

文章编号: 0258-7025(2009)07-1772-05

# 背冷式方形 Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片激光器的热效应

史 彭 李金平 陈 文 李 隆 甘安生

(西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要** 以半解析热分析理论为基础,研究了超高斯分布激光二极管(LD)端面抽运背冷式方形 Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片晶体的热效应。通过对激光晶体工作特点的分析,建立热模型,利用新的热传导方程求解方法,得出了背冷式方形 Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片晶体内部温度场、热形变场的半解析计算表达式。研究表明,当使用输出功率为 700 W 的 LD(超高斯阶次为 4)端面中心入射背冷方形 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体(晶体掺钕原子数分数为 1.2%)时,在抽运端面中心获得 69.6 °C 最高温升和 74.1 nm 最大热形变量,与实验结果一致。得出的方法可以应用到其他激光晶体热问题研究中。

**关键词** 激光物理; Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片晶体; 热分析; 背冷; 各向异性

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1772

## Thermal Effect of Nd : GdVO<sub>4</sub> Cube Microchip Laser With Back Surface Cooling

Shi Peng Li Jinping Chen Wen Li Long Gan Ansheng

(Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract** Based on the theory of semi-analytical thermal analysis, thermal effects within a diode-end-pumped cubic Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip crystal cooling from back surface are investigated. Based on the analytical theory of aeolotropies, a thermal model that matches the actual working state of the microchip crystal is established. Temperature and thermal distortion fields within the microchip crystal are analyzed and general solutions of the temperature and thermal distribution fields of the crystal are obtained by using a novel method to solve the heat conduction equation of anisotropic medium. Research results show that a maximum temperature rise of 69.6 °C and a maximum thermal distortion of 74.1 nm can be obtained in the center of the pump face when the Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip crystal doped with 1.2% Nd<sup>3+</sup> is end pumped in the center of the front end face by LD (the super-Gaussian order is 4) with an output power of 700 W, which is in agreement with experimental results. The method can be applied to other thermal analyses of laser crystals.

**Key words** laser physics; Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip crystal; thermal analysis; back surface cooling; aeolotropies

## 1 引 言

微片激光器是一种小型化的激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL)<sup>[1,2]</sup>,具有体积小、结构紧凑、稳定、寿命长、全固态化、转换效率较高、易廉价批量生产等优点。微片激光器腔长较短,容易实现光束质量好、光强亮度大的单纵模单频激光输出,在激光雷达、激光测距、激光传感、激光医疗及光存储、非线性光学等领域有着重要的应用价值<sup>[3]</sup>。

在适合激光二极管抽运的激光增益介质中,Nd : GdVO<sub>4</sub>晶体在 1.06 μm 有着较大的受激发射截面,在 808 nm 处有较高的吸收截面,对抽运光波长吸收带较宽等优点,适合用于制作微片激光器<sup>[1]</sup>。

由于微片激光器的激光晶体较薄(1 mm 左右),一端镀反射膜的方法使抽运光获得二次吸收。虽然微片激光器的热效应比一般的 DPSSL 小,但是,随着抽运光功率增加(目前可达到数百瓦至数千瓦),微片激光器的热效应明显<sup>[4]</sup>。微片激光晶体吸

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-12-29

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(06JK251)和陕西省工业攻关项目(2008K05-1)资助课题。

作者简介: 史 彭(1956—),男,教授,主要从事高功率激光器热分析研究。E-mail: pshi56@163.com

收部分抽运光能量转变为晶体热能,在晶体内部形成相对稳定的温度梯度场分布,产生热应力分布,在抽运端面发生热形变,产生热致双折射<sup>[5]</sup>,影响微片激光器的输出光束质量和输出功率。

为了降低微片晶体内部温度,一般对微片晶体采用背部冷却或周边冷却方式,背部冷却比周边冷却效率更高。常用的微片晶体主要有方形和圆形两种。作者已经研究了背冷圆形微片晶体热效应<sup>[6]</sup>,本文研究背冷式方形 Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片激光晶体在高功率超高斯分布 LD 抽运光端面抽运下,微片晶体产生的热效应。

## 2 微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场

### 2.1 背冷式方形微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体热模型

背冷式方形 Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器模型如图 1 所示<sup>[7]</sup>。微片晶体下表面镀有对 808 nm 和 1064 nm 波长光的全反(HR)膜,再与制冷器良好接触。晶体上端面镀有对 808 nm 和 1064 nm 波长光的增透(AR)膜。方形晶体尺寸为  $a \times b \times c$ 。建立坐标系,坐标原点  $O$  在晶体一角,向上为  $z$  轴。波长为 808 nm 的抽运光从晶体上端面中心向下抽运,经下表面 808 nm 高反膜反射,反方向上传播。

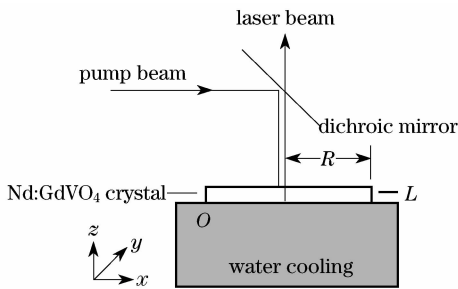


图 1 Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片激光器示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip laser

### 2.2 方形微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场半解析公式

在分析抽运光分布时,采用超高斯分布假设更具有普遍性。当超高斯分布阶次为 1 时为高斯分布,阶次为很高时为均匀分布。阶次为 3~4 时的超高斯分布抽运光兼顾光束质量和提取效率<sup>[8,9]</sup>。具有超高斯分布函数抽运光平行  $z$  轴入射到晶体  $z = c$  面中心入射光的分布表达式为<sup>[8]</sup>

$$I_i(x, y, c) = I_0 e^{-2 \left[ \frac{(x-a/2)^2 + (y-b/2)^2}{w^2} \right]^k}, \quad (1)$$

其中  $I_i$  为抽运光强度,  $I_0$  为抽运光中心的强度,  $w$  为抽运光束的高斯半径,  $k$  为超高斯分布阶次。抽运光在晶体下表面反射,在微片晶体内部产生的温

度场为

$$T(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{nml} \sin \frac{n\pi x}{a} \times \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{(2l+1)\pi z}{2c}, \quad (2)$$

式中常数  $A_{nml}$  为

$$A_{nml} = \frac{16\beta \eta I_0}{ab\pi^2 \left\{ \lambda_x \left( \frac{n}{a} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{m}{b} \right)^2 + \lambda_z \left[ \frac{(2l+1)}{2c} \right]^2 \right\}} \times \frac{e^{-c\beta} (2l+1)\pi(1+\zeta_R) + 2c\beta(-1)^l(1-\zeta_R)e^{-2c\beta}}{(2l+1)^2\pi^2 + 4c^2\beta^2} \times \int_0^b \int_0^a e^{-2 \left[ \frac{(x-a/2)^2 + (y-b/2)^2}{w^2} \right]^k} \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} y dx dy, \quad (3)$$

其中  $\beta$  为 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体对抽运光的吸收系数,  $\eta$  为由荧光量子效应和内损耗所决定的热转换系数,  $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_L$ ,  $\lambda_p$  为激光二极管抽运光波长 808 nm,  $\lambda_L$  为谐振腔的振荡激光波长 1064 nm,  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  分别为 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体在三个方向上的导热系数或热导率,  $\zeta_R$  为 808 nm 高反膜的反射率。

### 2.3 方形微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场计算实例

Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体是各向异性介质,  $c$  轴沿  $x$  方向。阶次为 4, 半径 10 mm 的超高斯抽运光抽运微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体, 其抽运功率为 700 W。微片尺寸 40 mm × 40 mm × 1.3 mm, 掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 1.2% 的 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体对于 808 nm 抽运光吸收系数为 74 cm<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>, 导热系数为 5.23 W/(m · K)(// $c$ ), 11.7 W/(m · K)( $\perp c$ )。热膨胀系数 7.3 × 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>(// $c$ ), 1.5 × 10<sup>-6</sup> ( $\perp c$ )。下表面 808 nm 高反膜反射率为 99%。计算出微片晶体上表面( $z = c$  面)温度分布如图 2 所示, 微片晶体  $x = a/2$  面温度分布如图 3 所示,  $x = a/2$  面等温线分布如图 4 所示。通过计算可得出: 1) 在抽运光束一半范围内( $r < w/2$ )等温线大致平行晶面, 抽运面中心最高温升为 69.6 °C; 2) 在抽运光束范围外( $r > w$ )基本上没有温升; 3) 过渡区( $w/2 < r < w$ )等温线大致垂直晶面, 并从垂直晶面向平行晶面过渡, 会产生较强的热内应力; 4) 虽然晶体是各向异性的, 其内部产生的温度场具有中心对称性。

仅改变公式中的阶次  $k$  的大小, 可以定量分析不同阶次超高斯抽运光产生的温度场, 如图 5 所示。阶次越小, 抽运面中心最高温升越高, 阶次分别为 1, 2, 3, 4 时, 抽运面中心最高温升分别为 103.1 °C, 84.7 °C, 75.0 °C 和 69.6 °C, 这是由于不同阶次超高斯抽运光分布产生的。

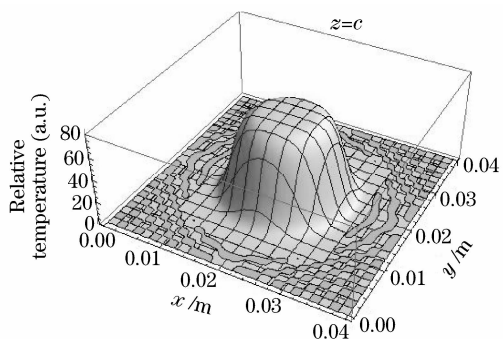


图 2 微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体上表面温度场

Fig. 2 Temperature distribution on the upper surface of the Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip crystal

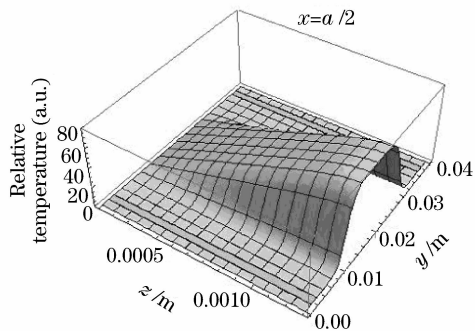


图 3 微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体内部温度场

Fig. 3 Temperature distribution in the Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip crystal

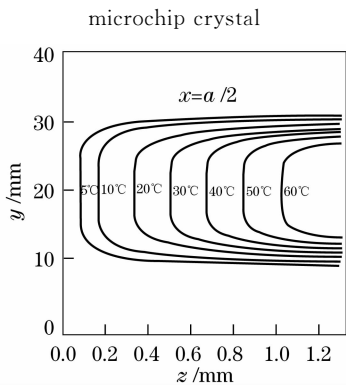


图 4 微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体内部等温线

Fig. 4 Isotherm in the Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip crystal

仅改变公式中  $c$  的大小,可以计算分析晶体厚度对晶体内部温度场的影响。计算得出增加晶体厚度,最高温升略微下降。仅改变公式中  $a$  或  $b$  的大小,可以计算分析晶体尺寸对晶体内部温度场的影响。还可以仅改变公式中  $\omega$  的大小,计算分析光斑大小对温度场影响等。

虽然微片晶体是方形的,但是在背冷方式下,产生的内部温度场与圆形微片内部温度场基本一致<sup>[6]</sup>,这是由于晶体内部产生的热量主要从背面流出造成的。

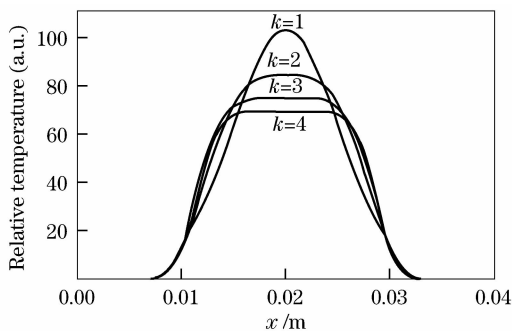


图 5 不同阶次温度场的比较

Fig. 5 Comparison of the temperature fields with different orders

文献[11]的作者对背冷圆形微片 Nd : YAG 晶体温度场进行了研究。阶次为 4 时抽运端面最高温升为 71.55 °C。按照其条件计算得出最高温升为 72.22 °C。其偏差在合理范围内,证明了本文得出的温度场计算公式的正确性。

### 3 微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体热形变

影响微片激光器热效应的主要是  $z$  方向的热形变。微片内部任意点  $(x, y, z)$  原温度为 0, 达到热平衡后的温度为  $T(x, y, z)$ , 则该点的温度增加量为  $T(x, y, z)$ 。温升引起该点热应变, 该点  $z$  方向  $dz$  元热膨胀量为  $dL_z = \alpha_z T(x, y, z) dz$ , 其中  $\alpha_z$  为 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体沿  $z$  方向的热膨胀系数。该点  $z$  方向总热膨胀量为<sup>[12,13]</sup>

$$L_z(x, y) = \alpha_z \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2cA_{nml}}{(2l+1)\pi} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y. \tag{4}$$

由于 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体下表面与冷却器接触, 晶体上部温度高, 所以热膨胀主要在晶体上边抽运面上。利用(4)式可以计算抽运面上热形变。在图 2 条件下, 计算得出抽运面上热形变分布如图 6 所示, 抽运光中心最大热形变量为 74.1 nm。由于 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体  $z$  方向热膨胀系数较小, 温升不高, 所以微片 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体热形变量较小。由图 6 可以得出, 抽运面上热形变与晶体上表面温度分布相似, 仅分布在抽运光中心附近。计算不同阶次情况可知, 阶次越小, 最大热形变量越高。

### 4 微片厚度对抽运能量的吸收规律

微片激光器体积小、结构紧凑, 要求微片厚度薄。另一方面, 背冷情况下, 微片厚度越薄, 微片晶体内部温升越小, 热效应越小。但是, 当微片厚度过

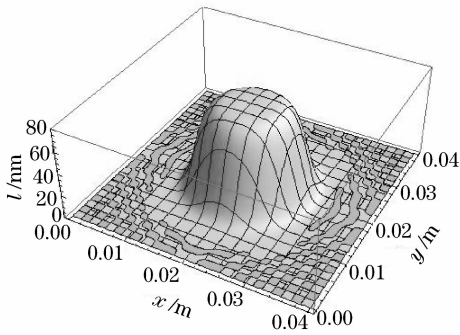


图6 端面形变分布图

Fig. 6 Diagram of end face distortion distribution

小时,抽运光能量没有被完全吸收,部分抽运光能量投射出微片晶体而浪费。

设抽运光平行  $z$  轴入射到微片晶体上表面(图1中  $z=c$  面)的光强为  $I_i$ , 晶体对抽运光的吸收系数为  $\beta$ 。抽运光到达微片晶体下表面,经过 808 nm 高反射膜反射,经过微片晶体,从微片晶体上表面透射出。抽运光在微片晶体内的传播距离为  $2c$ ,则抽运光传播出微片晶体时的光强  $I_r$  为  $\zeta_R I_i e^{-2\beta c}$ 。微片晶体对抽运光的吸收百分比为

$$\frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - \zeta_R e^{-2\beta c}. \quad (5)$$

图7给出了掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 1.2% 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体(吸收系数为 74 cm<sup>-1</sup>)、掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体(吸收系数为 9.1 cm<sup>-1</sup>[13])及掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 3.0% 的 Nd:YAG 晶体(吸收系数为 20.9 cm<sup>-1</sup>[6])的晶体厚度对抽运光的吸收百分比的影响(808 nm 高反射膜反射系数取 0.99)。

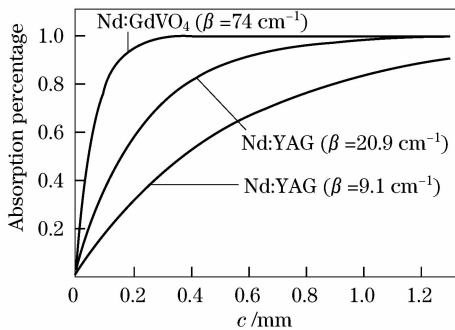


图7 晶体对抽运光的吸收百分比

Fig. 7 Absorption percentage for pump power of laser crystal

从图7可以得出:1) 由于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体吸收系数高,当晶体厚度为 0.25 mm 时,对抽运光的吸收百分比达到 97.6%。用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体做微片激光器时,晶体厚度不必过长;2) 用低吸收系

数 Nd:YAG 晶体做微片激光器时,晶体厚度不能过薄(当晶体厚度为 1.3 mm 时,对抽运光的吸收百分比达到 90.7%),否则有较多的抽运光浪费。提高 Nd:YAG 晶体对抽运光的吸收百分比的主要方法是提高掺 Nd<sup>3+</sup> 的离子浓度。

## 5 结 论

在分析了具有超高斯分布 LD 端面抽运背冷式微片 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体激光器工作特点的基础上,建立了符合实际情况的热模型。利用各向异性 Poisson 方程一种新求解方法,得出了微片 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体内部温度场、热形变场半解析计算方法。计算得出输出功率为 700 W 的 LD(超高斯阶次为 4)端面中心入射背冷式方形 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体(晶体掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 1.2%)时,在抽运端面中心获得 69.6 °C 最高温升和 74.1 nm 最大热形变量,与参考文献所给结果进行了比较,验证了本文理论结果的正确性。本文研究了不同晶体厚度对抽运光吸收百分比的定量影响,所得结果为优化微片激光器设计提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Yufeng Li, Youlun Ju, Y. Urata *et al.*. Experimental spectra study of Tm : GdVO<sub>4</sub> microchip laser at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 351~352
- 2 Rro Haibo, Liao Yun, Cheng Jianbo *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched monolithic microchip laser based on liquid phase epitaxy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 90~93  
饶海波,廖云,成建波等. 外延单片式激光二极管抽运被动调 Q 微片激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 90~93
- 3 Wang Shuxiang, Chen Yunlin, Yan Caifan *et al.*. Survey of microchip lasers[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(4): 401~406  
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
- 4 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): 37~40  
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): 37~40
- 5 Xie Wenjie, S. C. Tam, Y. L. Lam *et al.*. Analysis of a dynamical procedure on diode-end-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(10): 1368~1372
- 6 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd : YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646  
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
- 7 G. Lescroart, R. Muller, G. Bourdet. Experimental investigations and theoretical modeling of a Tm : YVO<sub>4</sub> microchip laser[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **143**: 147~155
- 8 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

王 宁,陆雨田,孔 勇. 用快速傅里叶变化法分析超高斯发射镜腔的光强分布[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1317~1322

9 Xie Wenjie, Y. Kwon, Hu Wentao *et al.*. Thermal modeling of solid state lasers with super-Gaussian pumping profiles [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2003, 42 (6): 1787~1794

10 Shi Peng, Chen Wen, Li Long *et al.*. Influence of laser distribution on the thermal effect of Nd : YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 29~33

史 彭,陈 文,李 隆等.激光分布对抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体热效应的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 29~33

11 Pei Zhengping, Tang Chun, Tu Bo *et al.*. Simulation of thermal effect on beam distortion in Nd : YAG thin disk laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1615~1618

裴正平,唐 淳,涂 波等.Nd : YAG 薄片激光器热致波前畸变 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1615~1618

12 Shi Peng, Chen Wen, Li Long *et al.*. Semianalytical thermal analysis on a Nd : YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46 (19): 4046~4061

13 Shi Peng, Chen Wen, Li Long *et al.*. Semianalytical thermal analysis of thermal focal length on Nd : YAG rods [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(26): 6655~6661



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

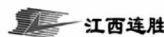
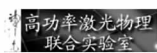
联合主办单位:相干(北京)商业有限公司

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