图如图 2 所示。板条形状为平行四边形,端面切角为 45° ,入射激光与端面法线夹角为 θ ,板条长度要满足激光在板条内偶数次全反。

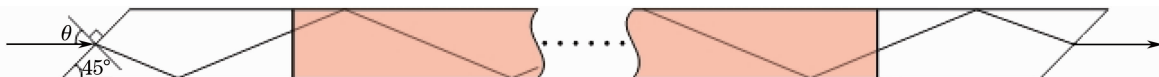


图 2 激光在板条内的传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser beam path in slab

板条长度与入射激光角度和板条厚度之间的关系为

$$L_{\text{slab}} = \frac{nt}{\tan\left[45^\circ - \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{n_{\text{YAG}}}\right)\right]} + t, \quad (1)$$

式中 L_{slab} 为板条长度; n 为反射次数,取偶数; t 为板条厚度; n_{YAG} 为 YAG 晶体折射率。

3.2 板条增益模块小信号增益系数

板条增益的模块小信号增益系数可表示为^[10]

$$g_0 = \frac{P_{\text{peak}} \eta_{\text{oc}} \eta_{\text{ab}} \eta_{\text{Q}} \eta_{\text{S}}}{I_s V}, \quad (2)$$

式中 P_{peak} 为抽运光峰值功率; η_{oc} 为耦合效率; η_{ab} 为吸收效率; η_{Q} 为量子效率; η_{S} 为斯托克斯效率; I_s 为饱和光强; V 为介质增益体积。

3.3 板条增益模块稳腔输出

板条增益模块在最佳耦合输出时的激光输出为^[10]

$$P = D_t \eta_B g_0 l I_s A [1 - \sqrt{L/(2g_0 l)}]^2, \quad (3)$$

式中 D_t 为占空比; η_B 为交叠效率; l 为增益长度; A 为板条截面积; L 为损耗。

3.4 板条增益模块温度和热应力

板条增益介质通过上下表面进行冷却,假定板条增益介质的热传导只发生在厚度方向,忽略宽度和长度方向上的热传导。选取直角坐标系使 x 、 y 和 z 分别沿宽、厚和长的方向。板条厚度为 t 。用 $t/2$ 对 y 归一化得到沿厚度 y 方向的稳态温度分布为^[10,11]

$$T(y) - T_c = \frac{Qt}{2h} + \frac{Qt^2}{8\kappa}(1 - y^2), \quad (4)$$

式中 T_c 为冷却液温度, Q 为热沉积功率密度, h 为上下表面的表面换热系数, κ 为 Nd:YAG 介质的热导率(取 $0.13 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。

(4)式表明,在板条中心 $y=0$ 处温度最高:

$$T(0) = T_c + \frac{Qt}{2h} + \frac{Qt^2}{8\kappa}, \quad (5)$$

在板条上下表面 $y = \pm 1$ 处温度最低：

$$T(\pm 1) = T_c + \frac{Qt}{2h}, \quad (6)$$

板条中心与表面的温差为

$$\Delta T = \frac{Qt^2}{8\kappa}. \quad (7)$$

由热弹性理论,利用(4)式可得热应力沿 x 、 y 和 z 方向的分量 σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{zz} 为^[10,11]

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \frac{\alpha EQt^2}{8(1-\nu)\kappa} \left(y^2 - \frac{1}{3} \right),$$

$$\sigma_{yy} = 0, \quad (8)$$

式中热膨胀系数 $\alpha = 7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; 弹性模量 $E = 3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$; 泊松比 $\nu = 0.28$ 。

在板条表面 $y = \pm 1$ 处,板条热应力为

$$\sigma_{xx} \Big|_{y=\pm 1} = \sigma_{zz} \Big|_{y=\pm 1} = \frac{\alpha EQt^2}{12(1-\nu)\kappa}, \quad (9)$$

在板条中心 $y=0$ 处,板条热应力为

$$\sigma_{xx} \Big|_{y=0} = \sigma_{zz} \Big|_{y=0} = -\frac{\alpha EQt^2}{24(1-\nu)\kappa}. \quad (10)$$

4 板条增益模块温度与热应力数值模拟

激光二极管阵列从两端抽运,板条增益介质在长度方向不同位置厚为 dx 的微元段的热沉积功率密度分布为^[3~5]

$$dP_d(x) = \frac{D_t P_{\text{peak}} \eta_{\text{oc}} \eta_n}{2} \{ \exp(-\alpha_D \cdot x) + \exp[-\alpha_D (l-x-dx)] \} \times [1 - \exp(-\alpha_D \cdot dx)]. \quad (11)$$

式中 α_D 为吸收系数; η_n 为产热比,未提前条件下取 0.41 ^[10]。

板条尺寸为 $150.2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 掺杂区域长 120 mm , 吸收系数 0.25 cm^{-1} ; 两边各有 15.1 mm 的白 YAG, 切割角度 45° 。抽运源采用 4 个准连续激光二极管阵列, 每个准连续激光二极管阵列由 20 bar 组成, 总峰值抽运功率 4800 W , 占空比 60% , 耦合效率 95% 。利用(11)式得到的板条长度方向热沉积功率密度分布如图 3 所示。从图中可看出,热沉积功率密度最大的位置出现在掺杂板条的两端,最大达到 $289.4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

假设冷却液温度为 300 K , 表面换热系数为 $4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在掺杂板条的两端,利用(4)式可以得到厚度方向的温度分布,如图 4 所示。厚度方向温度呈抛物线对称分布,在 $y=0$ 处温度最高为 326 K 。

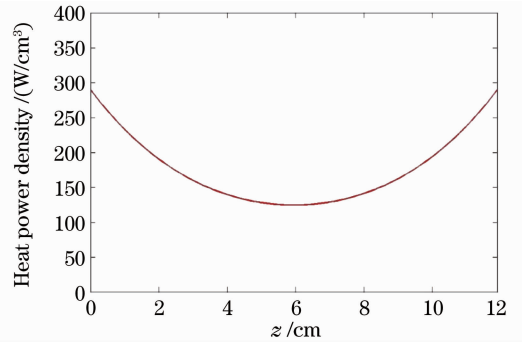


图 3 端抽运板条长度方向热沉积功率密度
Fig. 3 Heat power density versus length in end pumped slab

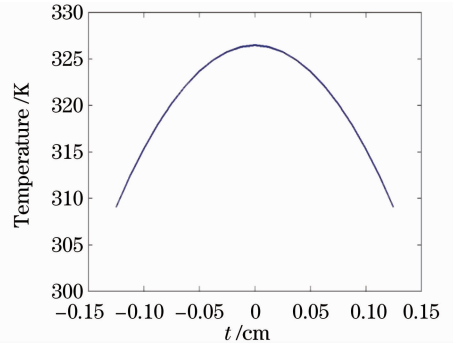


图 4 掺杂板条两端厚度方向的温度分布

Fig. 4 Temperature versus thickness at doped slab's end

将由(11)式得到的板条长度方向的热沉积功率密度代入(5)式,得到 $y=0$ 处的温度与板条长度方向位置的关系,如图 5 所示。(5)式表明 $y=0$ 处的温度与热沉积功率密度成线性关系,因此图 5 与图 3 的曲线形状类似。综合图 4 和图 5 可得板条的最高温度在掺杂板条两端的中间位置。

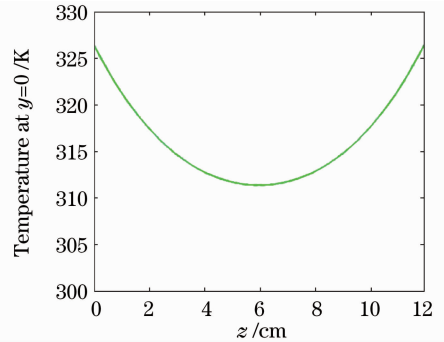


图 5 $y=0$ 处的温度与板条长度方向不同位置的关系

Fig. 5 Temperature at $y=0$ versus length in slab

利用(8)式和得到的掺杂板条端面的热沉积功率密度,可得到掺杂板条端面厚度方向的热应力分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 的分布,如图 6 所示。掺杂板条端面热应力分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 的最大值在上下两边,最大值为 $362 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

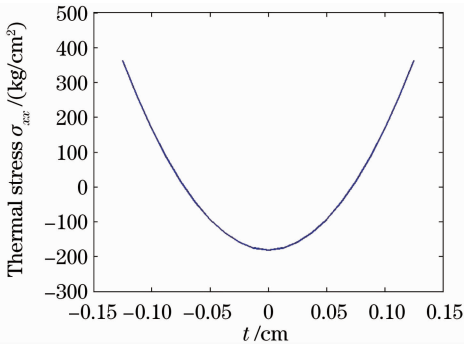


图 6 掺杂板条端面厚度方向的热应力 σ_{xx} 的分布

Fig. 6 Thermal stress σ_{xx} versus thickness at doped slab's end

将由(11)式得到的板条长度方向的热沉积功率密度代入(9)式,得到 $y = \pm 1$ 处的热应力分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 与板条宽度方向位置的关系,如图 7 所示。从图 6 和图 7 可知板条热应力分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 的最大值出现在掺杂板条端面和上下表面相交的棱边附近。

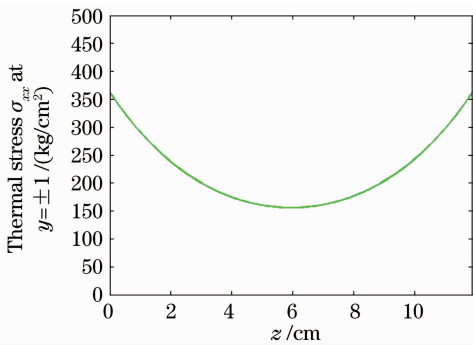


图 7 $y = \pm 1$ 处热应力 σ_{xx} 与板条长度不同位置的关系

Fig. 7 Thermal stress σ_{xx} at $y = \pm 1$ versus length in slab

板条安全系数约为 0.25, 适合长时间连续工作。

5 实验研究

端抽运板条增益模块尺寸为 $150.2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 掺杂区域长度为 120 mm, 掺杂原子数分数为 0.1%。板条两大面焊接在铜微通道冷却器上进行冷却。抽运源为 2 个 $2 \times 20 \text{ bar}$ 准连续激光二极管阵列, 激光二极管阵列总峰值抽运功率 4783 W, 占空比 60% (重复频率 60 Hz, 抽运脉冲脉宽 10 ms), 抽运耦合效率约 95%。图 8 为焊接后板条; 图 9 为研制完成的板条增益模块, 其外型尺寸为 50 cm (长) $\times 30 \text{ cm}$ (宽) $\times 20 \text{ cm}$ (高)。

板条静态波前测量光路如图 10 所示。所使用光源波长为 532 nm 的标准光源, 标准光源直接通过板条, 再由哈特曼传感器 (微透镜参数为 $D =$

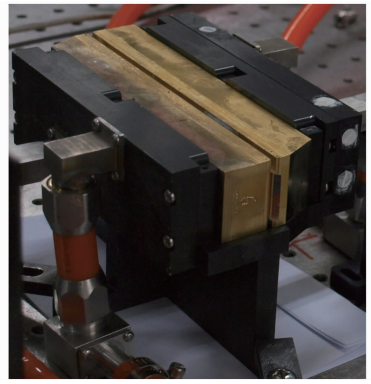


图 8 焊接后板条

Fig. 8 Soldering slab



图 9 板条增益模块

Fig. 9 Slab gain module

0.108 mm, $F = 2.67 \text{ mm}$) 测出子孔径光斑; 由于系统无额外的像差, 标准光源自身的像差非常小, 可忽略不计, 测得的波前畸变即为板条激光模块静态透射波前畸变。由于 CCD 靶面较小, 调节升降台, 测量多次, 然后通过软件将各部拼接所得波前为图 11 (消整体倾斜), 静态透射波前畸变 PV 为 $0.22 \mu\text{m}$ 。

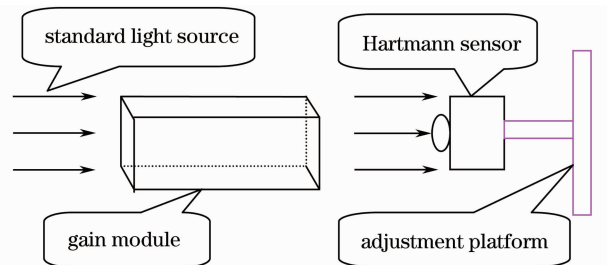


图 10 板条波前测量示意图

Fig. 10 Schematic diagram of measure transmission wavefront distortion

图 12 是板条端面荧光分布, 其均匀性达到 94%。

图 13 为占空比 60%、两端抽运电流 100 A、不加腔时板条侧面温度分布。板条掺杂区最高温度接近 $50.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 温升约 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 略大于数值计算温升

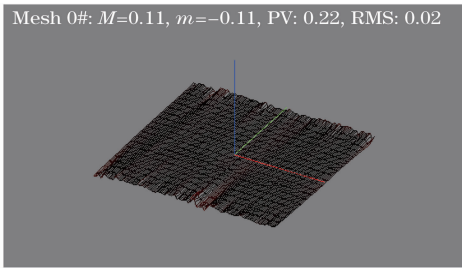


图 11 板条静态透射波前畸变

Fig. 11 Static transmission wavefront distortion

26 ℃的结果。分析认为是放大自发辐射(ASE)在板条侧面的产热导致实际温升大于数值模拟结果。板条尖角温度最高位56.1 ℃,分析认为是抽运漏光和 ASE 在尖角的共同作用导致尖角温升。

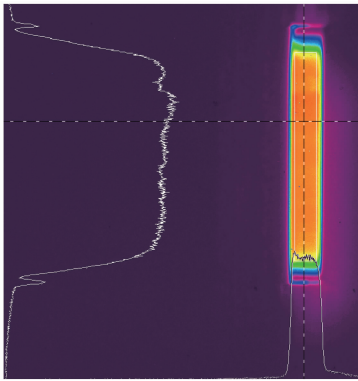


图 12 板条端面荧光分布

Fig. 12 Fluorescence distribution at slab end

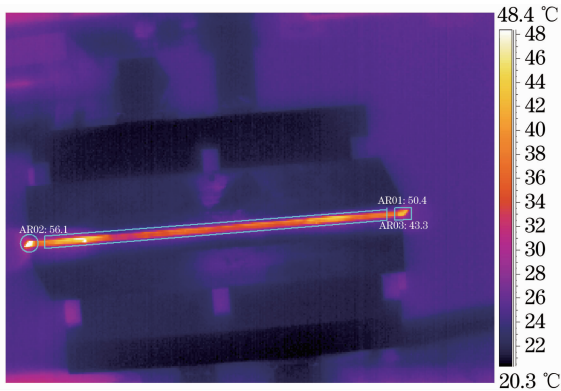


图 13 板条侧面温度分布

Fig. 13 Temperature distribution at slab side

谐振器通过分析后选用反像谐振腔,输出镜为平面镜,透射率为 50%,全反镜为曲率半径 $R=5\text{ m}$ 的凹镜,激光光轴与板条端面法线的夹角 $\theta=35.2^\circ$,谐振腔总长约为 84 cm,在腔内板条两侧分别正交放置焦距约 172 mm 的柱透镜。图 14 是在双边加载、工作电流为 90 A、占空比 60%条件下,输出功率的测量曲线。分析结果表明输出平均功率1086.3 W,10 min内的功率稳定性优于 1.5% RMS(均方根

值),斜率效率达到 41.7%。

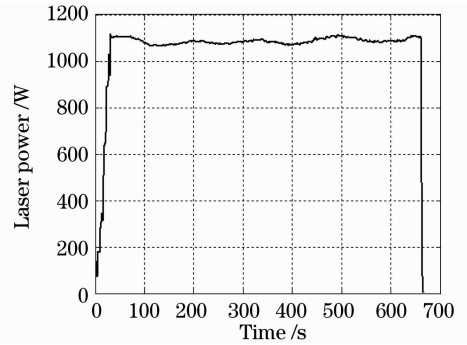


图 14 输出功率测量曲线

Fig. 14 Output power versus time

6 结 论

通过理论分析和数值模拟,建立了端抽运板条增益模块的设计模型。开展了板条增益模块热力学特性理论分析和数值模拟。研制的模块尺寸为 50 cm(长) \times 30 cm(宽) \times 20 cm(高),静态波前畸变为 0.22 μm (不包括倾斜),实验获得了均匀性约 94%的荧光分布,在占空比 60%条件下,稳腔输出功率 1086.3 W,连续出光时间 634 s,斜率效率 41.7%。

致谢 在本工作完成过程中,得到高清松研究员、向汝建副研究员、高松信副研究员、王小军副研究员、唐兵副研究员、马毅副研究员、姚震宇研究员、裴正平助理研究员、杜应磊研究实习员、孙殷宏助理研究员、李德明助理研究员、蒋建峰助理研究员、王亚丽助理研究员、涂波助理研究员,以及 DL 封装组多位同志的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Tang Chun. Review on high brightness high average power solid-state laser technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 488~496
唐 淳. 高亮度高平均功率固体激光器技术评述[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 488~496
- 2 Su Yi. New challenges for high energy laser technology [J]. *Physics*, 2011, **40**(2): 107~111
苏 毅. 高能激光技术进展与面临的挑战[J]. *物理*, 2011, **40**(2): 107~111
- 3 Hu Hao, Jiang Jiangfeng, Lei Jun *et al.*. Diode laser side pumped kW-class Nd: YAG slab laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 30~33
胡 浩, 蒋建锋, 雷 军等. 千瓦级二极管激光侧面抽运 Nd: YAG 板条激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 30~33
- 4 Hu Hao, Tu Bo, Jiang Jiangfeng *et al.*. Numerical simulation of thermodynamics in laser medium for heat capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(s0): 180~184
胡 浩, 涂 波, 蒋建锋等. 热容激光器激光介质的热力学数值

- 模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(s0): 180~184
- 5 Hu Hao, Cai Zhen, Jiang Jianfeng *et al.*. Numerical simulation of thermodynamics in cooling for heat capacity laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1507~1511
胡 浩, 蔡 震, 蒋建锋等. 热容激光器冷却过程的热力学数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1507~1511
- 6 Cai Zhen, Jiang Jianfeng, Hu Hao *et al.*. Kilowatt high power heat capacity laser with 3 times diffraction limit[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2266~2271
蔡 震, 蒋建锋, 胡 浩等. 千瓦级3倍衍射极限的高功率热容激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2266~2271
- 7 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
- 8 Gregory D. Goodno. 19-kW Phase-locked MOPA Laser Array. <http://www.northropgrumman.com>. 2006
- 9 Photo Release-Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts From a Solid-State Laser. <http://www.northropgrumman.com>. 2009
- 10 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Chen Guoxiang translation. Beijing: Science Press, 2002. 82
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 82
- 11 Lü Baida. Solid-State Lasers [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002

栏目编辑: 宋梅梅