

文章编号: 0258-7025(2009)09-2266-06

# 千瓦级 3 倍衍射极限的高功率热容激光器

蔡 震<sup>1</sup> 蒋建锋<sup>1</sup> 胡 浩<sup>1</sup> 涂 波<sup>1</sup> 周唐建<sup>1</sup> 曹丁象<sup>2</sup> 唐 淳<sup>1</sup> 张 凯<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 开展了热容激光器光束质量控制研究,进行了耦合系统的优化设计,采用了透镜压缩结合波导匀化的设计思想,使抽运均匀性提高到 90% 的水平;进一步建立了有源非稳腔的理论分析模型,针对热容激光器的抽运条件开展了非稳腔的优化设计,实验结果表明实现了 2.7 倍衍射极限的千瓦级热容激光输出。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 光学畸变; 热容; 光束质量

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2266

## Kilowatt High Power Heat Capacity Laser with 3 Times Diffraction Limit

Cai Zhen<sup>1</sup>, Jiang Jianfeng<sup>1</sup> Hu Hao<sup>1</sup> Tu Bo<sup>1</sup> Zhou Tangjian<sup>1</sup>  
Cao Dingxiang<sup>2</sup> Tang Chun<sup>1</sup> Zhang Kai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In order to get uniform gain distribution to reduce thermal effect, coupling system was optimistically designed by means of lens compression and wave-guide equality to improve the uniform of gain distribution to 90%. The numerical simulation module on unsteady resonator was established to analyze the change of the beam quality with time in heat capacity laser. The experimental results show that kilowatt level of burst power with 2.7 times diffraction limit is gotten.

**Key words:** lasers; solid-state laser; optical distortion; heat-capacity; beam quality

## 1 引 言

热效应带来的光学畸变是困扰固体激光器实现高光束质量输出的一个主要原因,对于热容激光器而言,由于激光器在出光时对晶体不冷却,这大大减少了冷却过程带来的温度梯度、应力梯度所引起的光学畸变<sup>[1~4]</sup>,有利于激光器实现高功率、高光束质量输出。但需要指出的是当激光介质的抽运加载不均匀时,在热容固体激光器内部仍然会产生温度梯度和应力梯度,从而对激光器的输出功率、光束质量带来影响<sup>[5~8]</sup>。另外针对热容激光器废热持续积累的特点,其热效应也呈现出动态变化的趋势,因此为了实现高光束质量的激光输出,必须在改善抽运均匀性的同时优化谐振腔的设计。

## 2 耦合系统优化设计

对于热容固体激光器而言,由于抽运均匀性直接与激光介质的温度分布、应力分布相关联,因此它不仅会影响到激光器能否实现高光束质量的激光输出以及激光器的能量转换效率,同时由于热容激光器的热分布是动态变化的,因此,当抽运均匀性不好时会大大增加激光器光学畸变补偿的难度。

为了减少抽运不均匀对激光器波前畸变带来的影响,开展了抽运与耦合系统的优化设计,为了将大口徑抽运光耦合到小尺度激光介质中,首先采用了正交柱透镜组对抽运光进行压缩的耦合方式,耦合结构的原理如图 1 所示。激光二极管的光通过微透镜后经柱透镜汇聚到抽运区 *ab* 上,设计中采用柱透

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2009-01-06

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金项目(2004Z0405)和国家自然科学基金重大项目(60890201)资助课题。

作者简介: 蔡 震(1970—),男,博士,副研究员,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: caizhen513@sohu.com

镜将激光二极管叠阵中每个 bar 的光展宽使其充满整个抽运区,再让每个 bar 的光在抽运区叠加,这样可以降低叠阵中各个 bar 平行度一致性的要求。但由于每个激光二极管的分布是高斯型的,其展宽、叠加之后仍然类似高斯分布,因此很难获得均匀的增益分布。单纯采用柱透镜压缩所得到的抽运区光斑分布如图 2 所示,从图 2 可以看出,光斑中心的光强分布比较均匀,但边缘的陡度不好,光斑的整体分布曲线类似梯形分布,这不仅使介质产生径向温度梯度,同时对介质端面形变影响较大。

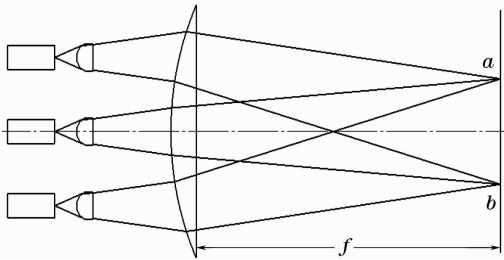


图 1 柱透镜耦合原理图

Fig. 1 Principle of column lens coupling

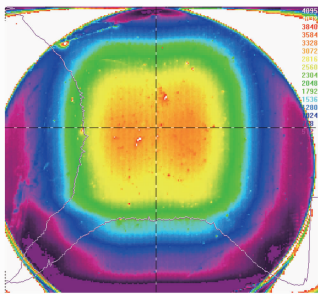


图 2 抽运区光斑荧光分布

Fig. 2 Distribution of pumping light

为了进一步改善抽运光斑的均匀性,研究中采用了光波导结构对经柱透镜压缩后的抽运光斑进行匀化。波导对光斑的匀化原理如图 3 所示。光斑在通过波导后根据反射角的不同被分割成小光斑,小光斑在波导的出口端进行强弱互补叠加,最终在波导的输出端得到一个光强空间均匀分布。

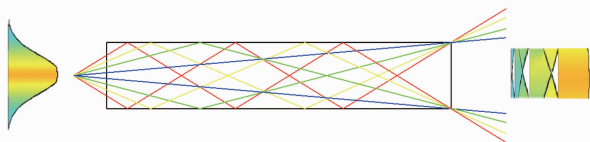


图 3 波导匀化原理图

Fig. 3 Principle of wave-guide

采用波导匀化的耦合系统组成如图 4 所示,激光二极管叠阵通过一对正交柱透镜聚焦后进入到光波导中,紧贴光波导输出端面放置的是热容激光介质。通过光学追迹对波导的长度及口径进行了优化

设计,数值模拟出的光斑分布如图 5 所示。

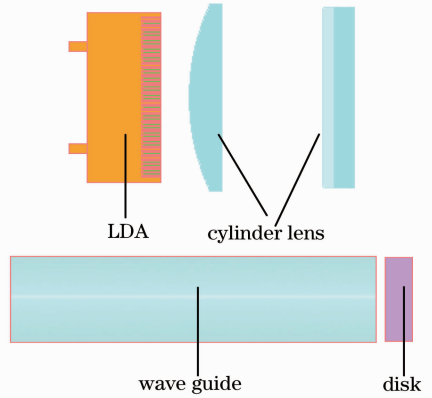


图 4 激光器匀化耦合系统

Fig. 4 Uniform coupling system

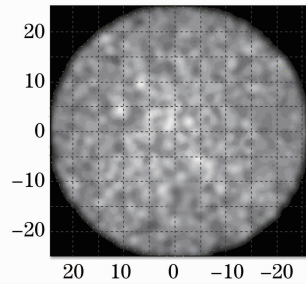


图 5 匀化光斑模拟结果图

Fig. 5 Simulation result of pumping light

实验结果表明在采用匀化系统后激光介质的荧光分布得到大幅度改善(如图 6 所示),均匀性优于 90%,这对于进一步开展热容光束质量控制技术研究具有重要意义。

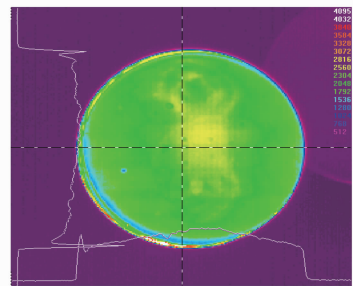


图 6 匀化光斑实验结果

Fig. 6 Experimental result of pumping light

### 3 有源非稳腔理论分析模型及数值模拟

采用非稳腔是激光器获得高光束质量激光输出的一条重要技术途径,非稳腔的本征基模为球面波(共焦型非稳腔情况为平面波),它有大的可控模体积,横模鉴别力强,是高增益激光介质常选用的一类腔型。尤其是腔内无实焦点的正支虚共焦非稳腔,已获得广泛应用。

从菲涅耳-基尔霍夫衍射积分出发,可以建立一个描述光学谐振腔特性的本征积分方程。利用这个方程原则上可以求得任意光腔的模参数,包括腔模的场振幅、相位分布、谐振频率和衍射损耗等。虽然本征积分方程的解的存在性在数学上已严格证明是无疑的,但是迄今只在少数情况下求出了解析形式的解,在大多数情况下,需要数值解。

光学谐振腔的本征积分方程可表示为

$$\gamma_1 E_1(x_1, y_1) = \frac{i}{\lambda L} \int_{s_2} E_2(x_2, y_2) \exp(-ik\rho) ds_2, \quad (1)$$

$$\gamma_2 E_2(x_2, y_2) = \frac{i}{\lambda L} \int_{s_1} E_1(x_1, y_1) \exp(-ik\rho) ds_1, \quad (2)$$

其中  $\gamma_i$  为本征值,  $L$  为腔长,  $k$  为波矢。

有源非稳腔的计算模型如图 7 所示,将介质分为  $m$  层,介质总长度为  $L$ ,则每一层的厚度为  $d = L/m$ ,对介质内部的每一层考虑到饱和效应的影响有

$$E = E_0 \exp\left[\frac{1}{2} \left( \frac{g_0}{1 + I/I_s} - \alpha \right) dl\right], \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为介质的吸收损耗系数,  $I_s$  为饱和光强。计算模型为了简化分析模型,将其对光束传输带来的影响简化为薄透镜  $f$ 。含增益介质的谐振腔内光场的一个往返过程可描述为

$$E_1 = 1,$$

$$E_2(x, y) = F^{-1} \left\{ F \left\{ E_1(x, y) \exp \left[ \frac{-jk(x^2 + y^2)}{R_1} \right] \right\} \exp \left[ j \frac{2\pi Z_1}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\},$$

$$E_{i+1}(x, y) = E_i(x, y) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{g_0}{1 + |E_i(x, y)|^2 + |E_{(2m+4-i)}(x, y)|^2} - \alpha \right] dl \right\},$$

( $i = 2, 3, \dots, m+1$ )

$$E_{3+m}(x, y) = F^{-1} \left\{ F \left\{ E_{2+m}(x, y) \exp \left[ -j \frac{\pi(x^2 + y^2)}{2f\lambda} \right] \right\} \exp \left[ j \frac{2\pi Z_2}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$E_4(x, y) = F^{-1} \left\{ F \left\{ E_{3+m}(x, y) \exp \left[ \frac{-jk(x^2 + y^2)}{R_2} \right] \right\} \exp \left[ j \frac{2\pi Z_2}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\},$$

$$E_{i+1}(x, y) = E_4(x, y) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{g_0}{1 + |E_i(x, y)|^2 + |E_{(2m+4-i)}(x, y)|^2} - \alpha \right] dl \right\},$$

( $i = 4 + m, \dots, 2m + 2$ )

$$E_{5+2m} = F^{-1} \left\{ F \left\{ E_{4+2m}(x, y) \exp \left[ \frac{-j\pi(x^2 + y^2)}{2f\lambda} \right] \right\} \exp \left[ j \frac{2\pi Z_1}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\},$$

$$E_1(x, y) = E_{5+2m}(x, y),$$

式中  $R_{1,2}$  为腔镜曲率半径。

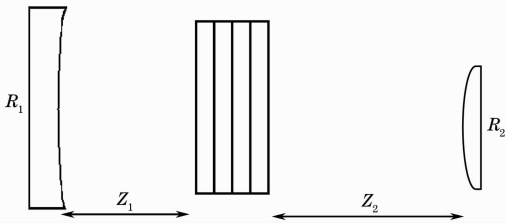


图 7 非稳腔计算模型

Fig. 7 Simulation module of unstable cavity

利用上述计算模型,代入激光器的小信号增益系数及根据热力学分布所计算出的不同时刻下激光介质的等效热焦距,计算了当凹镜为 10 m,凸镜为 8 m,遮拦孔径为 16.5 mm,腔长为 1 m 时,15% 占空比下激光器输出光斑随时间的变化规律。

图 8(a)为激光器输出光斑的近场分布,从图中可

看出激光器的近场光斑为环形空心光束,其内径与凸镜的遮拦孔径一致为 16.5 mm,外径约为 20.6 mm,内外径之比等于非稳腔的放大倍率。图 8(b)为输出光斑经透镜聚焦后的三维分布,其中心突起的部分为零级艾里斑的相对强度分布。图 9 为输出光斑聚焦后其远场光斑环围能量随时间的变化情况,图中纵坐标为能量百分比,横坐标为光斑半径,随着激光器连续工作的延长其远场光斑的口径不断变大。图 10(a)为远场光斑随工作时间变化的数值模拟曲线,图 10(b)为在  $R_1 = 10$  m,  $R_2 = 8$  m,遮拦直径 16.5 mm,重复频率 500 Hz,脉宽 300  $\mu$ s 实验条件下测量出的远场光斑随工作时间的变化曲线。通过将数值模拟结果与实验结果进行对比,可以看出二者吻合较好。实验结果显示当激光器连续工作 0.5 s 时,其远场光斑的口径约为 1.45 mm,当激光器连

续工作 1 s 时,其远场光斑的口径约为 1.7 mm,随着时间的延续其远场光斑越来越大,当激光器连续工作 2 s 时,其远场光斑的口径变为 2.4 mm,远场

光斑几何尺寸随时间的不断变大对应着激光器光束质量随着时间的推移在不断变差。

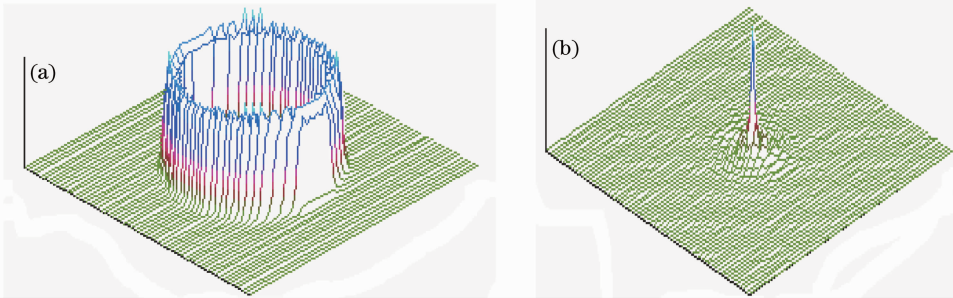


图 8 凹镜为 10 m,凸镜为 8 m,遮拦孔径为 16.5 mm 时激光器的光斑。(a)近场分布;(b)远场分布

Fig. 8 Light spot of laser. (a) distribute of light spot in near field; (b) distribute of light spot in far field

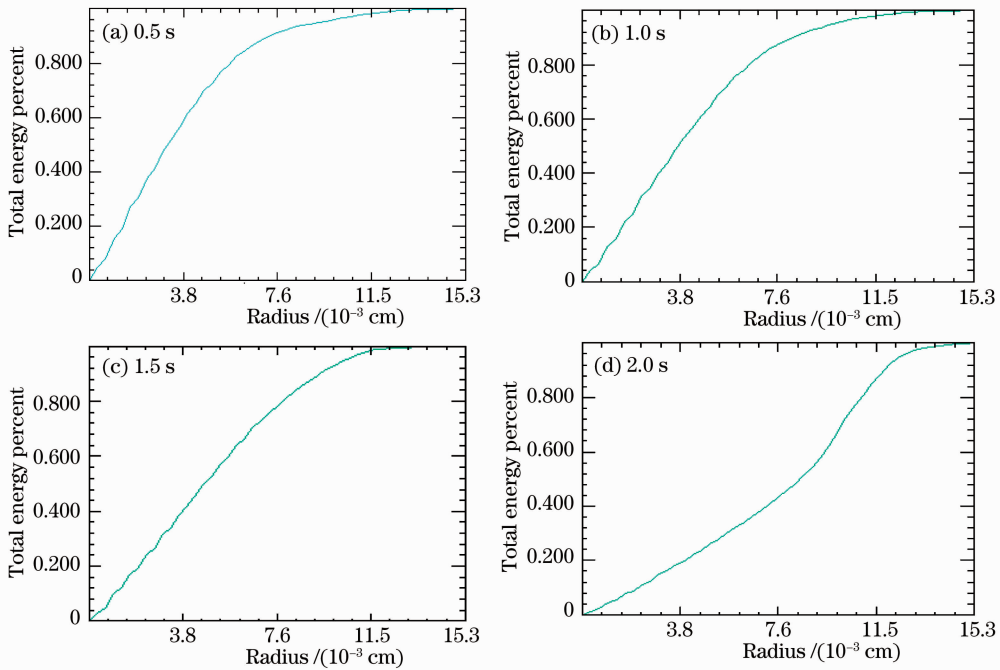


图 9 不同时刻下激光器远场光斑环围能量分布数值模拟结果

Fig. 9 Simulation result of distribution of energy at different time

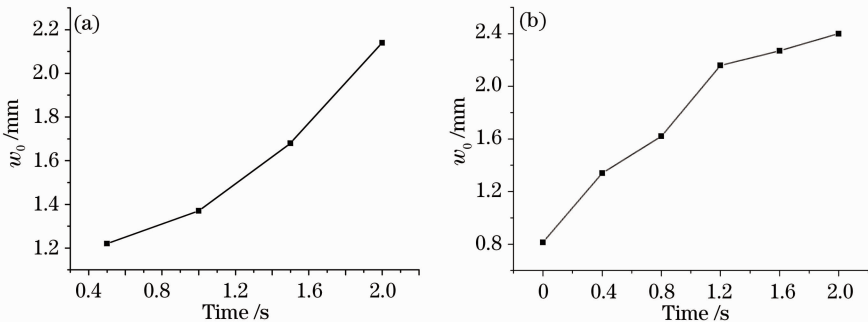


图 10 远场光斑口径随时间的变化规律。(a)数值模拟结果;(b)实验结果

Fig. 10 Spot size versus time. (a) simulation result; (b) experimental result

利用上述理论模型开展了非稳腔的优化设计。数值模拟结果显示在全口径抽运、抽运光斑的均匀性为 90% 时,采用放大倍率为 1.4,腔长为 1 m 的非稳腔,激光器可实现光束质量优于 3 倍衍射极限的输出。图 11 为全口径抽运状态下激光束光束质量随时间变化的数值模拟结果,模拟结果显示当激光器连续工作 0.5 s 时,其远场光斑的光束质量为 1.6,当连续工作时间为 1 s 时,其远场光斑的光束质量为 2.2 倍衍射极限,当激光器连续工作

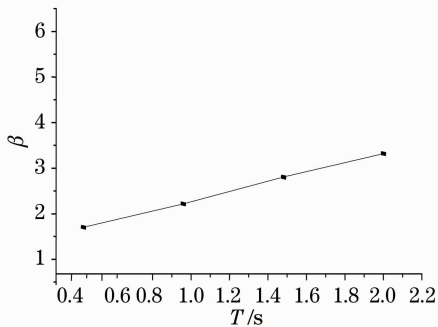


图 11 光束质量随时间变化的模拟结果

Fig. 11 Simulation result of beam quality versus time

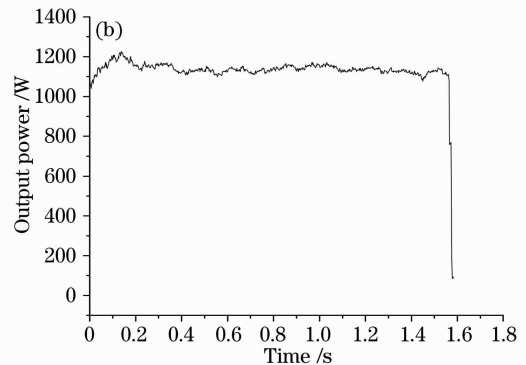
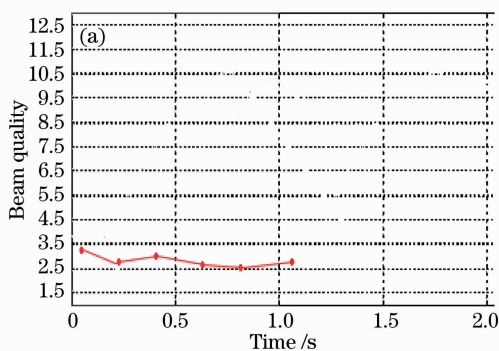


图 12 Nd:YAG 热容激光器光束质量(a)及输出功率(b)测试结果

Fig. 12 Experimental result of beam quality (a) and output power (b)

## 5 结 论

开展了热容激光器光束质量控制研究,通过对耦合系统优化设计使抽运均匀性提高到 90% 的水平;建立了有源非稳腔的理论分析模型,针对热容激光器的抽运条件开展了非稳腔的优化设计,实现了 2.7 倍衍射极限的千瓦级热容激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 Vetrovec John. Active mirror amplifier for high-average power [C]. *SPIE*, 2001, **4270**: 45~55
- 2 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beam*, 1998, **16**(4): 605~625

2 s 时其光束质量为 3 倍衍射极限。

## 4 光束质量控制实验研究

在改善介质增益分布的基础上利用非稳腔开展了热容激光二极管抽运固体激光器(DPL)光束质量控制实验研究,非稳腔采用虚共焦非稳腔(凹镜曲率半径为 7 m,凸镜曲率半径为 5 m,腔长为 1 m),腔内采用 4 个高功率激光二极管阵列抽运两片直径为 40 mm 的 Nd:YAG 介质,平均抽运功率为 12 kW。

光束质量的测试结果如图 12 所示,实验中采用 CCD 测量了激光器远场光斑口径的大小,通过与理想光束的远场光斑口径大小进行比较从而进一步得到激光器的光束质量。需要指出的是虽然在 10 Hz 重复频率下实现了平均光束质量约 1.4 倍衍射极限的激光输出(吹气实时冷却状态下激光器长时间运转),但随着占空比的增加,由于动态热效应带来的高阶像差加剧使激光器光束质量变差。从图 12 可以看出在扣除离焦效应带来的影响后,当占空比为 15% 时激光器的平均光束质量约为 2.7 倍衍射极限,此时激光器的平均输出功率为 1150 W。

- 3 Cai Zhen, Cao Dingxiang, Jiang Jianfeng *et al.*. Dynamic optical distortion of laser medium in heat-capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1610~1614
- 蔡震,曹丁象,蒋建锋等.热容模式下激光介质的动态光学畸变[J].*强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1610~1614
- 4 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Kilowatt class laser diodes-pumped solid state heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 153~156
- 蔡震,胡浩,蒋建锋等.千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J].*中国激光*, 2006, **33**(2): 153~156
- 5 Xiaodong Yang, Qinjun Peng, Yong Bo *et al.*. 2277-W continuous-wave diode-pumped heat capacity laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 226~228
- 6 Hou Liqun, Zu Jifeng, Dong Yue *et al.*. Numerical simulation of thermal induced effects and cooling characteristics of Nd:GGG laser crystal slabs in the heat capacity operation mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1025~1029



侯立群, 祖继锋, 董 玥 等. Nd: GGG 激光晶体热容工作下的热致效应与冷却特性数值模拟[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1025~1029

7 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Operation condition optimization of laser media heat-capacity laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(suppl.): 89~92

蔡 震, 胡 浩, 蒋建锋 等. 热容模式下激光介质工作条件的优

化[J]. 中国激光, 2006, 33(增刊): 89~92

8 Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin *et al.*. 160 W diode-pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(11): 1455~1458

唐 淳, 高清松, 童立新 等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1455~1458

## 光学前沿

### ——第二届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选

### 活动开展通知

为了进一步提高我国光学期刊的学术水平和论文质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进我国光学、激光科技事业发展,《光学学报》《中国激光》《中国光学快报》(英文版)特发起“光学期刊优秀论文评选活动”。在光学泰斗王大珩先生的支持下,本活动特命名为光学前沿——“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。

光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选结果在中国光学学会 2008 年学术年会上隆重公布。中国光学学会秘书长倪国强宣读了入选论文名单,中国光学学会理事长周炳琨院士、副理事长徐至展院士等为上海光机所周军等入选论文的作者代表颁发了证书和奖金。

根据“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动评选办法,光学前沿——第二届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动即将开始,欢迎广大作者提交论文信息,参与评选。评选规则请参考“大珩杯”光学期刊优秀论文评选办法。

编辑部将在 2009 年年底,对获奖作者进行表彰,并颁发证书和奖金。

主办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所

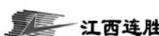
联合主办单位:相干(北京)商业有限公司

上海瀚宇光纤通讯技术有限公司

协办单位:高功率激光物理联合实验室

江西连胜实验装备有限公司

普爱纳米位移技术有限公司



时间安排:参评论文统计截止时间:2009 年 8 月 30 日。

论文作者提交申请材料时间:2009 年 7 月 1 日~9 月 30 日(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明),请在中国光学期刊网上提交。

审核时间:2009 年 10 月 8 日~10 月 30 日。

详情请浏览:<http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

咨询电话:021-69918426 段家喜 编辑 duanjiaxi@siom.ac.cn

光学期刊联合编辑部

2009-5-1