

文章编号: 0258-7025(2004)07-0797-05

环形激光二极管抽运激光棒的热致退偏分析

欧群飞^{1,2}, 陈建国¹, 冯国英^{1*}, 张申金¹, 朱海波¹, 李明中²

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 利用自行编制的热效应模拟软件, 采用光线追迹方法获得激光棒内的热沉积分布, 在此基础上利用热传导模型和热力学模型, 对高功率环形激光二极管阵列抽运的棒状激光放大器中动态热致退偏进行了详细模拟计算, 并比较了不同输入功率下的热致退偏情况。结果表明, 采用基于光线追迹的发热模型, 可以很好地计算环形激光二极管抽运激光棒中的热效应问题; 瞬态下的光程差分布和同消色线退偏图案的环数与棒内瞬态温升分布有关; 输入功率越高, 热效应引起的相对光程差就越大, 波前畸变就越大, 引起的热致退偏也就越严重, 在同消色线图案中的环数就越多。

关键词 激光技术; 热效应; 热致退偏; 环形二极管抽运固体激光器

中图分类号 TN 248.1+3 **文献标识码** A

Analyses of Thermal Depolarization in Ring Laser Diode Array Side-Pumped Rod Laser

OU Qun-fei^{1,2}, CHEN Jian-guo¹, FENG Guo-ying¹,
ZHANG Shen-jin¹, ZHU Hai-bo¹, LI Ming-zhong²

¹School of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

²Research Center of Laser Fusion, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The thermal depolarization in ring laser diode array side-pumped rod laser is studied. Based on the intensity distribution of laser diode (LD), a inhomogeneous heat distribution in the laser rod has been obtained by using the ray tracing method. And then, the transient temperature rise and thermal stress distribution are obtained by using the finite element method. In this paper, the relative thermal optic pass difference (OPD) and output beam patterns with depolarization are simulated at both thermal steady state and transient state. Simulation results show that the thermal induced depolarization grows with the input power, and the transient depolarization grows with the temperature rise and reaches to a steady state as well.

Key words laser technology; thermal effect; thermal depolarization; ring laser diode array pumped rod laser

1 引 言

随着大功率激光二极管(LD)的发展, 采用激光二极管作抽运光源已成为当今激光领域的重要发展方向^[1~8]。相对于传统的灯抽运固体激光器而言, 由于激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)的抽运光谱与固体工作物质的吸收光谱相匹配, 从总体

上说热效应大大减轻。然而这并不意味着在激光二极管抽运的固体激光器中不存在热效应所导致的负面影响。相反, 由于固体工作物质尺寸的减小以及高效率光学耦合系统的采用, 在工作物质的局部区域内, 抽运光功率密度大大增强, 甚至明显高于灯抽运固体激光器, 导致严重的热效应, 并引起一系列的

收稿日期: 2003-04-28; 收到修改稿日期: 2003-10-10

基金项目: 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合项目(No. 10176019)资助课题。

作者简介: 欧群飞(1977—), 男, 湖南武冈人, 四川大学电子信息学院博士研究生, 主要从事高功率激光器件与光通信等方面的研究。E-mail: efei4u@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: guoying_feng@yahoo.com.cn

热致光学畸变,如热致双折射、相位畸变、退偏等。因此在激光二极管抽运固体激光器中,尤其是在大功率激光二极管阵列抽运情况下,要充分考虑热效应的影响,采取相应的措施,以获得高光束质量、大能量的激光二极管抽运的固体激光输出。

近年来,国内外一些研究人员对固体激光器的热效应问题进行了大量的研究^[9~13]。然而,对于 DPSSL 中的热效应问题,这些研究多采用简化的计算模型,没有将 LD 的辐射不均匀性考虑进去。本文从 LD 抽运光源出发,采用光线追迹方法获得激光棒中的热沉积分布,在此基础上采用有限元方法计算工作物质中的温度分布和热应力分布。本文作者已编制了一实用计算模拟软件 Thermal Effect Analyst(TEA),可以计算模拟环形 LD 阵列侧向抽运激光棒内的稳态和瞬态温度分布、热应力分布,在此基础上分析计算了热致光学畸变,计算结果与文献^[14]保持一致。

2 物理模型

计算中采用的环形高功率激光二极管抽运棒状激光放大器的剖面图如图 1 所示,两个半圆形的环形激光二极管阵列对 YAG 棒进行侧面抽运。水套玻璃管内充满冷却水,对工作物质进行主动冷却。采用环形 LD 阵列紧密环绕棒状增益介质进行直接抽运的方案,是一种实现较高抽运光能量转换效率和抽运均匀性的简便方法^[1]。

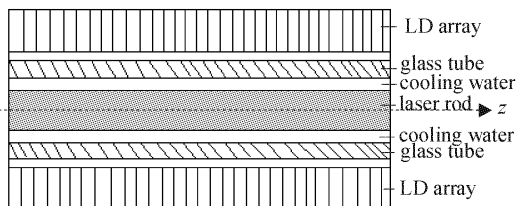


图 1 环形 LD 阵列抽运激光棒的结构侧视图

Fig. 1 Lateral view of the ring-LD array pumped structure

激光介质中的温度分布不仅与介质的热物性参数、几何结构有关,还与外部环境条件有关,并且还会随时间发生变化。在圆柱坐标系中,热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{k} \right) \quad (1)$$

式中, r 和 z 分别为半径和棒轴方向, T 为激光工作物质内的温度, t 为时间, k , ρ , C_p 分别为介质的导热系数、密度、定压比热, q_v 为材料的内热源强度,它与

抽运光在介质中的分布和介质的吸收系数有关,可以通过光线追迹的方法获得 q_v 的分布。

由于温度分布不均匀,激光棒中的温度梯度引起热应力。假设热应力在径向、角向和 z 轴方向上的三个分量为 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$,根据文献^[15],得到径向、角向和 z 轴方向的应变 $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$ 分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \end{aligned} \quad (2)$$

根据光弹性效应,温度分布不均匀在介质内造成的热应力又会在介质内引起折射率的不均匀,这就可能使介质由各向同性变为各向异性,导致热应力双折射。在线偏振光工作的激光器件中,热应力双折射引起严重的退偏损耗,常常导致器件的效率大大降低^[14]。温升和温度分布不均匀导致的激光介质折射率变化为

$$\Delta n = \Delta n_T + \Delta n_\sigma \quad (3)$$

式中 Δn_T 为温度变化直接产生的折射率改变, Δn_σ 为热应力引起的折射率变化。通常, Δn_T 可表示为

$$\Delta n_T = \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中 $\partial n / \partial T$ 为折射率温度系数,而 Δn_σ 则较为复杂。

当激光通过具有非均匀折射率分布的介质时,激光波面将发生畸变。如果入射光是偏振光,热应力双折射效应将导致一定程度的退偏。如果感应双折射为

$$\Delta n_B = \Delta n_r - \Delta n_\theta \quad (5)$$

其中 $\Delta n_r, \Delta n_\theta$ 分别为径向和角向的折射率变化。由光学知识可知,折射率差导致的相对光程差 OPD 为

$$\text{OPD} = \frac{1}{\lambda} \int_0^L \Delta n_B \cdot dz \quad (6)$$

于是相位变化量为

$$\delta = 2\pi \cdot \text{OPD} \quad (7)$$

特别地,若将热致双折射的激光棒置于正交的起偏器和检偏器之间,情况较为简单。线偏振光的透射强度为

$$\frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (8)$$

其中 θ 为起偏器与一个主双折射轴的夹角。透过光将形成同消色线。

3 模拟结果及分析

3.1 基于光线追迹的温度和应力分布

以激光二极管阵列抽运 $\phi 3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ Nd:YAG 棒为例进行了计算。首先采用光线追迹法获得棒内吸收能量分布,由此得到棒内的非均匀内热源强度 q_v 。在计算中假设 YAG 材料吸收系数为 0.3 mm^{-1} , LD 功率为 200 W, 冷却水温度和室内空气温度为 20°C , 换热系数 $h_1 = 30000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $h_2 = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 初始时刻棒内温度也为 20°C , 并且假设 $t=0$ 时刻, 对棒加上一个阶跃式的抽运光进行抽运。计算采用的 Nd:YAG 热性能参数来自参考文献[14], 导热系数 $k = 14 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 密度 $\rho = 4.56 \text{ g}/\text{cm}^3$, 定压比热 $C_p = 0.59 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 。根据(1)式计算得到的瞬态温升分布如图 2 所示。由图可见, 棒中心温升最快, 稳态时达到 103.1°C , 而棒表面由于受到循环水冷却, 温升最小, 稳态时为 46.8°C 。由于棒半径较细, 传热过程迅速完成, 而达到热平衡的时间较短, 为 0.5 s 。

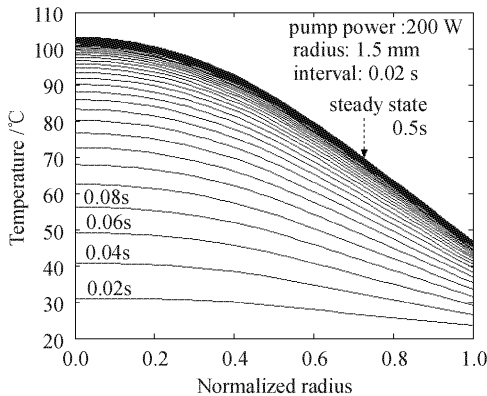


图 2 激光棒中心截面上的温升分布随时间增加达到稳态

Fig. 2 Distributions of the temperature rise on the central cross-section at different time after the pump-light is switched on

稳态热应力的计算结果如图 3 所示。计算采用的 Nd:YAG 物理特性参数为: 热膨胀系数 $\alpha = 7.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 弹性模量 $E = 3 \times 10^6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。由图可见, 棒中心区域的应力都为负值, 表现为压应力; 棒表面处径向应力为 0, 轴向和切向应力均为正值, 表现为张应力。计算结果与文献[14]保持一致。

3.2 热致退偏模拟

对于 YAG 晶体(晶轴方向沿 $[100]$ 方向), 经过

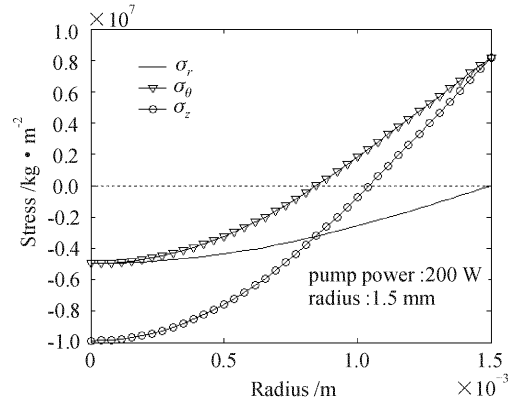


图 3 热应力分量在激光棒截面上的稳态分布
Fig. 3 Steady-state distributions of three thermal stress components on the cross-section

复杂的热力光学公式推导, 可以得到径向和角向的折射率变化为^[15]

$$\begin{aligned} \Delta n_r &= \Delta n_T - \frac{n_0^3}{12} [P_{11}(3\epsilon_r + \epsilon_\theta + 2\epsilon_z) + \\ &P_{12}(3\epsilon_r + 5\epsilon_\theta + 4\epsilon_z) + P_{44}(6\epsilon_r - 2\epsilon_\theta - 4\epsilon_z)] \\ \Delta n_\theta &= \Delta n_T - \frac{n_0^3}{12} [P_{11}(\epsilon_r + 3\epsilon_\theta + 2\epsilon_z) + \\ &P_{12}(5\epsilon_r + 3\epsilon_\theta + 4\epsilon_z) - P_{44}(2\epsilon_r - 6\epsilon_\theta + 4\epsilon_z)] \end{aligned} \quad (9)$$

其中 P_{11}, P_{12}, P_{44} 为弹光系数。对于 YAG 晶体, $P_{11} = -0.029, P_{12} = 0.0091, P_{44} = -0.0615$, 折射率温度系数 $\partial n / \partial T \approx 7.3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

利用(6)式和(9)式, 计算得到的不同时刻相对光程差的分布情况如图 4 所示。由图 4 可见, 在抽运开始时, 棒中心和表面之间的相对光程差较小。然后迅速增加, 在 0.5 s 时, 光程差达到 3.2 个波长。达到稳态后, 光程差不再改变。采用自行编制的计算模拟软件, 可以获得任意时刻处棒中心和表面之间的光程差。

图 5 给出了不同输入功率下的稳态光程差。从图中可以看出, 抽运功率分别为 $100 \text{ W}, 200 \text{ W}, 300 \text{ W}$ 时稳态最大光程差分别为 $1.6, 3.3, 5$ 个波长。由此可见, 输入功率越高引起的光程差越大, 波前畸变也就越厉害。

根据(8)式, 计算了位于正交偏振的起偏器和检偏器之间的激光棒退偏输出光强分布, 假设起偏器的透振方向沿水平方向。对 $\phi 3.0 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ YAG 棒, 抽运功率为 200 W 时的动态退偏图案如图 6 所示。从图 6 可以看出在一定抽运功率下不同时刻的瞬态退偏光斑的差别。同消色线图案有十字

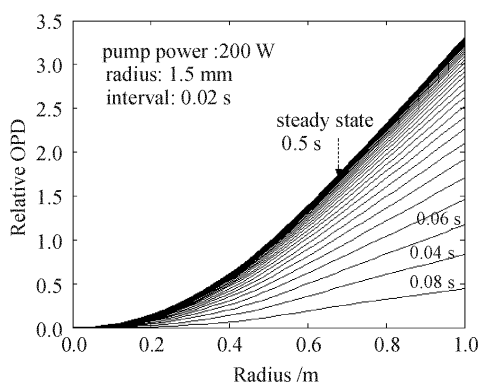


图 4 相对光程差随时间增加达到稳态

Fig. 4 Thermally induced relative OPD increases with time and reaches the steady state

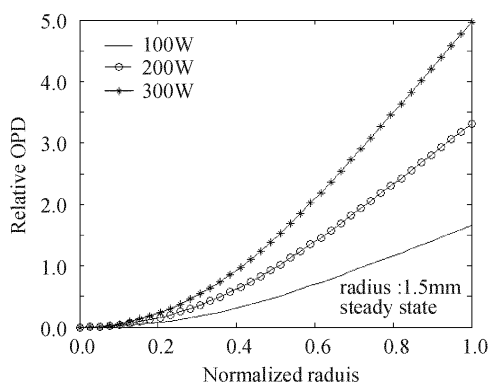


图 5 不同抽运功率下的稳态热致相对光程差

Fig. 5 Steady-state thermal OPD under different pumping power: 100 W, 200 W and 300 W

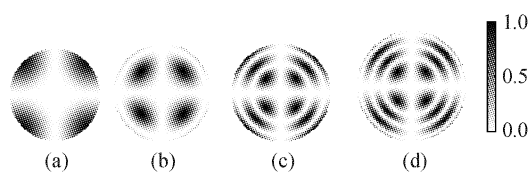


图 6 计算得到各个时刻的瞬态热致退偏图案

Fig. 6 Calculated transient depolarization patterns at the time of

(a) 0.02 s; (b) 0.06 s; (c) 0.20 s; (d) 2.0 s

形和环形两种,其十字臂平行或者垂直于入射偏振光。在十字形对应的晶体区域,感应双折射(径向或切向)轴与起偏器的轴同向,所以感应双折射只会引起相位迟滞,而不会引起偏振旋转。白色环对应着迟滞全波数的积分数^[14]。退偏图案在达到稳态的过程中,十字形的位置保持不变,白色环数不断增加以至稳态。

本文还比较了不同抽运功率下的稳态退偏图案。计算结果如图 7 所示,抽运功率分别为 100 W,

200 W, 300 W。由图可见,随着抽运功率增加,同消色线的环数增多。显然,抽运功率越大,退偏越厉害。

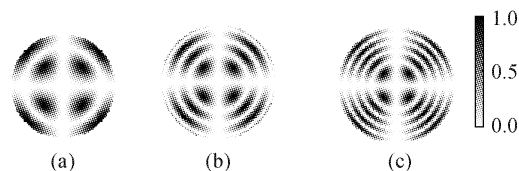


图 7 计算得到的不同抽运功率下的稳态热致退偏图案

(Nd:YAG 棒尺寸为: $\phi 3.0 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$)

Fig. 7 Calculated depolarization patterns at steady state with different pumping power

(a) 100 W; (b) 200 W; (c) 300 W

(the Nd:YAG rod is $\phi 3.0 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$)

4 结 论

从 LD 抽运源出发,采用光线追迹法获得激光棒中的热沉积分布,在此基础上采用有限元方法计算工作物质中的温度分布和热应力分布,详细分析了环形 LD 抽运激光棒中的瞬态热致退偏情形,并且比较了不同抽运功率下的退偏情况。结果表明: 1) 采用基于光线追迹的发热模型,可以很好地计算环形 LD 抽运激光棒中的热效应问题; 2) 瞬态下的光程差分布和同消色线退偏图案的环数与棒内瞬态温升分布有关,前者随着后者的增加而增加,到达稳态后将不再改变; 3) 输入功率越高,热效应引起的相对光程差就越大,波前畸变就越厉害,引起的热致退偏也就越严重,在同消色线图案中的环数就越多。计算结果与文献[14]保持一致。

参 考 文 献

- Luo Yiming, Li Mingzhong, Qin Xingwu *et al.*. Study on ring-LD side-pumping solid laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3):321~323
罗亦鸣,李明中,秦兴武等. 大功率环形 LD 侧面抽运 Nd³⁺:YLF 激光器的特性[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3):321~323
- C. Orth, R. Beach, C. Bibeau *et al.*. Design modeling of the 100-J diode-pumped-solid-state laser for project mercury [C]. *SPIE, International Symposium on High-Power Laser and Application*, UCRL-JC-127934, California, USA, 1998. 1~18
- Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):57~62
赵 鸿,姜东升,王建军等. 二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):57~62
- Chen Lin, Hou Xia, Lu Yutian. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pumping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7):825~828
谌 霖,侯 霞,陆雨田. 激光二极管阵列侧面直接抽运方式的

- 模拟计算和效果评估[J]. 光学学报, 2002, **22**(7):825~828
- 5 Hailin Wang, Weiling Huang, Zhouyou Zhuo *et al.*. High power CW diode-side-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(9):541~543
- 6 Zheng Quan, Zhao Ling, Jiang Yaoliang *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd:YAG/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):492~494
郑权, 赵岭, 姜耀亮等. LD抽运被动调Q Nd:YAG/LBO绿光激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(6):492~494
- 7 Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. QCW-LD-pumped Yb:YAG microchip lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):97~100
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
- 8 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34 μm Nd:GdVO₄ laser end-pumped by laser-diode-array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):681~683
杜晨林, 秦连杰, 孟宪林等. LD抽运高功率连续波 1.34 μm Nd:GdVO₄激光器研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(8):681~683
- 9 Ou Qunfei, Feng Guoying, Liu Danping *et al.*. Simulation and experimental study on thermal effects of Nd:YAG lasers [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(1):15~16
欧群飞, 冯国英, 刘丹平等. Nd:YAG 激光器热效应的计算模拟及实验研究[J]. 激光技术, 2002, **26**(1):15~16
- 10 S. Sutton, A. Erlandson, R. A. London *et al.*. Thermal recovery of the NIF amplifiers [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:665~675
- 11 Haiwu Yu, Wangguo Zheng, Chengcheng Wang *et al.*. Thermal-recovery optimization of the SG-III prototype [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(1):126~131
- 12 Jiang Dongsheng, Zhou Shouhuan, Hu Yu *et al.*. Simulation study on thermal effects of LD side-pumped solid-state laser [J]. *Journal of UEST of China*, 1999, **28**(4):428~431
姜东升, 周寿桓, 胡渝等. LD侧泵浦固体激光器的热效应分析和模拟研究[J]. 电子科技大学学报, 1999, **28**(4):428~431
- 13 Liu Jun-hai, Lu Jian-ren, Lu Jun-hua *et al.*. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers by a simple direct approach [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(3):181~183
- 14 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. the first edition in Chinese, Beijing: Science Press, 2002. 356~409
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 2002. 356~409
- 15 Walter Koechner, Dennis K. Rice. Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG:Nd lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, **QE-6**(9): 557~566

征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开 1541页 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科(辐射度学和光度学, 色度学, 光谱学, 光源, 成像光学, 信息光学, 量子光学, 统计光学, 分子光学, 非线性光学, 光的偏振, 光学薄膜和滤光片, 纤维光学和变折射光学, 集成光学, 视觉光学, 大气光学, 海洋光学, 高速摄影和光子学, 显微物镜和目镜, 光学调制器, 热探测器和光电探测器, 感光材料, 光学计量仪器, 光学材料, 光学工艺学), 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详略得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部出版。本论文集共收录论文 173 篇, 600 多页。定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部出版。本论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011, 请从邮局汇款

地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800